



**HAL**  
open science

## Centre de recherches pétrographiques et géochimiques : rapport annuel 2004-2007

- Centre de Recherches Pétrographiques Et Géochimiques

► **To cite this version:**

- Centre de Recherches Pétrographiques Et Géochimiques. Centre de recherches pétrographiques et géochimiques : rapport annuel 2004-2007. [Rapport de recherche] CNRS. 2012, 180 p. hal-01358142

**HAL Id: hal-01358142**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01358142v1>**

Submitted on 31 Aug 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

C R P G

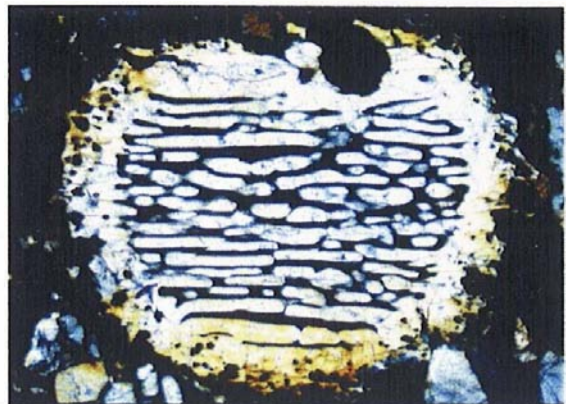
Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques

# RAPPORT D'ACTIVITÉ

2004

-

2007



CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

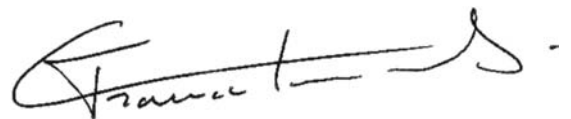


Ce document est la version définitive du rapport d'activité du CRPG à la fin 2007. Imprimé au CRPG en juillet 2008 avec une prise en compte des remarques du Comité d'experts de l'AERES qui s'est réuni fin janvier 2008.

janvier 2008  
Bernard MARTY  
directeur lors du quadriennal 2005-2008

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'M' and 'B' followed by a horizontal line.

janvier 2008  
Christian FRANCE-LANORD  
porteur du projet pour le quadriennal à venir

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'France-Lanord' with a horizontal line and a small flourish at the end.



# SOMMAIRE

3	LE BILAN
21	COSMOCHIMIE ET PLANÉTOLOGIE
37	GÉODYNAMIQUE : COUPLAGES ENTRE PROCESSUS SUPERFICIELS PROFONDS
55	RELIEF - EROSION - CLIMAT
67	ACTIVITÉS ANTHROPIQUES ET VALORISATION
75	L'ORGANISATION INTERNE DU CRPG
81	LES IMPLICATIONS DES AGENTS
83	DANS LES INSTANCES INTERNATIONALES
85	DANS LES INSTANCES NATIONALES
87	DANS LES INSTANCES LOCALES
91	LA PROSPECTIVE
101	LES THÈMES DE RECHERCHE 2009 - 2012
103	COSMOCHIMIE, PLANÈTES ET TERRE PRIMITIVE
117	MAGMAS ET FLUIDES PROFONDS
127	SURFACE DE NOTRE PLANÈTE
137	ACTIVITÉS DE VALORISATION
141	LES ACTIVITÉS DES CHERCHEURS, ENSEIGNANTS-CHERCHEURS ET INGÉNIEURS DE RECHERCHE
143	LES FICHES INDIVIDUELLES
209	LES CONFÉRENCIERS INVITÉS
213	LES ACTIVITÉS DES ITA
235	LES DOCTORANTS, LES THÈSES SOUTENUES ET LES CHERCHEURS VISITEURS
251	LES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS À CONGRÈS
253	RANG A1
262	RANG A2
262	RANG A3
264	RANG B
266	LIVRES ET CHAPITRES DE LIVRES
267	COMMUNICATIONS À CONGRÈS
277	LES CONTRATS DE RECHERCHE
283	LES SERVICES
285	LE SARM
293	GEOSTANDARDS GEOANALYSIS RESEARCH
295	LES SONDES IONIQUES ET LE SERVICE NATIONAL
305	LE BILAN HYGIÈNE ET SÉCURITÉ
311	LE BILAN POUR LA FORMATION PERMANENTE
317	L'OUVERTURE VERS LE GRAND PUBLIC
323	LA REVUE DE PRESSE
	LE CD
	LES PUBLICATIONS INTÉGRALES EN FORMAT .PDF
	LES RAPPORTS ANNUELS SONDES IONIQUES 2004-2005-2006
	LE PROJET DÉTAILLÉ POUR LA NOUVELLE SONDE IONIQUE IMS 1280
	LA VERSION .PDF DU PRÉSENT RAPPORT D'ACTIVITÉ





# LE BILAN 2004 - 2007





# LE BILAN DU CRPG

## 2004 - 2007

### PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU LABORATOIRE

Le Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques -CRPG- est une unité Propre du CNRS UPR 2300, conventionnée avec l'Institut National Polytechnique de Lorraine -INPL- et l'Université Henri Poincaré. Le CRPG a pour vocation l'étude de la Terre et de son environnement à toutes les échelles de temps et d'espace. Ses actions de recherche concernent : la formation du système solaire, l'évolution précoce de la Terre, la dynamique du manteau et de la lithosphère, le cycle altération-érosion et son contrôle au long terme sur le climat, les ressources, et l'impact de l'activité humaine sur l'environnement.

Le CRPG (Directeur : Bernard MARTY, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie) a un effectif d'une centaine de personnes, se répartissant comme suit :

Chercheurs CNRS :	10 (+ 1 à venir à partir de janvier 2008)
Enseignants-chercheurs :	15
Chercheur IRD :	1
ITAs CNRS :	39 (+ 1 à venir à partir de décembre 2007)
IATOS :	2
ITA contractuels :	3
Chercheurs non permanents :	8
Doctorants :	33 (au 3 août 2007)

Le CRPG relève du Département scientifique du CNRS MPPU (ST et SIC), des sections du Comité National du CNRS 18 et 20, et des sections 35 et 36 du Conseil National des Universités.

L'histoire de ce laboratoire est liée à celle de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie, qui avait été créé au début du XX<sup>ème</sup> siècle pour former les cadres de l'industrie minière lorraine. Le CRPG a été créé en 1953 à l'initiative du professeur Marcel Roubault, par convention entre le CNRS et l'Académie de Nancy, avec pour but de fournir un support moderne à l'exploration minière régionale, nationale et internationale. Pour cela, des équipes de recherche en géochimie et en pétrologie ont été formées et dotées des meilleurs équipements analytiques du moment. Cette caractéristique s'est maintenue et le CRPG est l'un des centres internationaux les mieux équipés pour la caractérisation pétrologique et géochimique des roches, fluides naturels, et minéraux. Le déclin de la mine dans les années 60 a conduit le CRPG à diversifier ses recherches, vers l'étude de la croûte terrestre et de ses déformations, puis du manteau, vers la géomodélisation dans les années 80, puis vers la cosmochimie et les environnements passés et actuels dans les années 90.

Dans le quadriennal qui s'achève, le CRPG a pérennisé son organisation en trois équipes de recherche, gérant les moyens humains et matériels :

- Géochimie (resp. Etienne Deloule, Directeur de Recherche CNRS)
- Pétrologie : (resp. Gaston Giuliani, Directeur de Recherche IRD)
- Géodynamique (responsable, Mary Ford, Professeur des Universités INPL-ENSG)

Le centre a fonctionné selon 4 axes de recherche :

- Cosmochimie et Terre Primitive (resp. M. Chaussidon DR CNRS et G. Libourel Pr ENSG)
- Géodynamique (resp. M. Ford Pr ENSG, G. Caumon MC ENSG et L. Reisberg DR CNRS)
- Relief-Erosion-Climat (resp. R. Pik CR CNRS et N. Vigier CR CNRS)
- Activités anthropiques (resp. G. Giuliani DR IRD et J. Carignan IR CNRS)

Le CRPG héberge deux services nationaux du CNRS :

- Le service d'analyse des roches et des minéraux (SARM, Dir. J. Carignan, IR CNRS). Le SARM est une facilité nationale qui permet sur une base de prestation payante et dégressive en fonction de l'affiliation l'analyse des éléments majeurs et traces dans des roches, minéraux, et fluides. Le SARM fournit également des standards de roches et de minéraux pour lesquelles les compositions sont certifiées.

- Le service national de la sonde ionique de l'INSU (resp. M. Chaussidon, DR CNRS, et E. Deloule, DR CNRS), qui permet l'accès de la communauté nationale à ce grand instrument sur un certain pourcentage du temps d'analyse, la sélection des projets étant effectuée par une commission indépendante.

Depuis 1991, le CRPG est membre fondateur de l'Institut Lorrain des Géosciences (ILG) qui se transformera en FR-CNRS ILG, puis en 1999, en Fédération EST (Eau-Sol-Terre).

## THÈMES SCIENTIFIQUES DE RECHERCHE

### COSMOCHIMIE-PLANÉTOLOGIE

Ce thème a été particulièrement fructueux dans cet exercice. Les recherches effectuées au CRPG ont en effet contribué à proposer une vision originale de la formation du système solaire, dans laquelle les rôles de l'irradiation précoce par le soleil jeune, les interactions solide-gaz lors de la condensation de la nébuleuse proto-solaire, et la formation de planètes très précoces sont essentiels. Le CRPG a également participé pleinement à la caractérisation de matière extraterrestre ramenée par les deux premières missions spatiales depuis Apollo de retours d'échantillons.

L'implication des chercheurs du CRPG dans ce thème a conduit à plusieurs premières mondiales, dont :

- condensation anhydre de carbonates à partir d'un gaz chaud, qui permet d'expliquer la présence de cette phase dans les enveloppes d'étoiles jeunes;

- découverte de  $^7\text{Be}$  qui a une demi-vie de 53 jours, dans le système solaire naissant, démontrant le rôle de l'irradiation pour créer des radioactivités éteintes,

- découverte d'oxygène isotopiquement très anormal «caché» dans la matière organique des météorites, dont la présence traduit un nouveau type de silicates extraterrestres, formés par des processus d'irradiation dans le gaz nébulaire;

- formation des premiers solides par condensation et interaction grain-gaz en milieu ouvert;

- détermination de la composition isotopique de l'oxygène dans le soleil, grâce à l'analyse de grains de métal de sols lunaires irradiés par le vent solaire,

- détermination de la composition isotopique de l'azote du vent solaire dans les cibles de la mission spatiale Genesis,

- détermination de la composition isotopique des gaz rares légers dans du matériel cométaire (mission Stardust);

- découverte des planètes «oubliées» formées très tôt puis complètement broyées, dont les résidus ont nourri les objets considérés jusque là comme étant parmi les plus primitifs du système solaire;

- analyse isotopique du germanium dans les météorites, qui permet de préciser les processus de différenciation des noyaux planétaires;

- détermination expérimentale du fractionnement isotopique du Fe lors de la différenciation noyau-manteau

- mise en évidence d'une convection très forte à l'Archéen grâce aux isotopes des gaz rares.

- développement de la géochimie isotopique de Fer dans les cherts anciens,

- mise en évidence d'une température élevée pour les océans de la Terre ancienne.

L'expertise analytique du CRPG a permis au centre d'être intégré dans les équipes scientifiques en charge de l'analyse des deux premières missions spatiales de retour d'échantillons depuis Apollo. Genesis a ramené des cibles irradiées par le vent solaire, et Stardust a ramené des grains cométaires. Fort du soutien du CNES, du CNRS, de la Région Lorraine, et des communautés locales, le CRPG a mis en service une facilité destinée à manipuler des échantillons extraterrestres micrométriques (3 nouvelles salles dont une salle blanche classe 1000), et une plate-forme analytique gaz rares (laser UV et deux nouveaux spectromètres de masse multi-collection).

Le CRPG est également le porteur d'une «plate-forme nationale d'analyse de la matière extraterrestre», mise en réseau de facilités analytiques à l'IPGP, au Muséum National d'Histoire Naturelle, à l'ENS Lyon et au CRPG.

Du point de vue personnel, le recrutement de Jérôme Aléon en CR2 ne s'est pas concrétisé puisque ce chercheur a demandé sa mutation au CNSM à Orsay au retour d'une année sabbatique aux USA. Le groupe s'est enrichi du rattachement de François Marini, MC à l'ENSG, pétrologue de micro-objets terrestres et extraterrestres. Guillaume Caro vient d'être recruté comme CR2 au CNRS, avec des projets de recherche concernant la Terre ancienne.

## RELIEF - EROSION - CLIMAT

Ce thème explore les processus modelant la surface de notre planète et pouvant contrôler les variations climatiques et les grands cycles géochimiques. Les chercheurs du CRPG ont travaillé en particulier dans deux zones ateliers, le système himalayen d'une part, et le point chaud éthiopien d'autre part. Ces deux systèmes représentent sans doute les meilleurs objets pour étudier les interactions relief-érosion-climat dans deux contextes contrastés, collision crustale d'une part, et altération de trapps basaltiques d'autre part. Des enjeux sociétaux importants sous-tendent ces études, tels que l'origine des éléments dans les eaux souterraines au Bangladesh, ou la caractérisation de l'intensification de l'activité anthropique et de la désertification.

Les chercheurs du thème ont réalisé des premières dans les domaines suivants :

- Détermination des flux et mécanismes de transfert croûte - océan-atmosphère dans le cas de l'érosion himalayenne, avec notamment la mise en évidence par les isotopes de l'osmium du rôle des eaux souterraines d'une part, et du rôle des manifestations hydrothermales népalaises comme source majeure de CO<sub>2</sub> atmosphérique d'autre part,

- Bilan complet et global de la séquestration du CO<sub>2</sub> par l'enfouissement de matière organique délivrée par le système Gange-Brahmapoutre,

- Quantification du flux particulière dans le Gange grâce à une expérience originale. Les chercheurs ont démontré que, dans le cas du Gange, l'érosion chimique n'est pas à l'état stationnaire, le déséquilibre étant induit par l'activité anthropique récente,

- Datation du rifting en Ethiopie par thermo-chronologie U+Th/He; mettant en évidence le découplage entre arrivée du point chaud, bombe crustal et rifting périphérique,

- Quantification de l'érosion du plateau éthiopien par couplage isotopes cosmogéniques-modélisation,

- Développement d'un nouveau paléo-altimètre couplant les isotopes cosmogéniques et la datation absolue de laves,

- Quantification des fractionnements isotopiques du lithium et du magnésium en laboratoire ou sur des systèmes naturels types, comme traceurs de l'érosion et de variations climatiques passées,

- Développement de l'analyse in situ des isotopes de Li et de Ca par sonde ionique dans des coraux pour déterminer les rôles respectifs de l'environnement et de la biominéralisation lors de la croissance,

- Développement de nouveaux traceurs isotopiques des variations climatiques passées, tels que l'analyse moléculaire du rapport isotopique D/H, le couplage avec la datation <sup>14</sup>C, et l'utilisation de <sup>3</sup>He cosmogénique pour établir la chronologie de déglaciation depuis le LGM, en Himalaya et dans le Pacifique central. Cette dernière étude suggère un système océan-atmosphère connecté entre Pacifique et Atlantique nord durant l'Holocène.

Les actions ont bénéficié de plusieurs soutiens ANR, Région Lorraine, et, *pro-parte*, de la mise en service de la plate forme gaz rares pour le dosage d'isotopes cosmogéniques.

## GÉODYNAMIQUE : COUPLAGES ENTRE PROCESSUS SUPERFICIELS ET PROFONDS

Ce thème très interdisciplinaire était focalisé sur les interactions entre déformation/thermicité de la croûte et dynamique profonde. Il comportait 4 volets : initiation du rifting, modélisation numérique des objets géologiques, subduction-exhumation et processus magmatiques. Ce thème a, en particulier, bénéficié d'une nouvelle synergie entre l'équipe développant le modèleur gOcad et les autres communautés du thème. Cette approche expérimentale, de terrain et de modélisation a permis les avancées suivantes.

Des avancées importantes ont été effectuées par l'équipe développant gOcad dans la modélisation de la fracturation, la prise en compte de la chronologie dans les modèles stratigraphiques et la gestion des incertitudes. Un ingénieur de recherche, malheureusement sur le départ, a joué un rôle clé dans l'application de gOcad à la modé-

lisation des structures et des gisements.

L'étude géodynamique de la zone la plus sismogénique d'Europe, le golfe de Corinthe, a permis de préciser la chronologie et l'évolution du rifting. Soutenue par plusieurs programmes nationaux et européens, les structures ont été modélisées en 3D sous gOcad.

Un chercheur du centre a participé à l'étude tomographique de la dorsale Pacifique Est par une équipe américaine, qui a permis de montrer le rôle actif du manteau durant le rifting, et de préciser les relations entre chambres magmatiques, rifting, et hydrothermalisme;

Une activité nouvelle visant à étudier les relations entre fluides et séismes à l'échelle régionale (séisme de Remiremont) a été initiée avec un soutien de la Région Lorraine.

Les relations entre morphologie magmatique et processus de croissance cristalline ont été explorées dans le cas de l'olivine, permettant de mieux comprendre l'origine de la structure spinifex des olivines.

L'étude de complexes lités a permis de mettre en évidence l'interaction entre processus pétrologiques et mécaniques (sédimentation, mélanges de magmas, rôle de la diffusion des cations).

Le comportement des éléments volatils, notamment des gaz rares, dans la genèse et l'évolution du magmatisme carbonatitique a été étudié expérimentalement (partage de He et Ar entre silicates liquides et carbonates) et analytiquement (échantillonnage de gaz lors d'une éruption de carbonatite au volcan Ol Donyo Lengai en Juillet 2005).

L'origine des concentrations métallifères d'intérêt économique (Bushveld en Afrique du Sud, gisement d'argent d'Imiter au Maroc, magmatisme adakitique de Quérétaro au Mexique) et la chro-

nologie de minéralisations ont été explorées en utilisant notamment la datation U-Pb par sonde ionique et le traçage isotopique Re-Os. Les données de terrain et de laboratoire ont permis de construire un modèle métallogénique original comme aide à l'exploration, que vient compléter la modélisation gOcad.

Le rôle du métamorphisme et des transferts lors de la subduction et de l'exhumation a été exploré grâce au développement de nouveaux traceurs chimiques et isotopiques : fractionnement de Li et B enregistré dans les éclogites de Dabie Shan, identification des contributions respectives du manteau et de la croûte par les isotopes stables analysés par sonde ionique dans la cas du magmatisme antillais, calage chronologique de l'exhumation de roches métamorphiques à Naxos, Grèce. Cette dernière étude a nécessité le développement d'une nouvelle approche thermochronologique pour les minéraux métarmorphiques avec les systèmes U-Pb, Lu-Hf et Sm-Nd.

## ACTIVITÉS ANTHROPIQUES ET VALORISATION

Ce thème avait pour ambition d'être l'interface entre recherche amont et valorisation sociétale, économique et industrielle. L'idée était de faire profiter la société de nos avancées dans la caractérisation des objets naturels et l'analyse isotopique. Trois actions phare ont été accomplies.

- Le traçage isotopique de la dispersion des polluants dans la géosphère et l'atmosphère a été abordé, notamment en développant la géochimie isotopique du mercure. Les fractionnements dépendant, et ne dépendant pas, de la masse ont été mesurés lors d'expériences de volatilisation-condensation. Le CRPG a également étudié expérimentalement l'altération des matrices de stockage, et le traçage géochimique des circulations dans la zone du laboratoire souterrain de l'ANDRA à Bure.

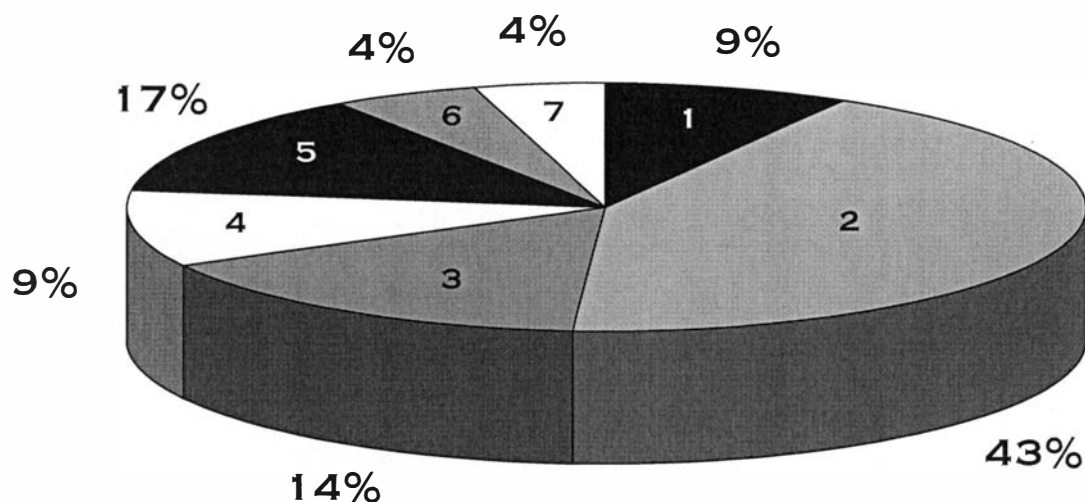
- Nous avons contribué par notre approche isotopique à la zone atelier Moselle (ZAM), programme interdisciplinaire visant à mieux com-

prendre le fonctionnement d'une rivière majeure et régionalement vitale. Nos actions ont consisté en la caractérisation chimique des fonctions entrantes, les variations du système en réponse aux conditions climatiques, et le développement de nouveaux traceurs d'origine et d'altération comme les isotopes du Mg, du Li et du Hf.

- Dans le domaine de la gemnologie, les chercheurs ont continué à développer leur expertise dans la caractérisation pétrologique, physico-chimique, et isotopique de l'origine des fluides et des processus de formation des corindons (rubis et saphirs Asie du Sud-Est, Madagascar) et des émeraudes (Colombie et Brésil). Ces études, menées en partenariat avec des industriels et le ministère des Affaires Étrangères, ont permis de développer des nouvelles méthodes de caractérisation basées sur la composition isotopique de O et sur la mesure couplée Raman-microscopie infrarouge.

## PUBLICATIONS

Entre Janvier 2004 et Septembre 2007, les chercheurs du CRPG ont publié 300 articles, 208 de rang A1, 11 de rang A2, 42 de rang A3, 20 de rang B et 19 chapitres d'ouvrages selon le système des quartiles utilisé par la section 18 du comité national du CNRS (indice de citation > 1,6 pour A1, entre 1 et 1,6 pour A2; entre 0,6 et 1 pour A3 et inférieur à 0,6 pour B). Il est à noter que 18 contributions ont été publiées dans les revues Science et Nature. Le taux de publication moyen par équivalent temps plein (ETP, chercheur = 1 ETP, Enseignant chercheur et IR = 0,5 ETP) est de 3,06 publ./an.ETP. Pour comparaison, durant le précédent quadriennal, le nombre de Nature-Science était de 9 et le taux de publication de 2,1 publ./an.ETP.



**1** NATURE (11), SCIENCE (7), GEOLOGY (4)

**2** GÉOCHIMIE (112) :

ANAL. BIOANAL. CHEM. (2), ANAL. CHIM. ACTA (1), APPL. GEOCHEM. (2), CHEM. DER ERDE (1), CHEM. GEOL (20), EARTH PLANET. SCI. LETT. (35), GEOCHEM. J. (3), GEOCHIM. COSMOCHIM. ACTA (30), GEOSTAND. GEOANAL. RES. (11), METEORITICS & PLANET. SCI. (7).

**3** PÉTROLOGIE (37) :

AMER. MINERAL. (5), CAN. MINERAL. (5), CONTRIB. MINERAL. PETROL. (6), EUR. J. MINERAL. (1), GEOCHEM. GEOPHYS. GEOSYST. G3 (8), J. METAM. GEOL. (1), J. NON CRIST. SOLIDS (2), J. PETROL. (3), J. VOLC. GEOTHERM. RES. (2), LITHOS (3), MINERAL. MAG. (1)

**4** GÉOLOGIE STRUCTURALE ET GÉOLOGIE ÉCONOMIQUE (24) :

APPL. SPECTR. (1), BASIN RES. (2), ECON. GEOL. (3), GEODIN. ACTA (2), GEOL. SOC. LONDON SPE. PUB. (1), J. PETROL. SC. ENG. (1), J. STRUCT. GEOL. (1), MINER. DEPOS. (6), ORE GEOL. REV. (2), PETROL. GEOSC. (1), TECTONOPHYSICS(4).

**5** GÉOLOGIE GÉNÉRALE, GÉOPHYSIQUE ET MODÉLISATION (44) :

BULL. SOC. GÉOL. FR. (3), CAN. J. EARTH SC. (1), CHINESE SC. BULL. (3), COMPUTER GÉOSCI. (2), C. R. GÉOSC. (12), GEOPHYS. RES. LETT.(2), INT. J. EARTH SC. (5), J. AFR. EARTH SC. (9), J. GEOPHYS. RES. (2), MATH. GEOL. (2), PRECAMBRIAN RES. (3).

**6** ENVIRONNEMENT (11) :

ATMOS. ENV. (2), BIOGEOSCI. (1), ENVIRON. SCI. TECHNOL. (6), GEOFLUID (1), GLOBAL BIOGEOCH. CYCLE (1).

**7** DIVERS (11) :

ASTROPHYS. J. (2), EUR. J. SOIL SC. (2), GEOCHRON. (1), ICARUS (1), J. ANAL. ATOM. SPECTRO. (1), PHYTOCHEMISTRY (1), QUATERN GEOCHRON. (2), QUATERN. SC. REV (1).

**Répartition des publications A1, A2, A3 du CRPG pour la période 2004 - 10/2007 (261 au total référencées par ISI Web of Science). Le nombre, entre parenthèses suivant le titre des revues, indique la quantité d'articles parus.**

## PRIX ET DISTINCTIONS

2004

**Jean-Laurent Mallet** : Mathematical Geology, Best Paper Award.  
Grand Prix Dolomieu de l'Académie des Sciences

2005

**Nicolas Dauphas** : Prix Alfred O'Nier décerné par la Meteoritical Society pour ses travaux de thèse.

**Jean-Laurent Mallet** : Prix Marcel Roubault de l'Union Française des Géologues.

2006

**Christian France-Lanord** : Prix Georges Millot de l'Académie des Sciences.

**Jean-Laurent Mallet** : AAPG Distinguished Lecturer.

**Tobias Frank** : Prix Nicolaus-Joachim Lehmann attribué par la Saxonian Confederation of Information Technologies pour ses travaux de doctorat.

2007

**Marc Chaussidon** : Geochemistry Fellow de la Geochemical Society.  
Geochemistry Fellow de l'European Association for Geochemistry

**Valier Galy** : Prix de thèse de l'INPL

**Gilles Levrèsse** : Prix SGA (Society for Geology Applied to Mineral Deposits) - Barrick Young Scientist Award pour ces travaux de thèse effectuée au CRPG dans le domaine de la métallogénie.

**Bernard Marty** : Fellow 2007 de l'American Geophysical Union.

**Alice Toppani** : prix du meilleur article écrit par un étudiant en 2006, décerné conjointement par la Meteoritical Society and the Geological Society of America, Division of Planetary Geology.

## LE BUDGET DU CRPG

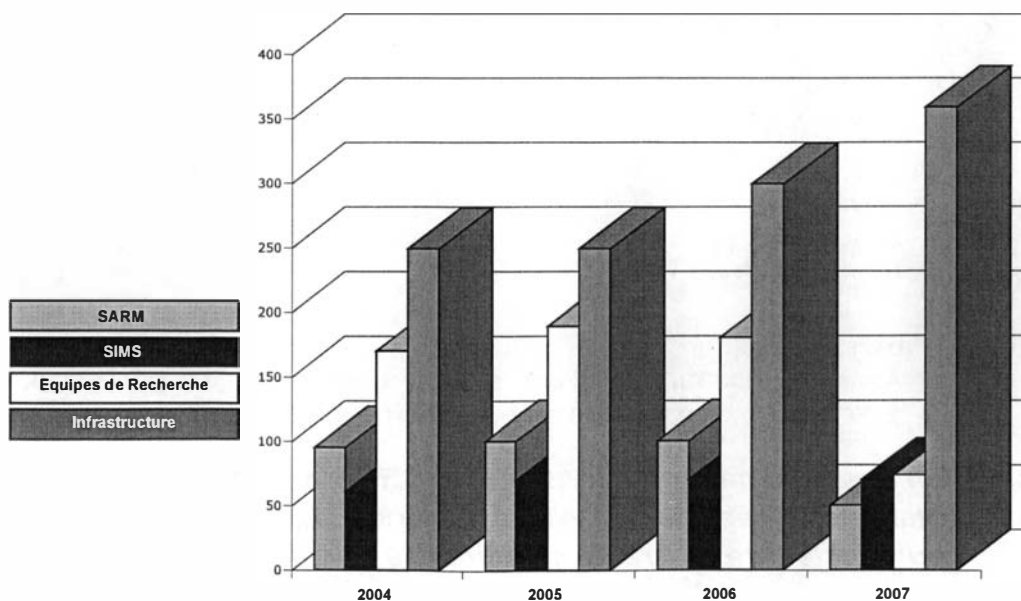
### Répartition de la dotation CNRS/INSU

575 k€

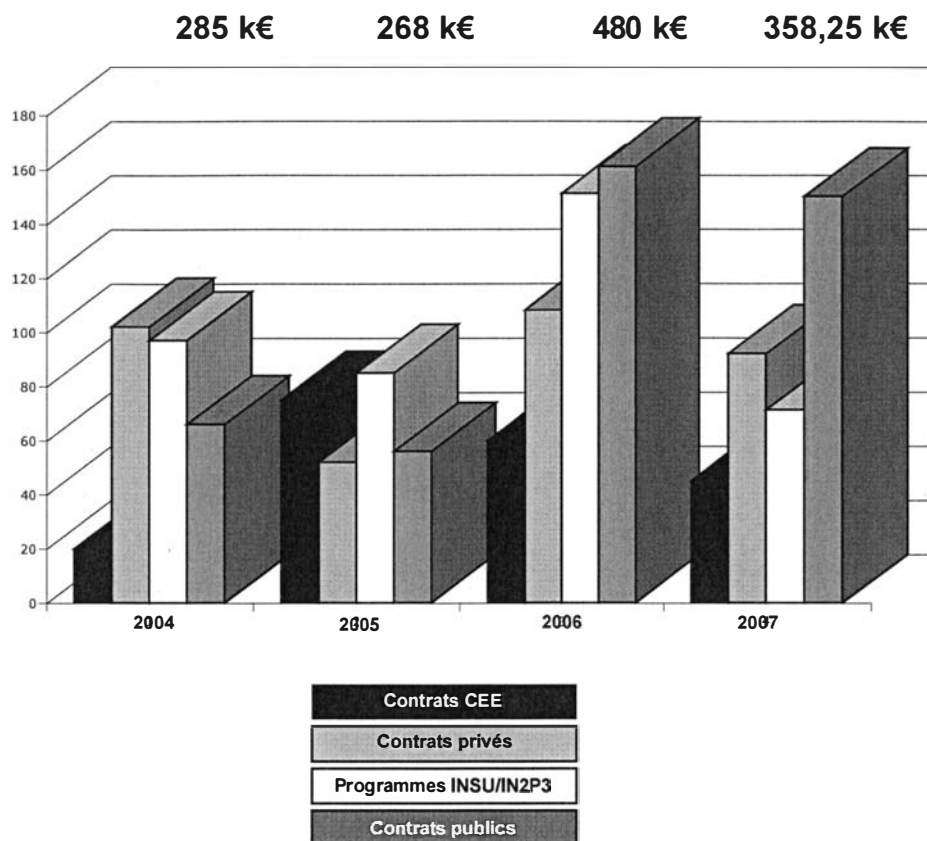
608 k€

649 k€

523 k€



## Les contrats de recherche du CRPG



## LA VIE INTERNE DU LABORATOIRE

### ORGANISATION

Le Conseil de Laboratoire, réuni en moyenne tous les deux mois, est informé, discute et vote, le cas échéant, les décisions du centre sur des sujets aussi variés que l'équipement ou la politique de recrutement. Il donne son avis sur tous les sujets définis dans le statut de cette instance.

Le directeur s'appuie sur un comité de direction composé des chefs d'équipe, des responsables des service SARM et Sonde Ionique, du responsable du service général et de la secrétaire de direction. Ce comité qui se réunit toutes les semaines ouvrables et hors congrès conseille le directeur dans les domaines concernant la gestion du centre, l'animation et les actions prospectives. Cette façon de fonctionner permet de faire passer les informations dans les deux sens sans délai et d'agir rapidement.

### ANIMATION SCIENTIFIQUE

#### Locale

Le CRPG a deux cycles de séminaires ouverts à toute la communauté scientifique de Nancy. La liste des intervenants est donnée pour 2006-07 sur le site :

<http://www.cprg.cnrs-nancy.fr/NEWS/Seminaires/seminaires.html>

Séminaires internes : Une présentation informelle (30 - 40 minutes) sur la recherche, la bibliographie, ou la technique le lundi entre 13h et 14h. Les intervenants sont les chercheurs, les post-docs et les étudiants du CRPG,

Séminaires externes : Conférence présentée le Jeudi entre 14h et 15h par un chercheur invité, un post-doc, un visiteur...

Des séminaires informels sont également organisés par les chercheurs notamment du thème REC et dans une moindre mesure du thème Cosmochimie-Planétologie.

Lors des réunions bimensuelles, ouvertes au plus large public, organisées par le groupe 'sondes ioni-



ques' sont présentés l'avancement des projets de recherche des étudiants et des chercheurs ainsi que les développements techniques en cours.

### Nationale

Le CRPG a organisé quatre réunions nationales :

La Commission Spécialisée des Sciences de la Terre (CSST) s'est réuni dans le centre en octobre 2005.

Le colloque quadriennal du Programme National de Planétologie (PNP) a réuni à Nancy du 10 au 12 Septembre 2006, 180 personnes représentant l'ensemble de la communauté de Géosciences, d'astronomie et d'astrophysique travaillant sur le système solaire.

<http://www.crbg.cnrs-nancy.fr/NEWS/PNP2006/index.html>

Un atelier intitulé «Les inclusions magmatiques», initié par l'équipe Pétrologie, ayant impliqué une soixantaine de spécialistes français en décembre 2006.

Un atelier intitulé «le Rift de Corinthe» en forme de bilan/prospective du programme INSU en Juin 2007.

## FORMATION

Le CRPG est conventionné avec l'UHP depuis 2003 et avec l'INPL depuis 2001. Il héberge 15 enseignants chercheurs, dont 4 de l'Université Henri Poincaré (UHP) et 11 de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL). A l'INPL, 1 enseignant chercheur est rattaché à L'Ecole des Mines de Nancy et 10 le sont à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie. En outre, le personnel du CRPG hors enseignant chercheur (chercheurs, ingénieurs de recherche, moniteurs, thésitifs) effectue l'équivalent de 3 services complets d'enseignant chercheur, contribuant de façon significative à la formation des élèves de l'ENSG. Le CRPG, par son intégration à l'Ecole Doctorale RPE (Ressources, Produits, Procédés et Environnement) est le laboratoire de rattachement d'environ 30 thésitifs et il accueille en moyenne 25-30 élèves ingénieurs de l'ENSG pour des stages de 2<sup>ème</sup> année et de 3<sup>ème</sup> année.

Le centre a accueilli environ 10 étudiants par an inscrits au DEA «Physique et Chimie de la Terre» et accueille maintenant en moyenne 8 par an étudiants inscrits au Master 2 «Géosciences et Génie Civil»

Dans le cadre du Master Cosmochimie Nantes-Nancy, le CRPG accueille la semaine «Planétologie» consistant en un cycle de conférences données par d'éminents spécialistes à l'intention des étudiants inscrits à cette formation mais également pour les agents du CRPG.

Le CRPG accueille systématiquement les étudiants de 1<sup>ère</sup> année de l'ENSG et de l'Ecole des Mines pour une présentation globale du laboratoire ainsi que pour une visite des instruments remarquables. Les étudiants de troisième année de licence de l'UHP-Nancy 1, dans le cadre d'un module intitulé «acquisition et traitement des données isotopiques», visitent les laboratoires équipés d'instruments de géochimie tels que sondes ioniques, spectromètres de masse ou MC-ICP-MS.

Chaque année, le CRPG accueille 5 ou 6 collégiens de 4<sup>ème</sup> ou de 3<sup>ème</sup> pour leur stage de découverte de la vie en entreprise.

## ATTRACTIVITÉ DU CRPG

De par sa politique de communication vers le public le plus large, se traduisant par des expositions et de fréquents articles dans la presse quotidienne régionale, à la radio ou sur les chaînes de télévision locales, le CRPG est considéré comme une des vitrines de la recherche de pointe sur Nancy. C'est ainsi que nous avons souvent des demandes de visites émanant d'organismes divers voulant montrer à leurs personnels une facette de ce qui se fait en recherche fondamentale avancée. Durant le dernier quadriennal, nous avons organisé sur des demie-journées des visites pour le personnel de la Délégation Centre-Est, qui depuis 2004 est notre voisin direct, pour l'ADUAN (Agence de Développement et d'Urbanisme de l'Agglomération Nancéenne) et chaque année pour les nouveaux entrants de l'INPL.

Lors de la venue à Nancy de personnalités importantes au niveau national, le service de direction de la Délégation Régionale Centre Est nous propose d'organiser des visites orientées sur les dernières découvertes remarquables issues du centre. C'est ainsi que nous avons eu l'honneur d'accueillir :

Bernard Larroutrou (Directeur Général du CNRS),

Arnold Migus (Directeur Général du CNRS),

Alain Resplandy-Bernard (Secrétaire Général du CNRS),

Arnaud Benedetti (Directeur de la Communication du CNRS) et

Jacqueline Lecourtier (Directrice de l'ANR).

## RESSOURCES HUMAINES

Le CRPG compte 26 chercheurs et enseignants-chercheurs pour 42 ITA. Le rapport ITA/chercheur apparaît très élevé mais doit être corrigé des services nationaux. Il est de 1 si l'on considère uniquement la partie recherche du centre et se justifie en particulier par l'importance du parc instrumental. Les flux de chercheurs et ITA durant le précédent quadriennal sont présentés sur les tableaux suivants.

### MOUVEMENTS DES CHERCHEURS AU CRPG PÉRIODE 2004 – 2007

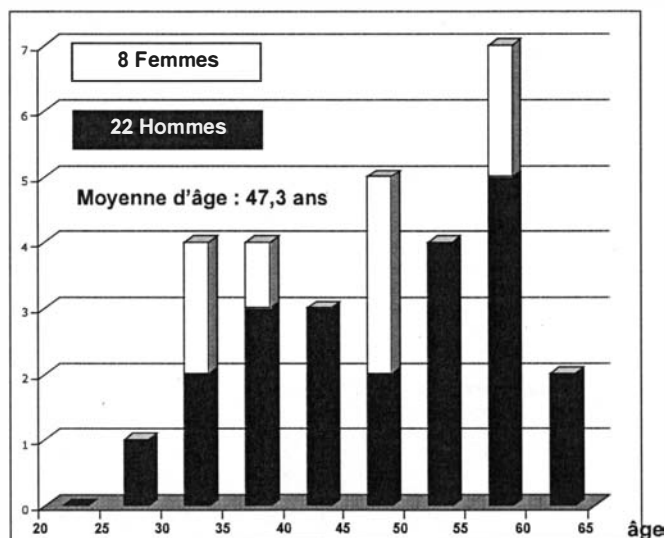
#### ARRIVÉES

**Guillaume CAUMON**  
(2004, MC ENSG/INPL, Géodynamique)  
**Sylvain BOURLANGE**  
(2004, MC ENSG/INPL, Géodynamique)  
**Fabien PALHOL**  
(2005, MC ENSG/INPL, Géochimie)  
**François FAURE**  
(2005, MC UHP Nancy1, Pétrologie)  
**Pauline COLLON-DROUILLET**  
(2007, MC ENSG/INPL, Géodynamique)  
**Jérôme LAVÉ**  
(2007, CR1, Mutation LGCA, Géodynamique)  
**Guillaume CARO**  
(2008, CR2 CNRS, Géochimie)

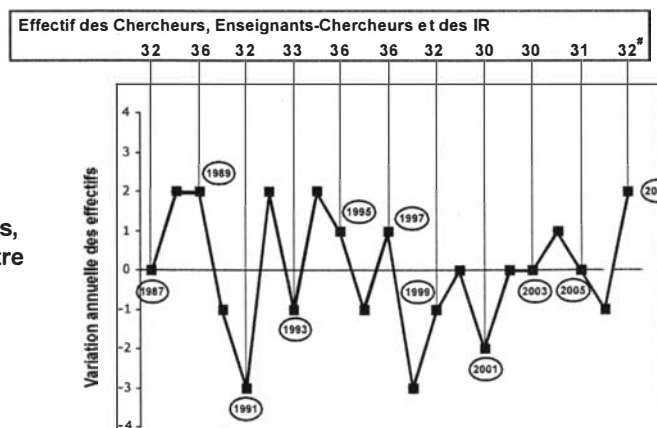
#### DÉPARTS

**Mike TOPLIS**  
(Mutation, 2004, CR1 CNRS, Pétrologie)  
**Alain PLOQUIN**  
(Retraite, 2005, CR1 CNRS, Pétrologie)  
**Jérôme ALÉON**  
(Mutation 2006, CR2 CNRS, Géochimie)  
**Jean-Laurent MALLET**  
(Retraite, 2006, PR1 ENSG/INPL, Géodynamique)

Répartition des âges pour les Chercheurs, Enseignants-Chercheurs et les IR



Evolution de l'effectif des Chercheurs, Enseignants-Chercheurs et les IR entre 1987 et 2007



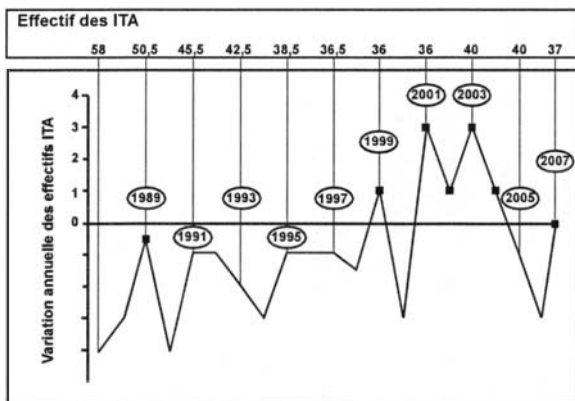
**MOUVEMENTS DES PERSONNELS ITA AU CRPG  
PÉRIODE 2004 – 2007**

**ARRIVÉES**

**Laurent TISSANDIER**  
(2004, IE2, Expérimentation)  
**Julien MEYER**  
(2004, TCN, SARM)  
**Julien DUBOIS**  
(2005, AI, Electronique)  
**Aurélie DIDOT**  
(2005, T-CDD puis 2006 T-CNRS, Secrétariat)  
**Nordine BOUDEN**  
(2005, TCN, Service Général)  
**Pierre-Yves MARTIN**  
(2006, AI, SARM)  
**Odile ANDRÉ**  
(2006, de CDD CNRS à AJT-CNRS,  
Comptabilité)  
**Nathalie PAVESIO**  
(2007, CDD INPL, Secrétariat)  
**Christophe CLOQUET**  
(2007, CDD CNRS, SARM)

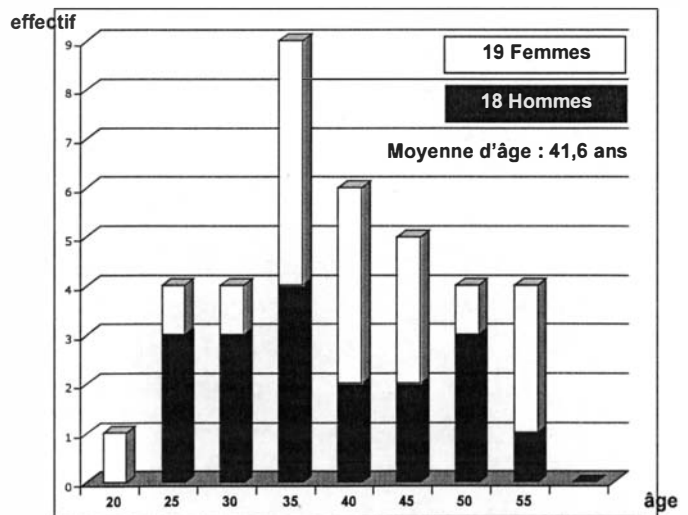
**DÉPARTS**

**Jean-Claude DEMANGE**  
(Retraite, 2004, IE, Service Général)  
**Marie-Thérèse NOËL**  
(Mutation, 2005, T, SARM)  
**Christiane RAIGUÉ**  
(Retraite, 2005, T, SARM)  
**Pascal ROBERT**  
(Mutation, 2005, IE2, Electronique)  
**Valérie SOURLIER**  
(Mutation, 2005, TCN, Secrétariat)  
**Danièle DOLE**  
(Retraite, 2006, AI, SARM)  
**Jacques MOREL**  
(Retraite, 2006, IE1, SARM)  
**Jean-Marie PORTAL**  
(Retraite, 2006, IR, SARM)  
**Christian Le CARLIER de VESLUD**  
(Mutation, 2007, IR, Géodynamique)  
**Raphaëlle LECLERC**  
(Mutation, 2007, T, SARM)



Evolution de l'effectif des ITA entre 1987 et 2007

**Répartition des âges pour les ITA autres que IR**



**FESTIVITÉS**

Chaque année, les nouveaux entrants sont présentés à l'ensemble du personnel du laboratoire lors d'une cérémonie organisée autour d'un buffet festif. Depuis deux ans et à l'occasion de cette cérémonie, est reprise l'idée d'une présentation touristique-géologique des missions exotiques menées dans l'année par les chercheurs du centre.

Chaque printemps voit se dérouler le tournoi de pétanque du CRPG qui regroupe environ 120 participants répartis en triplètes tirées au sort. La finale qui se déroule systématiquement un vendredi soir de la fin juin est suivie d'un méchoui auquel participe généralement une centaine de personnes.

## EQUIPEMENT

### GAZ RARES

Le laboratoire d'analyse des gaz rares a connu un développement important lors de ces derniers quatre ans. L'installation dans de nouveaux locaux, celle de nouveaux spectromètres de masse ainsi que la réorganisation de la recherche autour d'une équipe étendue a permis de donner une dimension nouvelle à la géochimie des gaz rares au CRPG. Les domaines d'application sont la cosmochimie, la géodynamique à l'Hadéen, le traçage des sources mantelliques et des flux manteau-surface, la quantification des taux d'érosion et d'exhumation des orogènes, et les changements anthropiques récents de l'environnement.

L'opération phare a été l'installation d'un spectromètre de masse penta-collection (Helix, GV instruments), le premier du genre, capable de mesurer en multicollecion, et avec une résolution de masse > 1600, la plupart des gaz rares et l'azote. Cette avancée technologique, basée sur la mise au point de collecteurs doubles mobiles (cage + multiplicateur d'électron sur le même support) par la firme GV instruments est en cours de validation dans notre laboratoire. Le but est d'atteindre une précision analytique de l'ordre du pour mille sur les rapports isotopiques de gaz rares, ce qui permettra d'aborder de nouveaux champs disciplinaires comme cela a été fait il y a quelques années pour d'autres types d'analyseurs en géochimie isotopique. En parallèle, le laboratoire a développé un laser UV (196 nm) pour ablater les cibles irradiées par le vent solaire durant 28 mois lors de la mission Genesis, ainsi qu'une nouvelle ligne automatisée dédiée à l'analyse des micro-quantités de gaz dans des conditions de blanc extrêmes, de façon à pouvoir mesurer les compositions isotopiques des échantillons extra-terrestres revenus à l'issue des missions «Genesis» et «Stardust». Grâce à ces équipements co-financés par le CNRS, le CNES et la région lorraine, notre laboratoire, sélectionné pour ces analyses historiques, a analysé pour la première fois la composition des gaz rares dans de la matière cométaire, ainsi que la composition isotopique de l'azote du vent solaire.

En parallèle de ces développements pionniers

nous avons aussi voulu conforter un des piliers de la géochimie des gaz rares qui est la mesure des rapports isotopiques de l'hélium. Ces isotopes étant des traceurs indispensables pour les études portant sur les sources mantelliques et crustales, ainsi que pour la chronologie de surface basée sur les isotopes produits par les rayons cosmiques, nous avons développé avec la firme GV un nouveau type de spectromètre de masse à double collection et fonctionnant en mode statique, destiné à la mesure du rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$ . Le laboratoire a reçu le tube de vol, l'aimant et la source, et a procédé au montage de ce prototype (collection, électronique, châssis, acquisition et traitement des données). L'analyseur est opérationnel et utilisé en routine pour la mesure de  $^3\text{He}$  cosmogénique, dans le cadre d'un programme européen de quantification des isotopes cosmogéniques. Les développements en cours de réalisation sur ce spectromètre concernent l'analyse des micro-variations du rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  de l'air, de façon à tracer l'augmentation de la contribution anthropique via la combustion d'énergies fossiles et vont constituer une des actions phares du prochain quadriennal.

L'activité autour des équipements plus anciens du laboratoire a été conduite dans le cadre de plusieurs travaux doctoraux et post-doctoraux du CRPG, ou en collaboration avec d'autres laboratoires, notamment dans les domaines de : la thermochronologie (U-Th)/He, des isotopes cosmogéniques, ou encore des traceurs isotopiques pour contraindre l'évolution du système solaire et du manteau terrestre.

L'équipe originale des gaz rares (Pr, CR1, IE) a bénéficié de l'arrivée de Peter Burnard (IR1 CNRS) et de Bouchaïb Tibari (Technicien INPL) qui sont venus en complément de l'équipe précédente en Septembre 2003. Cet apport essentiel a ainsi permis de réaliser l'implantation des nouveaux équipements et l'élargissement de nos champs d'investigation à tous les domaines des géosciences et des sciences de l'environnement.

### ISOPROBE-TIMS

Pendant la période 2004 à 2007, une jouvence importante du spectromètre de masse à thermionisation Finnigan MAT 262 a été réalisée. La première phase (2004), financée à 50% par le programme équipements mi-lourds de l'INSU, comprenait l'achat de nouveau matériel informatique et du logiciel de pilotage «RunIt» de la société Spectromat. L'installation de ce logiciel a largement amélioré la souplesse du contrôle de l'instrument et permis la sauvegarde automatique des

données. La deuxième phase (2007), co-financée par la Région Lorraine et l'Etat, a permis le remplacement des cages de Faraday vieillissantes et la remise à niveau de la source du spectromètre. Cette jouvence a permis une nette amélioration à la fois de l'efficacité et de la reproductibilité des analyses.

L'autre développement significatif réalisé pendant cette période concerne la préparation chimique des échantillons avant leur analyse iso-

topique. Il s'agit de l'achat d'un minéralisateur à haute pression (l'HPA-S de la société Anton Paar), financé en grande partie par le CRPG mais également par nos collaborateurs au G2R de Nancy et au MNHN de Paris. Cet appareil permet la mise en solution d'échantillons à haute température (jusqu'à 300 °C) et, en conséquence, une dissolution plus complète, plus rapide, et plus propre. Cet appareillage moderne permet de réaliser les mises en solution dans des conditions de sécurité nettement meilleures qu'avec notre ancienne méthode de digestion (dissolution en tubes de verre borosilicaté scellés). Depuis son installation en mars 2007 cet appareil a fonctionné en quasi-continuité, et a notamment permis le développement d'une technique pour l'analyse isotopique d'osmium des eaux souterraines, jusqu'à alors impossible.

Durant cette période 2004-2007, de nouveaux développements analytiques ont été entrepris sur le MC-ICPMS (Isoprobe, GV Instruments), notamment les mesures isotopiques du Fer sur des projets cosmochimie-expérimentation et Terre primitive, avec l'utilisation du système «soft extraction» pour s'affranchir des interférences d'ArOH, les mesures isotopiques de l'Hf pour l'étude des déséquilibres isotopiques de l'Hf lors du métamorphisme éclogitique, les mesures isotopiques du Zn et du Cd appliquées au traçage de la pollution par les métaux ainsi que les mesures isotopiques du Mg, appliquées au traçage du cycle de l'érosion continentale et du rôle de la

végétation (projet ZAM). Après 2 ans d'absence, les mesures isotopiques du sélénium couplés à un système de génération d'hydrures ont été de nouveau effectuées sur des projets de collaboration France-Chine portant sur l'étude du Se et d'autres métaux dans les shales noirs. Nous démarrons actuellement le développement de l'analyse des isotopes stables du molybdène.

Deux pannes majeures concernant des problèmes de surchauffe au niveau de l'interface cônes-hexapôle (novembre 2004- mars 2005 ), et le générateur de puissance (septembre 2006 - Mars 2007) ont provoquées plusieurs mois d'arrêt de l'appareil, et un retard dans l'acquisition des données et l'avancement des projets. Une demande de crédits mi-lourds INSU et région Lorraine pour une mise à niveau de l'appareil concernant l'installation d'une pompe de grande capacité au niveau de l'interface (pompe S) associé à une nouvelle configuration de cônes, ainsi qu'un remplacement du boîtier source maintenant très corrodé après 8 ans d'utilisation, a été accepté à la hauteur de 39 K€ (18 K€ de l'INSU et 21 K€ de la Région Lorraine). Cette opération devrait être effectuée avant la fin de l'année 2007. Ces améliorations permettront d'obtenir un meilleur vide au niveau de l'interface, et donc une meilleure transmission des ions et stabilité des mesures isotopiques. Cette opération sera transitoire, mais nécessaire, avant la jouvence complète de notre MC-ICP-MS d'ici quelques années.

## LES SONDES IONIQUES

Les développements relatifs aux deux sondes ioniques sont détaillés plus loin dans ce rapport dans le chapitre 'Services'.

La sonde IMS 3f a nécessité un remplacement quasi total de la partie 'Haute tension primaire'. Cette opération s'est avérée compliquée de par la vétusté des cartes de contrôle de l'instrument (elles datent de 1984 !) qui ne sont guère compatibles avec la plupart des composants actuellement disponibles sur le marché. Cette machine nous permet néanmoins de traiter un certain nombre d'analyses en routine comme les compositions en Terres Rares de minéraux ou de verres silicatés, les concentrations ou compositions isotopiques d'éléments légers (Li, Be, B) dans certaines matrices silicatées ainsi que les concentrations en U, Th, Pb de minéraux uranifères en vue de datation des gisements.

La sonde IMS 1270 a bénéficié de quelques aménagements physiques concernant la colonne primaire et le porte-échantillon dans la chambre d'analyse et aussi informatiques comme une nouvelle version du logiciel de commande intégrant l'acquisition d'images en multi-collection. La société Caméca a complété l'installation de la lentille L1 de la source à oxygène (duoplasmatron), cela permet le contrôle de cette lentille depuis le pupitre de commande en intégrant son alimentation

aux châssis électroniques. Après quelques aléas dus à des pièces initialement défectueuses qui entraînaient des disjonctions de certaines alimentations, le mouvement en z associé au porte-échantillon a enfin été installé pour nous permettre de compenser les défauts de planéité et polissage des échantillons.

Les développements analytiques ont porté sur l'enrichissement de la collection de standards, ce qui nous permet de mesurer de nouveaux éléments et/ou isotopes dans des matrices encore non exploitées par notre groupe de recherche.

Les résultats scientifiques marquants durant ces quatre dernières années ont concernés principalement la cosmochimie et les environnements anciens et récents. Le retour de la mission Stardust de la Nasa a permis d'analyser les premiers grains cométaires. En parallèle aux analyses du vent solaire collecté par la mission Genesis, les sols lunaires récoltés par la dernière mission Apollo, ont livré sous le faisceau de la sonde 1270 la composition isotopique du vent solaire implanté à la surface des grains qui le constituent. Les développements récents s'intéressent également aux radioactivité éteintes ( $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$ ). Pour ce qui concerne la caractérisation des environnements, il est important de définir de nouveaux marqueurs des milieux considérés qui font

intervenir systématiquement des processus biogéniques (isotopes du Li dans les tests de foraminifères, altération bactérienne de la pyrite, matière carbonée biogénique des cherts archéens, ...). Toutes ces études ont abouties à la production de 45 publications (36 A1, 1 A3 et 8 chapitres d'ouvrage) dont 4 dans la revue Nature et 1 dans la revue Science.

La part de fonctionnement de la sonde IMS 1270 en service national atteint en moyenne 21% du temps total de mesures. Les projets abordés dans le cadre du service national peuvent être répartis sur plusieurs domaines scientifiques : 1) la dynamique de la croûte continentale (55% des projets dont 40% pour la géochronologie), 2) les processus secondaires en domaine sédimentaire (16%), 3) paléoenvironnements et biomarqueurs (15%), 4) la cosmochimie et la Terre primitive (14%). Pour la première fois nous produisons une liste des publications issues des projets déposés dans le cadre du service national, cela représente depuis 2001, 16 articles (13 A1 et 3 A3) dont 1 dans la revue Nature.

Chaque année le groupe 'Sondes Ioniques' produit un rapport d'activité présenté en janvier devant la commission des Grands Instruments Nationaux de l'INSU. Les rapports 2004, 2005, 2006 sont consultables pro parte sur le site Web du CRPG et sont en intégralité dans le CD joint à ce rapport.

Les développements analytiques majeurs prévus dans les quatre prochaines années concernent principalement l'analyse des micro-particules, les mesures de compositions isotopiques de Ca, Mg et Sr, et la mesure des métaux de transitions et des métaux lourds en trace. Devant la pression imposée par les chercheurs et étudiants du CRPG ainsi que par la communauté scientifique française dans le cadre du service national, il a été décidé de constituer un dossier de demande d'une sonde ionique de nouvelle génération à très haute résolution de masse. Ce projet est détaillé dans le chapitre 'Prospectives' de ce rapport d'activité et est donné en intégralité dans le CD joint au rapport.

## EXPERIMENTATION

### Les platines chauffantes

L'étude des mécanismes de cristallisation et/ou de dissolution nécessite la réalisation de nombreuses expériences coûteuses en temps. Pour y remédier, deux platines chauffantes sont désormais disponibles au laboratoire d'expérimentation du CRPG. Le grand intérêt de ces appareils est la possibilité de les placer directement sous un microscope et d'observer et de photographier et/ou filmer le déroulement des expériences. La première de technologie russe, mise en service voici une quinzaine d'années par A. Gurenko, a été remise en fonctionnement récemment. Elle permet des montées en température (jusqu'à 1600°C) et des trempes très rapides, mais est de maniement assez malaisé. La seconde, achetée en 2006 sur crédit PNP (porteur du projet F. Faure) et INPL (projet à risques G. Libourel), de marque Linkam, permet d'atteindre 1500°C, mais avec des rampes plus limitées (max 130°C/min). Elle possède toutefois un volume pour l'échantillon plus vaste et est assez simple d'utilisation.

L'utilisation de ces deux appareils couplée à celle des fours classiques déjà disponibles au CRPG devrait nous apporter de nombreux enseignements quant à la cinétique et aux mécanismes

régissant divers processus géologiques comme la cristallisation, la dissolution ou encore la carbonatation de divers matériaux.

### Les nébulotrons

Deux dispositifs de ce type sont actuellement en fonctionnement au CRPG. Dédiés à la simulation des conditions de la nébuleuse protosolaire, ces appareils permettent de chauffer ponctuellement à très haute température (>2500°C) et de condenser les espèces volatilisées. Ces expériences se font en contrôlant les différents paramètres expérimentaux (fO<sub>2</sub>, Température de condensation, pression totale, ...). Dans le nébulotron 4, un laser Nd-Yag produit le gaz à partir d'une cible vitreuse de composition connue. Il est particulièrement utilisé pour déterminer la minéralogie des phases condensées. Le nébulotron 5, en verre et silice, est lui plutôt dédié à l'étude des fractionnements isotopiques pouvant avoir lieu lors de réactions entre différentes espèces gazeuses. Ces dernières sont produites par chauffage d'une cible par un four à induction. Ces deux appareillages sont donc particulièrement adaptés à l'étude des premières étapes de formation du système solaire.

## ISOTOPES STABLES

Le laboratoire s'est développé sur les trois dernières années autour du nouveau spectromètre de masse GV-Isoprime et des couplages chromatographie en phase gazeuse (GC-MS) et analy-

seur élémentaire (EA-MS). Ces équipements ont introduit de nouvelles méthodes d'analyses tant en termes d'éléments et de phases analysés que de nombre d'échantillons analysés. Ceci touche

en particulier les systèmes suivants :

-  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{34}\text{S}$  des sulfates dissous des eaux continentales pour déterminer l'origine naturelle et/ou anthropiques des sulphates. Ces méthodes sont en particulier appliquées sur les programmes ZAM (Brenot *et al.* sous presse) , ECCO «Eaux urbaines» ou Reliefs (Calmels *et al.* sous presse).

-  $\delta\text{D}$  de l'eau. Le couplage EA-MS pour l'analyse de l'eau permet maintenant de réaliser en routine 40 à 50 analyses isotopiques/jour et donc d'entreprendre des études sur des séries temporelles lourdes. Cette approche a été appliquée sur des eaux de rivières sur différents systèmes : en Himalaya (Evans *et al.* 2004; Gajurel *et al.* 2006), sur la Moselle (thèses Brenot, Angéli et Bureau). Une méthode parallèle pour l'analyse isotopique de l'oxygène de l'eau est en cours de validation.

-  $\delta^{13}\text{C}$  et [C] de la matière organique. L'accent a été mis sur l'analyse de la matière organique particulière en faible concentration des sédiments de rivières (Galy *et al.*, sous presse a). Les applications portent sur l'exportation de carbone organique par des grands fleuves dans le cadre du programme Reliefs sur le système Gange-Brahmapoutre (Galy *et al.* sous presse a, b, c) et maintenant sur l'Amazone (thèse Bouchez).

-  $\delta\text{D}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  sur molécules organiques par couplage GC-MS. Ces développements ont permis l'analyse isotopique de molécules isolées par chromatographie en phase gazeuse que ce soit pour leurs compositions isotopiques d'hydrogène ou de

carbone. La première application sur l'hydrogène a permis de documenter les modes de synthèse de la matière organique de météorites (Remusat *et al.* 2006). Le  $\delta^{13}\text{C}$  a été utilisé sur des n-alkanes extraits de sédiments détritiques pour caractériser la provenance (marine ou continentale) de la matière organique ou son type photosynthétique (C3 ou C4) (Galy *et al.* sous presse).

Le laboratoire a également été complètement réaménagé dans de nouveaux locaux en 2006. Cette étape très utile a permis de progresser en matière de propreté et de stabilité en température du laboratoire ainsi que pour la sécurité et le confort des conditions de travail.

Les perspectives de développements à court terme portent sur la mise au point de l'analyse isotopique en flux continu de l'hydrogène et de la concentration en eau des silicates. L'objectif est la production rapide de données pour caractériser le degré d'altération des sédiments de rivières. En parallèle, l'analyse isotopique d'oxygène des silicates qui n'est plus opérationnelle depuis plusieurs années sera remise en service. À plus long terme, le projet de mettre en place l'analyse isotopique des isotopologues rares des carbonates ( $\Delta 47$ ) à des fins de paléo-thermométrie a été engagé avec l'acquisition d'un nouveau spectromètre de masse dans le cadre du CPER «Plateforme Géochimique» de la FR-EST.

## LE RÉSEAU INFORMATIQUE

Au CRPG notre parc informatique consiste en une centaine de micro-ordinateurs, environ 50% Windows, 50% Macintosh, et six stations de travail Sun. Toutes les machines, sauf quelques-unes dédiées au pilotage des appareils de mesure, sont connectées en réseau. Deux stations de travail sont utilisées pour des services Internet (web, messagerie), les autres pour des applications scientifiques (pilotage de la sonde ionique IMS 1270, analyse d'images, systèmes d'informations géographiques). Nous avons donc à peu près un ordinateur par personne dans un parc informatique qui a rajeuni pendant les quatre dernières années ; aujourd'hui, une machine sur deux est un portable.

Les machines sont reliées par un réseau câblé, entièrement commuté à 100Mb/s, avec connexion par fibre optique (1000Mb/s) à StanNet (le réseau métropolitain de l'enseignement et de la recherche) et à RENATER (le réseau national).

Nous avons un site web CRPG qui a double rôle ; de présenter le centre à l'extérieur (thèmes de recherche, équipes de recherche, résultats scientifiques récents, missions, publications) et

d'offrir accès aux informations pratiques (annuaire, séminaires, annonces de soutenances de thèses, informations et inscription pour des colloques). Aussi, nous hébergeons les sites web de la Fédération de Recherche Eau-Sol-Terre et de ECORD, le consortium européen de forage océanique.

Le CRPG a un système automatique et centralisé de sauvegarde de données. Ce système, équipé d'un auto-changeur de bandes, peut archiver 1,4 teraoctets de données. Il est particulièrement adapté à la situation des ordinateurs portables, et a fait ses preuves à plusieurs reprises, allant du remplacement d'un fichier perdu jusqu'à la récupération de toutes les données d'un chercheur suite à une panne de disque.

Parmi les évolutions récentes à signaler dans les services réseau du CRPG sont l'installation d'un système de webmail, l'amélioration des dispositifs anti-spam et anti-virus, et la centralisation des serveurs dans une salle équipée d'un onduleur et d'un climatiseur. Un système wifi, en phase de développement, facilitera l'accès au réseau, notamment pour des étudiants et des visiteurs.

## BÂTIMENT

Des opérations immobilières importantes ont été effectuées durant le dernier quadriennal. Le laboratoire d'isotope stable a été rénové entièrement et ceci sur les fonds propres du centre. Le deuxième étage côté laboratoire a été entièrement rénové sur les fonds propres du centre. L'aménagement d'un nouveau laboratoire a été réalisé dans le bâtiment sonde avec une salle «hors poussière», une salle dite «propre» et une salle de préparation des échantillons pour le traitement de matières extra-terrestre et cofinancée par la région et le CRPG.

Le CRPG a financé des fenêtres avec stores dans le cadre de rénovation de laboratoires ou de bureaux. La délégation a financé une autre partie.

Afin de parer à des éventuelles coupures de courant et à palier au démarrage du groupe électrogène (qui a été changé durant ce quadriennal), le CRPG s'est doté de 7 onduleurs sur des appareillages scientifiques sensibles. Un escalier de secours a été fabriqué. Il est en prévision un local de stockage pour les produits dangereux. La centrale incendie et anti-intrusion ont été changées pour une meilleure sécurité du centre. Des plans d'évacuation ont été installés. Afin d'éviter l'entrée de poussière dans le bâtiment sonde, nous avons fait isoler la cage d'escalier de secours.

### TRAVAUX RÉALISÉS ENTRE 2004 ET 2007

#### TRAVAUX RÉALISÉS ET FINANCÉS PAR LE CNRS

Rénovation ascenseur en 2005 pour un coût de	15 791,00
Pose de nouvelles fenêtres dans certains laboratoires, stores et des portes de secours coté sud en 2005	16 563,06
Pose de nouvelles fenêtres dans certains laboratoires en 2006	5 292,00
Pose d'une ligne de vie sur la toiture	5 100,00
Changement du groupe électrogène coût en 2006	31 349,00
Pose d'un escalier de secours coté Nord en 2007	150 684,45
Fabrication d'un local de stockage pour produits chimiques : prévisionnel de	180 000,00
Déviations des lignes haute tension 2006	3 556,10
Rénovation des tuyaux d'évacuation des sanitaires	6 527,40

#### TRAVAUX RÉALISÉS SUR LES FONDS PROPRES DU CENTRE

Réalisation du laboratoire Isotope stable	17 500,00
Onduleurs en 2006	23 652,00
Réaménagement des locaux du 2 <sup>e</sup> étage (préparation échantillons, couloir, bureaux, soufflage de verre)	8 342,00
Passerelle pour l'installation des pompes du laboratoire des gaz rares	800,00
Installation des bouteilles de gaz à l'extérieur du laboratoire	1 000,00
Réalisation de l'atelier électronique	8 000,00
Changement des blocs d'éclairage de secours.	2 200,00
Rénovation local polissage échantillons	6 000,00
Rénovation salle de réunion	7 000,00
Remplacement centrales incendie et intrusion	19 030,00

#### TRAVAUX FINANCÉS SUR FONDS CRPG, FR-E.S.T. ET RÉGION LORRAINE

Aménagement du nouveau bâtiment	98 205,00
---------------------------------	-----------



## TRAVAUX À PRÉVOIR

Des travaux de rénovation du centre ont été réalisés durant ces quatre années, mais toutefois, il reste encore quelques points à améliorer ou à continuer dans la lancée.

Nous avons éliminé une partie de la distribution du gaz de ville dans la partie Nord (côtés bureaux) du bâtiment car l'installation n'était plus aux normes et inutile dans cette zone. Il faudrait remettre aux normes l'autre partie où le gaz de ville est encore utilisé dans les laboratoires.

La porte de sortie de secours de l'amphithéâtre date de la construction du centre et est dépourvue de barres anti-panique. Un remplacement de celle-ci s'avère nécessaire.

Les chaises de l'amphithéâtre ne sont pas reliées entre elles mécaniquement, un remplacement s'avère aussi nécessaire.

Le CRPG est situé dans un environnement dit «vert» qui se révèle être une forte charge d'entretien tant en personnel que financièrement et qu'il nous est difficile voire impossible d'assumer seul. Il faut prévoir un entretien régulier environ tous les deux ans qui se chiffre à hauteur de 4 500 euros.

Les toitures des bâtiments annexes (atelier, reprographie et conditionnement standards) sont en fibrociment. Un entretien régulier est nécessaire et ne peut être réalisé par notre équipe d'entretien. Il faut prévoir l'intervention par une entreprise spécialisée. (*Un devis est en cours de réalisation*).

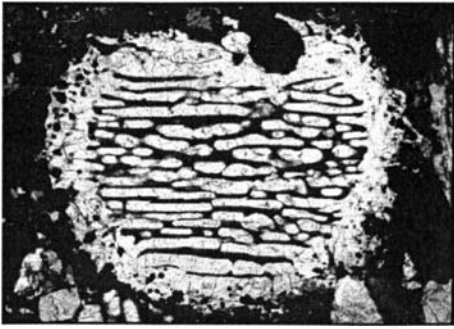
Seul 20% des fenêtres ont été remplacées ces deux dernières années, il faut prévoir le remplacement du reste surtout dans les laboratoires pour de meilleures conditions d'analyses et dans le reste du bâtiment ce qui permettrait de faire des économies d'énergie (Climatisations).

Une ligne de vie a été installée dans la partie sud du bâtiment, il faudrait compléter cette ligne de l'autre côté du bâtiment (Nord).

Les livraisons de gros appareillage, des bouteilles de gaz et cadre sont effectuées à l'arrière du bâtiment, la circulation des camions s'avère difficile (plates-bandes toujours détruites) et dangereuse. Un aménagement du rond point est à envisager.

Le BrF<sub>3</sub> est un gaz dangereux à la manipulation, un local de stockage et de manipulation, anti-déflagrant est nécessaire et obligatoire.

Les normes n'arrêtant pas de changer, de nombreux contrôles obligatoires doivent être faits. Ces contrôles des blocs autonomes d'éclairage de secours, de l'installation électrique, des extincteurs représentent un coût déjà élevé et il nous reste à mettre en place le contrôle des hottes et sorbonnes, d'autres contrôles devraient arriver...



## BILAN DU THÈME : COSMOCHIMIE ET PLANÉTOLOGIE

Chercheurs CNRS : 2 (1 DR, 1 CR et 1 CR pendant une année)

Enseignants-chercheurs INPL : 3 (2 PR, 1 MC)

Doctorants : 7

Post-doctorants : 3 (1 an)

Nombre de publications : 73 (58 A1, 1 A2, 3A3, 3 B et 8 Chapitres de livres) dont 14 sont dans les revues *Science* et *Nature*, 17 dans la revue *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 11 dans la revue *Earth and Planetary Science Letters*.

Nombre de thèses soutenues : 4

### INTRODUCTION

La plupart des objectifs scientifiques fixés dans le texte de prospective 2004-2007 du thème «Cosmochimie et Planétologie» ont été réalisés (cf liste détaillée suivante). Certains projets ont bien sûr avancé plus lentement que d'autres ou ont été arrêtés. C'est le cas pour l'essentiel de tout ce qui touche l'étude de l'origine et de l'évolution de la matière organique dans les météorites. Jérôme Aléon recruté CR2 au CRPG en octobre 2003 devait être le porteur de ce projet et aurait dû fédérer, en collaboration avec le Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, des travaux faits avec la sonde ionique ims 1270 sur la caractérisation chimique et isotopique in situ de la matière organique des météorites ainsi que des travaux conduits par spectrométrie de masse après extraction de la matière organique. Jérôme ayant décidé de partir pour un an aux USA après son embauche et, lors de son retour en 2006, de réintégrer non pas le CRPG mais le CSNSM d'Orsay, le CRPG a perdu son seul chercheur récemment recruté en cosmochimie. Les projets touchant à l'étude par sonde ionique de la matière organique des météorites n'ont pas pu être développés. Le CRPG a aussi perdu, à travers ce départ, des forces dans l'étude des IDPs et des échantillons de grains cométaires de la mission Stardust. Lié à ce départ, le recrutement d'un minéralogiste-pétrographe-expérimentateur spécialisé dans les météorites en maître de conférences à l'Université de Nancy I a échoué. Ce deuxième échec de recrutement a impliqué une ré-orientation des recherches en minéralo-

gie-pétrologie expérimentale en s'orientant plus vers l'étude des processus magmatiques au sens large. Cette ré-orientation a été rendue possible grâce au recrutement de Laurent Tissandier (IE) au laboratoire d'expérimentation, au recrutement de François Faure (maître de conférences à l'Université de Nancy I) et au démarrage de nouveaux projets de thèse. Nous avons aussi eu le chance d'accueillir au cours de ces quatre ans Andreas Pack (post doctorat de un an) et Mark Van Zuilen (post doctorat de deux ans).

En conclusion, si l'on met à part les problèmes de recrutement, le bilan scientifique de ce thème nous semble très positif. Un certain nombre de premières scientifiques ont été obtenues, que ce soit sur l'étude expérimentale de la condensation, la cosmochimie du Mo, l'origine des chondres, l'origine des radioactivités éteintes, la composition isotopique du Soleil, la découverte de nouvelles anomalies isotopiques, la géodynamique du manteau de la Terre et de Mars d'après l'azote et les gaz rares, la matière carbonée archéenne, le fractionnement isotopique métal-silicate, ... A ces résultats se rajoutent bien sûr l'analyse des échantillons ramenés par les deux missions NASA Genesis (vent solaire) et Stardust (grains cométaires) pour lesquelles des chercheurs du CRPG avait été sélectionnés dans le Preliminary Examination Team et ont pu donc conduire des travaux dès le retour des échantillons sur Terre sans attendre l'appel d'offres international.

## BILAN DES TRAVAUX

### RÉSERVOIRS COSMOCHIMIQUES : DU MILIEU INTERSTELLAIRE AU SOLEIL JEUNE

**Chercheurs impliqués : Jérôme Aléon, Peter Burnard, Marc Chaussidon, Bernard Marty, Fabien Palhol.**

#### ANALYSE DU VENT SOLAIRE COLLECTÉ PAR LA MISSION GENESIS ET DU VENT SOLAIRE PIÉGÉ DANS LES SOLS LUNAIRES

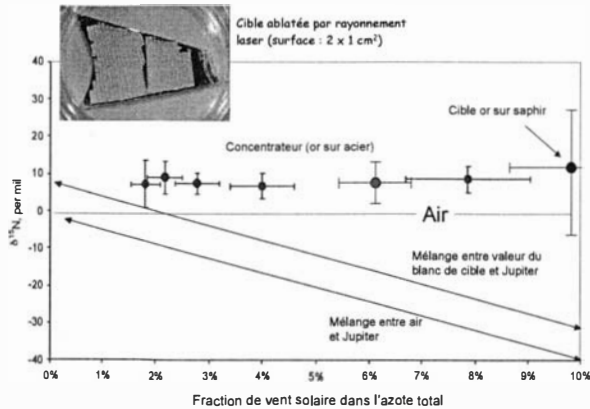
La connaissance de la composition isotopique du Soleil revêt une importance considérable en cosmochimie, notamment en ce qui concerne la compréhension de l'origine des volatils (H, C, N, O et gaz rares) dans le système solaire, de leur distribution et évolution à l'intérieur du système solaire et enfin 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 à priori préservé la composition originelle du gaz de la nébuleuse solaire. Depuis plusieurs années nous avons développé au CRPG des techniques originales pour extraire des sols lunaires les atomes du vent solaire soit par analyse par profil en profondeur avec la sonde ionique soit par analyse spectrométrique grain par grain par chauffage laser (*Nature* 1999, **402**, 270-274 ; *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999, **167**, 47-60 ; *Science* 2000, **290**, 1142-1145 ; *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002, **202**, 201-216). Ces travaux nous ont amenés à nous intéresser de plus en plus au vent solaire et à être sélectionnés pour l'étude des collecteurs de vent solaire de la mission NASA Genesis. Au cours de ce quadriennal, les premières analyses (au monde) de la composition isotopique de l'azote des collecteurs de Genesis ont été obtenues et, indépendamment, nous avons réussi à identifier des composants solaires de C et d'O implantés dans les sols lunaires et à mesurer leurs compositions isotopiques.

La mission Genesis (programme Discovery de la NASA, PI : Don Burnett, coût : 270 MUS\$) avait pour but de connaître la composition de la matière initiale qui a formé le système solaire pour quelques éléments clés, dont l'azote, priorité de la mission avec l'oxygène. Pour cela, un vaisseau spatial est allé échantillonner les ions émis par le Soleil, supposé représenter le mieux le gaz initial, durant 27 mois dans l'espace. Cet échantillonnage s'est fait de façon passive par implantation, des ions du vent solaire dans des matériaux cibles ultra-purs. Malgré la durée importante d'exposition, les quantités attendues étaient très faibles, et le PI a proposé au CRPG

d'analyser l'azote dans ces cibles, du fait de notre expérience pour l'analyse de très faibles quantités de N dans les échantillons du manteau et dans les sols lunaires. Lors du retour de la mission sur Terre le 8 Septembre 2004, le parachute de la capsule ne s'est pas ouvert et les cibles ont été très endommagées et polluées notamment en azote atmosphérique. Nous avons développé, sur financement du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), du CNRS, et de la Région Lorraine un système pour dépolluer et extraire l'azote solaire implanté à ~50nm grâce à un rayonnement laser UV sous ultravide et l'analyse isotopique de N par spectrométrie de masse statique.

L'analyse de la composition de Jupiter (représentant le gaz initial du système solaire) par la sonde US Galileo, et l'analyse de sols lunaires (représentant le vent solaire implanté au cours du temps) par sonde ionique au CRPG avaient mis en évidence dans les deux cas, par rapport à l'azote terrestre ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N} = 3.67 \times 10^{-3}$ ) un appauvrissement marqué en  $^{15}\text{N}$  ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N} \leq 2.8 \times 10^{-3}$ ). Cette différence était interprétée comme résultant de l'injection dans la zone des planètes terrestres de matière solide (organique ?) porteuse d'azote riche en  $^{15}\text{N}$ , la nébuleuse protosolaire initiale étant pauvre en  $^{15}\text{N}$ . Nos résultats mettent en évidence que l'azote du vent solaire actuel montre une composition isotopique ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N} = 3.7 \pm 0.2 \times 10^{-3}$ ) proche de celle de la Terre et des météorites (FigCosmo1 page suivante) et très différente de celle attribuée à la nébuleuse originelle. Les implications pour l'évolution du système solaire sont énormes. Il faut envisager (i) soit que les mesures de Jupiter et du régolithe lunaire reflètent des processus spécifiques (dynamique atmosphérique sur Jupiter, source cométaire pour la Lune ?), (ii) soit que la composition isotopique de l'azote du vent solaire a évolué «récemment» par exemple par nucléosynthèse dans la couronne lors de recombinaisons magnétiques, soit par l'apport de matériel riche en  $^{15}\text{N}$  à la zone convective de l'étoile durant le dernier milliard d'années.

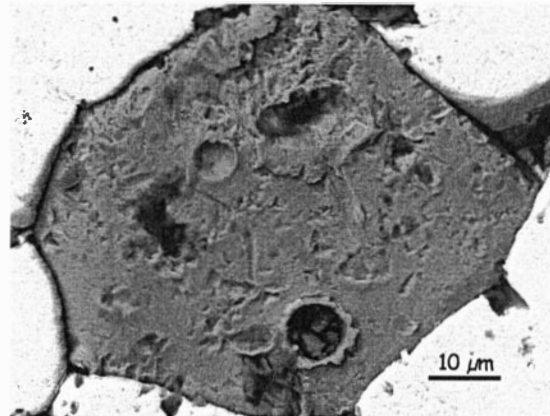
L'analyse par sonde ionique de la composition isotopique du C piégé dans les 50-100 premiers nanomètres de grains d'ilménite d'un sol lunaire ramené par la mission Apollo 17 nous a permis de



FigCosmo1 : Composition isotopique de l'azote dans les cibles de Genesis, exprimées en parties pour mille par rapport à N atmosphérique. La fraction de N solaire dans N total est calculée d'après le rapport néon/azote analysé simultanément (le néon est d'origine exclusivement solaire). Bien que l'azote de contamination est toujours majoritaire, les données définissent une corrélation qui donne un rapport  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  de  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N} = 3.7 \pm 0.2 \times 10^{-3}$  pour le vent solaire actuel.

déterminer la composition isotopique du C du vent solaire et donc peut être celle du C du Soleil (*Astrophys. J.* 2004, **600**, 480-484). Il apparaît que le C du Soleil est pauvre (d'environ 12% par rapport au carbone terrestre) en isotope lourd du carbone, le  $^{13}\text{C}$ . Cette composition isotopique représente celle du gaz de la nébuleuse solaire et implique soit (i) que des réactions particulières ont permis la synthèse de la matière organique connue dans les météorites, cette matière étant plus riche en  $^{13}\text{C}$ , soit (ii) que cette matière organique qui a pu être à la source du développement de la vie sur Terre était d'origine interstellaire.

Beaucoup de nos efforts ont aussi porté sur la détermination de la composition isotopique de l'oxygène du vent solaire, ce qui constitue une question centrale en cosmochimie-géochimie. Depuis plus de trente ans la présence de très grandes anomalies isotopiques (variations isotopiques non dépendantes de la masse) est connue pour l'oxygène à l'échelle micrométrique dans les différents constituants des météorites ainsi qu'à l'échelle planétaire entre la Terre, Mars et les corps parents des météorites différenciées. L'origine de ces variations reste à ce jour inconnue et une contrainte très importante serait de connaître la composition isotopique moyenne du gaz de la nébuleuse protosolaire. Cela était et reste l'objectif principal de la mission Genesis. Nos travaux ont consisté à isoler dans les sols lunaires des

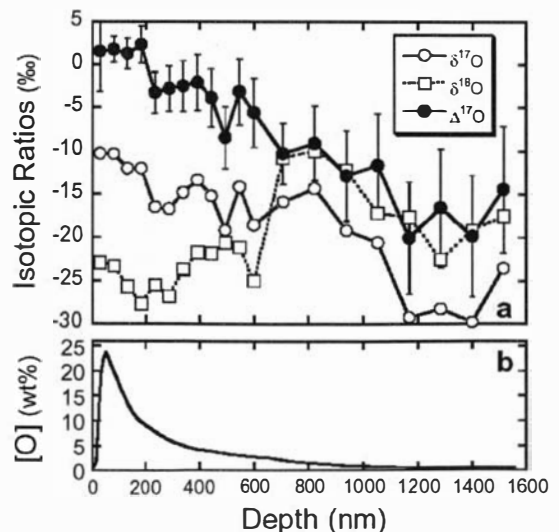


FigCosmo2 : photo d'un grain de métal du sol lunaire Apollo 17 79035. Les cratères d'impact à la surface de ce grain démontrent qu'il a été exposé à la surface de la Lune.

grains de métal (donc à priori exempts d'oxygène lunaire) et à rechercher dans ces grains par profil en profondeur à la sonde ionique un composant solaire implanté. Nous avons pu isoler par tri magnétique et binoculaire 199 grains de métal et 36 sulfures, de taille comprise entre 34 et 113  $\mu\text{m}$ , dans notre échantillon du sol lunaire 79035. Après observation au microscope électronique à balayage, 38 de ces grains se sont révélés avoir des surfaces assez plates pour pouvoir être analysées (FigCosmo2 ci-dessous) et un composant solaire implanté a été détecté dans 8 d'entre eux (*Nature* 2005, **434**, 619-621). D'après ces résultats

le Soleil aurait une composition enrichie en  $^{16}\text{O}$  semblable à la composition des inclusions réfractaires dans lesquelles l'anomalie de la composition isotopique de l'oxygène a été découverte (FigCosmo3 ci-dessous). Des réactions, pour l'instant essentiellement inconnues (e.g. self shielding de la lumière UV, réactions de type ozone) auraient enrichi en  $^{17}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$  le gaz à partir duquel l'essentiel des solides et des planètes telluriques du système solaire se sont formés.

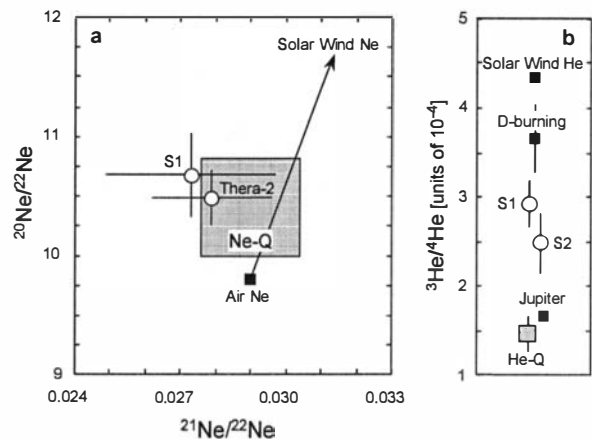
FigCosmo3 : Profil en profondeur avec la sonde ionique des compositions isotopiques de l'oxygène dans un grain de métal du sol lunaire Apollo 17 79035. Un composant solaire implanté ayant un enrichissement en  $^{16}\text{O}$  de 20‰ est présent en profondeur



## ÉTUDE DES ÉCHANTILLONS COMÉTAIRES RAMENÉS PAR LA MISSION STARDUST

Le 15 janvier 2006, la capsule de la mission NASA Stardust ramenait sur Terre environ 10 000 grains de taille comprise entre  $\approx 1$  et  $\approx 300 \mu\text{m}$  collectés dans la queue de la comète 81P/Wild 2. Cette comète est une comète de la famille de Jupiter, c'est à dire que son orbite actuelle l'approche de Jupiter et de Mars, mais elle s'est formée il y a 4,57 milliards d'années aux confins du système solaire au delà de l'orbite actuelle de Neptune. C'est un corps de 4,5 km de diamètre dont d'innombrables équivalents se trouvent encore aujourd'hui dans la ceinture de Kuiper. Les objectifs de la mission Stardust étaient d'échantillonner des poussières dans la queue de la comète afin d'en analyser les compositions minéralogiques, chimiques et isotopiques. L'échantillonnage s'est fait lorsque la sonde Stardust est passée dans la queue de la comète Wild 2 à une distance de 236 km du noyau cométaire. Les grains se sont implantés à une vitesse de 6,1 km/sec dans les collecteurs faits d'alvéoles d'aérogel, un matériau formé d'une émulsion de silice d'une densité mille fois plus faible que le verre. Les grains ont été ralentis tout en se fragmentant dans l'aérogel. 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 ainsi qu'une particule terminale (un fragment de grain) de  $\approx 25 \mu\text{m}$  de diamètre. Les observations et les analyses faites lors du PET (*Science* 2006, **314**, 1711-1716 ; *Science* 2006, **314**, 1724-1728) ont montré que des grains formés à haute température (silicates réfractaires, olivine, pyroxène) étaient présents dans le noyau de la comète Wild 2 ce qui implique des processus de transport à très grande échelle dans le disque d'accrétion solaire. Une première série d'analyses faites au CRPG (concentrations en He, Ne et Ar et composition isotopique du Ne) démontre le piégeage dans l'aérogel de volatils cométaires : les concentrations en gaz rares et les rapports  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  supérieurs à la valeur atmosphérique terrestre indiquent que lors de leur décélération dans l'aérogel une partie des volatils des grains cométaires se sont dégazés et ont été piégés sous forme de bulles. La composition isotopique du néon s'apparente à celle de

la matière organique contenue dans les chondrites. Cependant, l'abondance estimée de néon dans la particule originale est plusieurs ordres de grandeur supérieure à celles des chondrites, suggérant le piégeage très efficace des gaz rares lors de la synthèse de cette MO, et également le caractère très primitif de la matière échantillonnée par Stardust. La composition isotopique de l'hélium est intermédiaire entre la valeur de la nébuleuse originelle et celle du Soleil résultant de la destruction précoce du deutérium (FigCosmo4 ci-dessous). Ces données, uniques pour l'instant,



FigCosmo4 : Composition isotopique de Ne et He dans Stardust. Le rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  est intermédiaire entre la valeur de la nébuleuse proto-solaire et celle du Soleil après la combustion du deutérium. La composition isotopique de Ne s'apparente à celle de la matière macromoléculaire des chondrites, mais pourrait également définir une nouvelle composante (appauvrissement en  $^{21}\text{Ne}$ ).

démontrent des mélanges de matière dans le système solaire naissant à très grande échelle et à plusieurs époques. Une deuxième série d'analyses (trois isotopes de l'oxygène) sur la particule terminale qui était un pyroxène a démontré que ce grain avait une composition isotopique qui pourrait l'apparenter aux chondrites carbonées, renforçant ainsi l'idée d'un transport très intense dans le disque d'accrétion de matériel des zones internes aux zones externes.

## ÉTUDE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE MÉTÉORITIQUE : ORIGINE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET DÉCOUVERTE D'UNE NOUVELLE FAMILLE DE SILICATES EXTRA-TERRESTRES

L'étude de la répartition du deutérium au niveau moléculaire dans la matière organique insoluble des chondrites carbonées (MOI) a été entreprise par GC-irMS. La MOI est caractérisée par un enrichissement très important en deutérium comparé aux échantillons organiques terrestres (avec un  $\delta\text{D}$  supérieur à 1000‰). Cet enrichis-

sement était classiquement interprété comme la signature de précurseurs organiques d'origine interstellaire préservés dans la MOI. Comme il avait été montré que le deutérium était distribué de manière hétérogène, nous voulions vérifier si cette distribution était liée à la structure moléculaire de la MOI. En mesurant le D/H de fragments obtenus

par pyrolyse et oxydation de la MOI, nous avons été capables d'associer un rapport isotopique à plusieurs types de liaison C-H présentes dans la macromolécule, liaisons qui ont des énergies différentes. La corrélation entre ces paramètres a permis de proposer un nouveau modèle pour expliquer l'enrichissement en deutérium observé dans la MOI (*Earth and Planetary Science Letters* 2006, **243** 15-25). Ce modèle se démarque des précédents car il implique un processus de synthèse de la MOI à partir de précurseurs, dont la signature isotopique a été effacée, suivie d'un enrichissement isotopique lors des phases précoces de l'histoire du système solaire.

Lors de l'étude par imagerie isotopique avec la sonde ionique ims 1270 d'un échantillon de matière organique de la météorite Murchison, nous avons découvert, dans cette matière organique, des grains d'oxyde de silicium portant des anomalies de leur composition isotopique de l'oxygène de très grande ampleur (*Nature* 2005, **437**, 385-388). Ces grains sont enrichis d'un facteur  $\approx 100$  en  $^{17}\text{O}$  et en  $^{18}\text{O}$  par rapport à la composition solaire ou à la composition ter-

restre (FigCosmo5 ci-dessous). Aucun processus de nucléosynthèse stellaire classique ne semble pouvoir expliquer ces compositions isotopiques.

Ces compositions n'ont pour l'instant été observées qu'une seule fois dans du gaz autour d'une géante rouge particulière (HR4049). Le grand nombre de grains trouvés dans l'échantillon de matière organique, leur similitude de composition isotopique et leur «grande» taille (plusieurs  $\mu\text{m}$ ) vont à l'encontre des caractéristiques typiques des grains présolaires «classiques». Nous avons proposé que ces grains se seraient formés par condensation à l'intérieur du système solaire dans des régions où une irradiation intense du gaz par les particules émises par le Soleil jeune (protons et particules alpha) auraient pu produire par réactions nucléaires des enrichissements anormaux en  $^{17}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ . Ces résultats ont bien sûr des implications importantes sur les processus de formation des premiers solides dans le disque d'accrétion

mais ils remettent aussi en question l'idée classiquement admise que tous les grains portant des anomalies isotopiques sont d'origine présolaire.



FigCosmo5 : Grains de silice observés au microscope électronique à balayage. Les fausses couleurs surimposées à l'image traduisent l'intensité de l'anomalie isotopique (excès de  $^{18}\text{O}$ ).

## LES PROCESSUS NÉBULAIRES

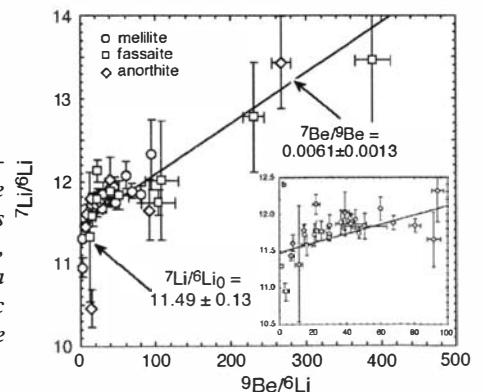
**Chercheurs impliqués : Marc Chaussidon, Guy Libourel, Laurent Tissandier**  
**Etudiants - Post-doctorants : Yves Marrocchi, Andréas Pack, Alice Toppani**

### LES RADIOACTIVITÉS ÉTEINTES ( $^7\text{Be}$ , $^{10}\text{Be}$ , ...) ET LA NÉBULEUSE PROTOSOLAIRE

Les observations astrophysiques récentes du rayonnement X émis par les étoiles jeunes indiquent que le Soleil lors de sa formation, au cours de sa période T-Tauri, a du émettre un flux de protons d'environ 5 ordres de grandeur plus intense que le vent solaire actuel. Dans une telle situation une irradiation par ce rayonnement énergétique d'une partie du disque d'accrétion solaire est inévitable. Nos travaux de ces dernières années ont consisté à chercher dans les inclusions réfractaires des météorites primitives des traces de cette irradiation. Nous avons déjà mis en évidence dans une inclusion réfractaire de la météorite Allende la présence, lors de la formation de l'inclusion, de l'isotope radioactif à courte période  $^{10}\text{Be}$  (*Science* 2000, **289**, 1334-1337).

FigCosmo6 : diagramme isochrone montrant que lors de sa cristallisation, cette CAI d'Allende a incorporé du  $^7\text{Be}$  avec un rapport  $^7\text{Be}/^9\text{Be}$  de l'ordre de 0,006.

Nous avons pu mettre en évidence (*Geochim. Cosmochim. Acta* 2006, **70**, 224-245) dans le même échantillon de grandes variations de la composition isotopique du Li (FigCosmo6 ci-dessous), variations qui sont le résultat de la



décroissance radioactive in situ du  $^7\text{Be}$ , un isotope radioactif du Be à très courte période (demi-vie de 53 jours). De par sa demi-vie très courte, le  $^7\text{Be}$  a obligatoirement une origine interne au système solaire. Il ne peut être produit que par irradiation et son incorporation dans les inclusions réfractaires implique qu'il a été produit en même temps que ces inclusions se formaient, très probablement

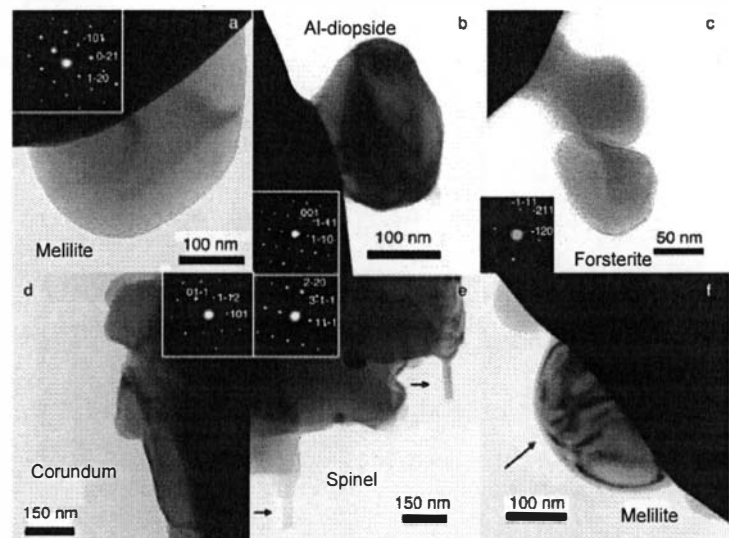
autour du Soleil en formation. Ces résultats sont importants parce qu'ils font le lien entre les observations astrophysiques des étoiles en formation et certains fragments des météorites et qu'ainsi ils permettent de rattacher la formation des premiers solides dans le système solaire à l'évolution précoce du Soleil et aux processus d'irradiation associés.

#### CONDENSATION EXPÉRIMENTALE DANS LA NÉBULEUSE PROTOSOLAIRE

Depuis Urey (1952), la variabilité des compositions des corps planétaires de notre système solaire est interprétée comme le résultat d'un processus de condensation (nucléation et croissance de grains à partir d'un gaz) généralisé du gaz nébulaire primordial au sein de la nébuleuse protosolaire. Malgré son succès, ce modèle de condensation est uniquement fondé sur une approche théorique à partir de calculs thermodynamiques. Pour pallier ce manque, nous avons mis au point au CRPG (Nancy) un dispositif expérimental (Thèses Tissandier, 2001; Toppani, 2004), le "Nébulotron", comportant un bombardement laser d'une cible de composition déterminée et un four qui homogénéise en phase vapeur les produits résultants du bombardement laser avant de les condenser sur des plaques métalliques. Ce dispositif expérimental, dans lequel nous contrôlons la température de condensation et la pression totale, est unique et nous a permis pour la première fois de reproduire une partie de la séquence de condensation observée dans les météorites primitives (*Geochim. Cosmochim. Acta* 2006, **70**, 5035-5060) et notamment de mettre en évidence les effets cinétiques par rapport aux prédictions thermodynamiques dans le cas d'une condensation à l'équilibre. A partir d'un gaz riche en Mg et Si (et ayant des rapports de concentration solaire pour Ca, Al, Mg et Si) nous avons obtenu la formation d'oxydes et de silicates cristallins (corindon, spinelle, anorthite, méllilite, diopside

alumineux, forstérite et enstatite, FigCosmo7 ci-dessous). 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 fluide) par condensation dans des enveloppes d'étoiles (*Nature* 2005 **437**, 1121-1124).



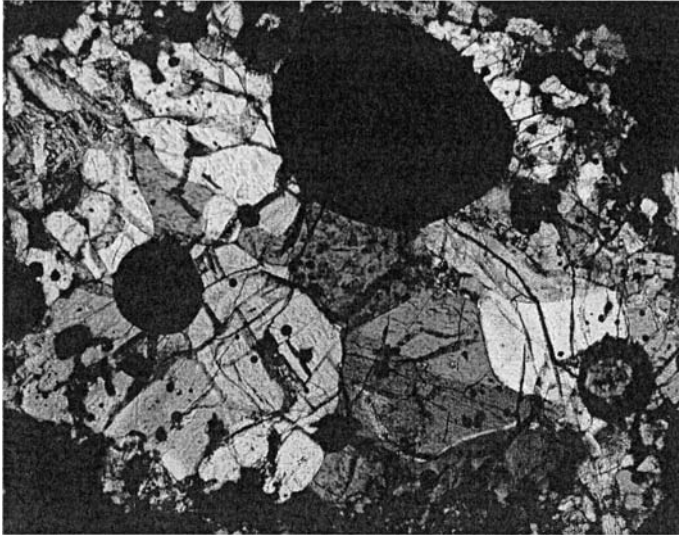
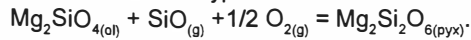
FigCosmo7 : Exemples de condensats produits dans les expériences

#### INTERACTION GAZ-LIQUIDE ET FORMATION DES CHONDRES

Malgré l'importance des travaux entrepris depuis plusieurs décades sur les météorites primitives (les chondrites), la formation des chondres demeure toujours énigmatique. Pour essayer de répondre à cette question, et préciser leurs conditions de formation, nous étudions expérimentalement depuis plusieurs années (*MAPS* 2000, **35**, 1183-1188; *MAPS* 2002, **37**, 1377-1389; *MAPS* 2004, **39**, 1931-1955) les modes d'interaction d'un gaz nébulaire plus ou moins différencié ( $\text{K}_{(g)}$ ,  $\text{SiO}_{(g)}$ ,  $\text{Na}_{(g)}$ ) avec des liquides silicatés, simulant

les chondres. Grâce à cette approche, nous avons notamment montré (*Earth Planet. Sci. Lett.* 2006, **251**, 232-240) que certaines caractéristiques minéralogiques et chimiques des chondres ne pouvaient résulter que d'une formation des chondres en système ouvert avec une forte interaction avec un gaz nébulaire enrichi en  $\text{SiO}_{(g)}$ . Une récente étude (GCA 2007, submitted) sur la composition isotopique de l'oxygène des principales phases présentes dans les chondres confirme ce modèle en montrant notamment que les olivines et

les pyroxènes au sein des chondres ne peuvent être co-magmatiques et que les pyroxènes se sont formés au détriment des olivines par interaction avec la phase vapeur enrichie en SiO en accord avec une réaction du type :



Par ailleurs, la nature relique des olivines (déséquilibre isotopique dans les chondres) ainsi que la reconnaissance d'agrégats d'olivine et de métal avec des textures granoblastiques d'équilibre (*Earth Planet. Sci. Lett.* 2007, **254** 1-8) laisse à penser que ces olivines puissent être issues d'objets différenciés (FigCosmo8 ci-contre). Dans ces conditions, les chondres doivent être considérés comme des objets complexes, dont une partie est héritée de corps astéroïdaux différenciés (olivines ± métal) et l'autre en équilibre avec le gaz nébulaire (pyroxène, mesostase). Ces résultats, en cours de confirmation par une étude de chronologie fine (radioactivités éteintes  $^{26}\text{Al}$  et  $^{60}\text{Fe}$ ), sont très importants car ils pourraient d'une part donner des informations sur les premiers planétisimaux, ou embryons formés dans notre système solaire, et d'autre part suggérer que les chondrites ne sont pas aussi primitives qu'on ne le pensait.

FigCosmo8 : Agrégats d'olivine et de Fe-Ni métal dans un chondre de Vigarano (CV) montrant des joints triples attestant d'une texture granoblastique d'équilibre de recuit.

#### ORIGINE DES GAZ RARES DES MÉTÉORITES PRIMITIVES

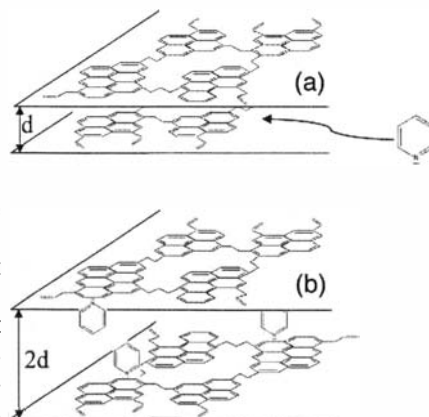
Les météorites primitives formées lors de l'évolution de la nébuleuse protosolaire présentent des concentrations en gaz rares très importantes. Ils sont essentiellement retenus dans un résidu organique insoluble qui résulte de l'attaque acide HF/HCl de la météorite de départ (Lewis *et al.*, 1975). Cette découverte a permis l'identification de grains carbonés, d'origines présolaires et porteurs d'anomalies isotopiques très importantes en gaz rares : nanodiamants, graphite et carbure de silicium (Lewis *et al.*, 1987; Bernatowicz *et al.*, 1987, Amari *et al.*, 1990). Ces grains présolaires sont situés dans la fraction non oxydable du résidu organique insoluble mais ne peuvent rendre compte de la très forte concentration en gaz rares mesurés dans ce résidu. La majorité des gaz rares, référencés sous le nom de P1, sont piégés dans une énigmatique phase, appelée phase Q, située dans la fraction oxydable du résidu organique insoluble. La nature et l'origine de cette phase ainsi que le mécanisme de piégeage des gaz rares P1 sont très mal compris et restent sujet à débat.

Afin de mieux comprendre la localisation et l'origine des gaz rares P1 dans les météorites primitives, nous avons effectué une série d'expériences et d'analyses au sein du CRPG mais également en collaboration avec le Laboratoire Environnement et métallurgie (LEM, Nancy) :

(i) Adsorption physique basse pression (Marrocchi *et al.*, 2005a). Ces expériences ont permis de reproduire les abondances et le fractionnement élémentaire des gaz rares P1 pour un intervalle

de température de 80-100 K. Cependant, elles ne rendent pas compte de la très forte rétention thermique des gaz rares P1 et n'induisent pas de fractionnement isotopique mesurable (Marrocchi & Marty, 2004).

(ii) Une expérience de solvation a également été effectuée afin de faire gonfler le réseau de la matière organique insoluble d'Orgueil (CI). Elle a permis de démontrer que les gaz rares P1 sont piégés dans le volume du résidu organique insoluble (FigCosmo9 ci-dessous, Marrocchi *et al.*, 2005b). Ces résultats suggèrent un piégeage



FigCosmo9 : (a) Vue schématique de la matière organique insoluble des météorites primitives. La pyridine, le solvant utilisé lors de cette expérience, est aussi représenté.

(b) L'introduction de la pyridine dans le résidu acide induit un processus de solvation et change considérablement la structure réseau macromoléculaire. L'interaction pyridine/résidu induit le gonflement du réseau par un facteur 2 et ainsi, la relâche des gaz rares P1 piégés entre les couches de la matière organique insoluble.



d'origine mécanique pour les gaz rares P1, probablement entre les couches organiques aromatiques observées par microscopie à transmission.

A la suite de ces résultats, nous avons entrepris deux expériences afin de reproduire les caractéristiques des gaz rares P1 dans la matière organique insoluble. Ainsi une expérience sublimation-dépôt de matière organique sous atmosphère de xénon ionisé a permis de reproduire le fractionnement isotopique de 1‰/uma observé pour le xénon P1 (Marrocchi *et al.*, 2005c). Ces résultats démontrent la possibilité d'une origine solaire des gaz rares P1.

Un autre mécanisme a été étudié : le changement de phase nanodiamants/oignons de carbone. Les nanodiamants représentent une importante quantité du carbone interstellaire et peuvent subir une transformation en oignons de carbone sous des conditions thermiques ou d'irradiations intenses. Des expériences de chauffage de nanodiamants sous une atmosphère de xénon ont été réalisées. Elles révèlent la très grande rétention thermique du xénon piégé dans la nouvelle structure avec une température maximale de relâche

située à 800°C. Outre leur très grande stabilité thermique, les oignons de carbone ont été observés dans les météorites et leur lien génétique avec les nanodiamants en font un des candidats les plus sérieux au titre de porteur des gaz rares P1.

Les travaux effectués ces 4 dernières années au CRPG ont permis d'apporter de nouvelles informations sur un des problèmes fondamentaux de la cosmochimie. Ainsi, il est de plus en plus probable que les gaz rares P1 aient été piégés dans la phase Q pendant l'évolution de la nébuleuse protosolaire et lors de phénomènes thermiques et d'irradiations intenses.

Y. Marrocchi & B. Marty (2004), Investigating Xenon Isotopic Fractionation During Rayleigh-type Distillation. *Lunar and Planetary Science Conference XXXV* (CD-ROM), Abstract #1984.

Y. Marrocchi, A. Razafitianamaharavo, L. J. Michot & B. Marty (2005a). Low pressure adsorption of Ar, Kr and Xe on carbonaceous materials (kerogen and carbon blacks), ferrihydrite and montmorillonite: Implications for the trapping of noble gases onto meteoritic matter. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, vol 69, Issue 9, p 2419-2430.

Y. Marrocchi, S. Derenne, B. Marty & F. Robert (2005b). Interlayer trapping of noble gases in insoluble organic matter of primitive meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, 236, p 569-578.

Y. Marrocchi, S. F. Robert, L. Binet & B. Marty (2005c), Trapping of xenon upon evaporation-condensation of organic matter under UV irradiation: Isotopic fractionation and electron paramagnetic resonance analysis. *Lunar and Planetary Science Conference XXXVI* (CD-ROM), Abstract #1792

## EVOLUTION PLANÉTAIRE PRÉCOCE

**Chercheurs impliqués : Jérôme Aléon, Marc Chaussidon, Etienne Deloule, Béatrice Luais, Bernard Marty.**

**Etudiants - Post-doctorants : Andréas Pack, Céline Pisapia, Mark van Zuilen, Reika Yokochi.**

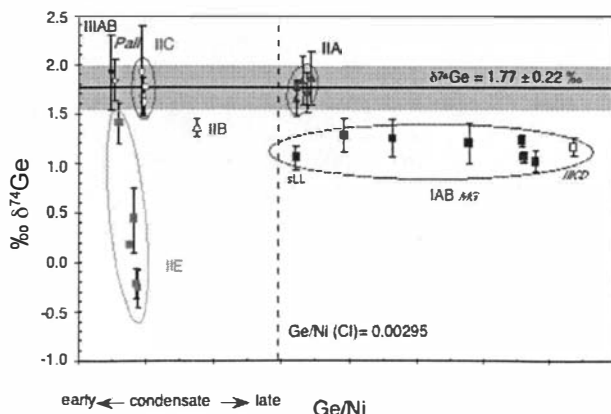
**Collaborations principales : Mathieu Roskosz, Mike Toplis.**

### FRACTIONNEMENT DES ISOTOPES DU GE LORS DE LA DIFFÉRENCIATION MÉTAL-SILICATE DES PLANÉTÉSIMAUX

Le germanium, de part son caractère sidérophile et volatil, est un des éléments potentiels pour tester les processus et les conditions de la différenciation métal-silicate des planétésimaux. Les travaux sur le fractionnement isotopique du Ge dans les météorites de fer a été accompagné d'un volet expérimental sur le fractionnement isotopique du fer entre phase métal et phase silicate. Ces études ont permis de faire des avancées

significatives sur la compréhension des processus de formation des noyaux des planétésimaux.

Le développement analytique des mesures isotopiques du germanium par spectrométrie de masse à source plasma (Isoprobe, GV Instruments) effectué durant la période 2000-2003, ainsi que les premiers résultats acquis durant cette période ont permis d'obtenir un nombre significatif de données isotopiques sur les météorites de fer de différents groupes, que ce soit le type magmatique (représentant un noyau de planétésimal) ou le type non-magmatique (représentant

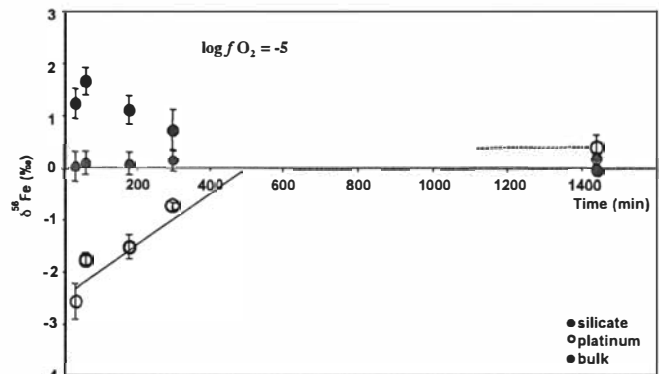


*FigCosmo10 : Compositions isotopiques du germanium dans les météorites de fer des groupes magmatiques et non-magmatiques. L'homogénéité des compositions isotopiques du germanium des groupes magmatiques (IIA, IIC, IIIAB) quelque soit leur état redox et le degré de condensation de phase métal primitive (variations de Ge/Ni) contraste avec les variations isotopiques du groupe IIE (non-magmatique) ayant subi plusieurs évènements successifs d'impacts (perte de Ge volatil).*

la phase métallique formée lors d'impacts à la surface de corps chondritiques durant les stades d'accrétion). Les compositions isotopiques du Ge ont montré qu'il n'y a pas d'anomalies isotopiques pour cet élément dans les météorites de fer mais uniquement des variations correspondant à un fractionnement isotopique (de l'ordre de 0,375‰/amu) suivant la loi de fractionnement de masse des roches terrestres. Les deux résultats importants sont les suivants (*Earth Planet. Sci. Lett.* 2007 sous presse) (FigCosmo10 page précédente). (i) Les météorites de fer magmatiques ont une signature isotopique de Ge très similaire, quelque soit leur niveau d'oxydo-réduction. Ceci montre soit que les isotopes du Ge fractionnent très peu durant la ségrégation noyau-manteau en conditions réductrices, soit qu'il y a eu un fractionnement isotopique significatif, puis une ré-équilibration entre la phase silicatée et la phase métallique, vers des valeurs approchant celles du corps parent non différencié. (ii) Les météorites de fer non-magmatiques présentent des valeurs de  $\delta^{74}\text{Ge}$  plus faibles que celles des météorites magmatiques qui sont négativement corrélées à la concentration en Ge. Les isotopes du Ge sont donc un outil potentiel pour le traçage de processus d'évaporation durant l'impact.

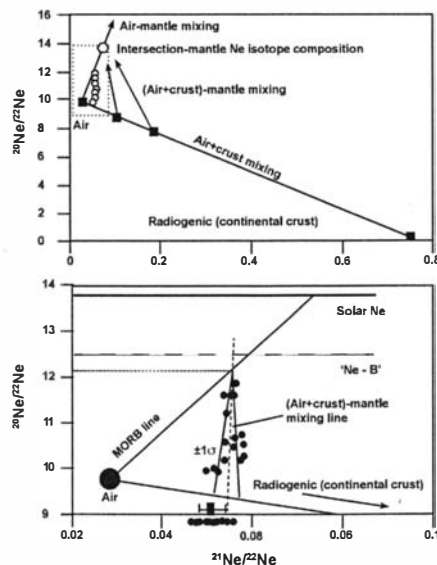
Ce projet prévoyait aussi de tester expérimentalement le fractionnement élémentaire et isotopique du Ge en fonction de la  $f\text{O}_2$  afin de retracer certains des paramètres thermodynamiques de la ségrégation noyau-manteau. Cette partie du projet a été abordée de façon préliminaire dans le cadre de stage d'étudiants 2<sup>ème</sup> année de l'ENSG-Nancy et a montré des potentialités réelles. Nous avons aussi

mené une étude expérimentale du fractionnement isotopique du fer entre phase métallique et phase silicatée en fonction de la  $f\text{O}_2$  et du temps. Les analyses isotopiques du fer (chimie et mesures par MC-ICPMS, Isoprobe, Nancy) ont été développées au CRPG. Un fractionnement cinétique avec la  $f\text{O}_2$  a été mis en évidence (*Earth Planet. Sci. Lett.* 2006 **248**, 851-867) : il conduit à la formation d'un métal appauvri en isotopes lourds ( $\delta^{56}\text{Fe} = 0$  à -2 ‰) et d'un silicate enrichi en isotopes lourds ( $\delta^{56}\text{Fe} = 0$  à 4.8‰). Cependant, ce fractionnement isotopique est transitoire, et un ré-équilibre isotopique se produit avec le temps, ce qui conduit à une inversion des compositions isotopiques des phases métalliques et silicatées ( $\delta^{56}\text{Fe}$  métal > 0,2±0,15‰ /  $\delta^{56}\text{Fe}$  silicate) (FigCosmo11 ci-dessous). Ces résultats sont cohérents avec les fractionnements observés dans les roches naturelles et constituent une référence pour la compréhension des signatures isotopiques du fer dans les météorites de fer et les pallasites.



FigCosmo11 : Fractionnement isotopique expérimental du Fer entre phase métal et silicate, à  $f\text{O}_2$  constante et en fonction du temps

#### ORIGINE DES VOLATILS ( $\text{H}_2\text{O}$ , N, GAZ RARES), ÉVOLUTION PRÉCOCE DE LA TERRE ET DE MARS, GÉODYNAMIQUE DU MANTEAU.



FigCosmo12 : Compositions isotopiques du néon dans les gaz magmatiques riches en  $\text{CO}_2$ . Les variations de compositions isotopiques peuvent s'expliquer par un mélange entre trois composants, l'un de ces composants étant du néon solaire présent dans le manteau terrestre aujourd'hui et qui aurait pu être amené il y a 4,5 milliards d'années lors de l'accrétion de la Terre par des minéraux irradiés par le rayonnement solaire.

Parmi les nombreuses questions fondamentales qui se posent concernant les volatiles terrestres deux sont essentielles: (i) quelle est l'origine des éléments volatils qui vont former l'atmosphère de la Terre et (ii) quelle est la distribution de ces éléments dans la Terre il y a 4,5 milliards d'années et leur distribution actuelle. Il existe plusieurs manières de tracer l'origine des éléments volatils : un traceur de choix est constitué par les gaz rares qui par définition ont une très faible affinité chimique pour les autres éléments chimiques et qui donc ont des compositions isotopiques qui ne sont pas (ou peu) modifiées par les processus géologiques terrestres. Les compositions isotopiques des gaz rares qui sont actuellement émis par le manteau terrestre reflètent donc

les compositions isotopiques de ces éléments lors de la formation de la Terre par accrétion. Une étude de la composition isotopique du Néon associé au gaz carbonique émis par des puits profonds (ces gaz proviennent en grande partie du manteau terrestre) a montré des compositions isotopiques spécifiques (FigCosmo12 page précédente) qui ne peuvent s'expliquer que si les planétésimaux qui ont formé la Terre par accrétion (la Terre s'est probablement formée par des collisions entre au moins une dizaine de petites planètes de la taille de Mars) contenaient beaucoup de gaz rares qui auraient été implantés par une irradiation intense à proximité du Soleil jeune (*Nature* 2004, **433**, 33-38).

L'analyse isotopique des gaz rares piégés dans

des inclusions fluides de minéraux provenant de la province plutonique de Kola (Russie) associée à un panache mantellique ont montré la présence d'isotopes du xénon produits par des radioactivités éteintes, en proportions comparables à celles des MORB. Ces résultats traduisent l'activité intense du manteau durant le premier milliard d'années et indiquent que : (i) tout le manteau de la Terre jeune a eu une dynamique globale et (ii) la convection a été intense, permettant à la Terre jeune d'évacuer efficacement sa chaleur (*Earth Planet. Sci. Lett.* 2005, **238**, 17-30). Le flux de chaleur ayant été un ordre de grandeur plus important durant les 600 premiers Ma, et, avec un tel flux la fusion partielle du manteau se produisait à des profondeurs de plusieurs centaines de km.

#### ISOTOPES DU C ET ORIGINE BIOGÉNIQUE OU NON DE LA MATIÈRE ORGANIQUE PRÉCAMBRIENNE L'ORIGINE ABIOTIQUE DE LA MATIÈRE CARBONÉE ASSOCIÉE AUX GISEMENTS D'URANIUM D'ATHABASCA

La recherche des traces de vie les plus anciennes sur Terre est une des quêtes des géologues et des résultats très discutés ont été obtenus ces dernières années sur la matière carbonée contenue dans les sédiments archéens. La composition isotopique du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) est sans doute un des traceurs les plus utilisés et les plus discutés. L'idée de ce projet était d'essayer d'utiliser la sonde ionique pour analyser *in-situ* la matière carbonée des roches archéennes pour pouvoir (i) associer à l'échelle micrométrique les informations isotopiques et les informations chimiques et structurales obtenues par exemple par spectroscopies Raman ou infra-rouge et (ii) rechercher à l'échelle micrométrique des zonations isotopiques qui pourraient être caractéristiques des processus de formation de la matière carbonée. Nous avons pour cela développé l'analyse isotopique du carbone dans la matière organique en calibrant très précisément les effets de matrice sur la discrimination de masse (*Chem Geol.* 2005, **223**, 179-195). Grâce à ce développement, nous avons pu mettre en évidence de très grandes variations de  $\delta^{13}\text{C}$  dans de la matière carbonée associée à des

gisements d'uranium protérozoïques d'Athabasca au Canada. L'origine de cette matière carbonée était controversée et ses compositions isotopiques du carbone très particulières. Les variations de  $\delta^{13}\text{C}$  mesurée à la sonde ionique sont corrélées à l'échelle micrométrique aux rapports de concentration aliphatique/aromatique (déterminés par micro-FTIR) d'une manière qui implique une synthèse de cette matière carbonée par des réactions de type Fischer-Tropsch (*Earth Planet. Sci. Lett.* 2007, sous presse). Ces résultats seraient donc les premières évidences fortes pour la formation par des processus abiotiques de quantités significatives de matière carbonée dans la croûte terrestre. A l'inverse nos résultats concernant la matière carbonée des cherts archéens (3,2 Ga) de Barberton semblent bien démontrer une origine biogénique. Dans cette matière organique nous avons pu montrer grâce aux analyses de sonde ionique que les  $\delta^{13}\text{C}$  les plus négatifs étaient associés à des rapports de concentration N/C élevés, ce qui suggère fortement que cette matière organique est bien d'origine biogénique (*Geochim. Cosmochim. Acta.* 2007, **71**, 655-669).

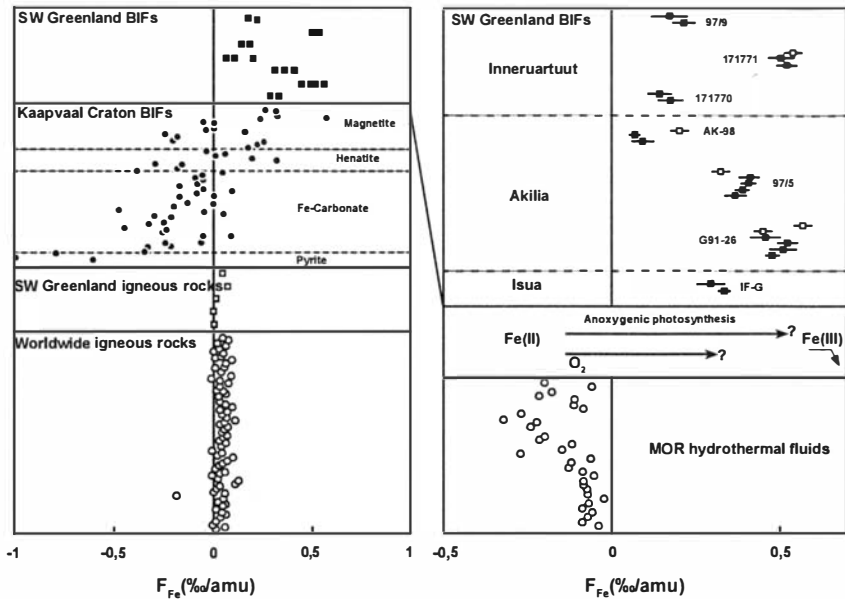
#### COMPOSITION ISOTOPIQUE DU FER DANS LES ROCHES ARCHÉENNES : UN TRACEUR DE L'ORIGINE SÉDIMENTAIRE DES BIFS ET DE L'ACTIVITÉ MICROBIENNE.

D'une manière très générale les questions fondamentales qui se posent en ce qui concerne l'étude des roches archéennes (les roches terrestres les plus anciennes formées il y a plus de 2,5 milliards d'années) sont les suivantes : (i) quelles étaient les conditions de l'environnement à l'archéen sur Terre, (ii) quelles sont les roches témoins qui subsistent aujourd'hui et qui sont des témoins de ces époques et (iii) parmi ces roches très anciennes, existe-t'il des roches sédimentaires qui pourraient alors contenir des traces des

premières formes de vie qui se sont développées sur Terre. Les travaux menés essaient de répondre à l'une de ces questions en démontrant à partir de l'étude des compositions isotopiques du Fer que certaines roches du Groenland âgées de 3,8 milliards d'années sont bien des roches sédimentaires. Ces roches appelées BIFs (Banded Iron Formations) témoignent du transport et de l'oxydation du fer et de sa précipitation sous forme d'oxydes en milieu marin. Leurs compositions isotopiques en Fer sont très différentes des compo-

sitions typiques de roches magmatiques provenant du manteau (FigCosmo13 ci-contre) et la différence de composition isotopique trouvée correspond à ce qui peut être prédit pour des fractionnements isotopiques se produisant lors de réactions d'oxydo-réduction en milieu aqueux et à basse température (en milieu marin par exemple). Ces roches sont donc parmi les roches sédimentaires les plus anciennes sur Terre (Science 2004, 306, 2077-2080) et elles pourraient renfermer les traces de vie les plus anciennes connues sur Terre.

Un autre projet (article en préparation) a consisté à étudier, en collaboration avec Mark Van Zuilen et Pascal Philippot, la variation des compositions isotopiques du fer des échantillons provenant du forage dans le système hydrothermal archéen de North Pole à Pilbara (Australie). Cette localité est célèbre pour les structures de micro-organismes qui y auraient été identifiées. Les komatiites à la base du forage ont des valeurs de  $\delta^{56}\text{Fe} \approx 0\text{‰}$ , les dykes siliceux et les niveaux à barytine d'origine hydrothermale contenant des minéraux de fer réduit (pyrite à sidérite) ont des valeurs de  $\delta^{56}\text{Fe}$  négatives (-0.7 à 0.4‰), alors que les niveaux supérieurs de dépôts de silicates oxydés (magnétite, hématite) (jaspe) se caractérisent par



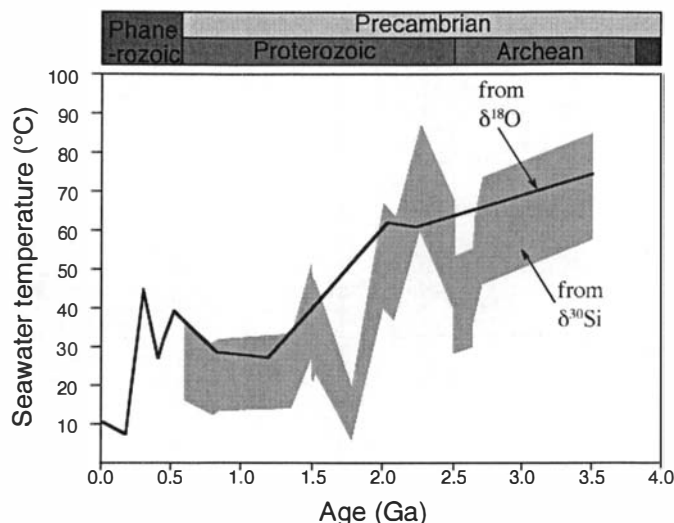
FigCosmo13 : Compositions isotopiques du fer (notées  $F_{\text{Fe}}$  pour les variations en pour mille du rapport  $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$  et  $^{58}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$  par unité de masse) dans les roches archéennes datées autour de 3,8 Milliards d'années d'Isua et d'Akilia au Groenland. Les roches d'Akilia et d'Isua ont des compositions isotopiques très différentes en Fer des roches ignées terrestres et des fluides hydrothermaux aux rides médio-océaniques (MOR).

des valeurs de  $\delta^{56}\text{Fe}$  positives (-0.1 à 1‰). Les deux points importants sont : (i) la transition Fe(II)-Fe(III) associée à des signatures isotopiques du fer distincts est à relier à des conditions redox, et peut résulter d'activités microbienne distinctes capables d'oxyder ou de réduire le fer ; (ii) Les valeurs de  $\delta^{56}\text{Fe}$  positifs des niveaux de jaspes supérieurs sont similaires à celles observées dans les BIFs, et sont à mettre en parallèle avec des  $\delta^{13}\text{C}$  négatifs et la présence de matière organique dans ces niveaux.

#### COMPOSITION ISOTOPIQUE DE L'OXYGÈNE ET DU SILICIUM DES CHERTS ARCHÉENS : LA TEMPÉRATURE DES OCÉANS ARCHÉENS.

La Terre a connu dans son histoire 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 coeur 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  $\text{CH}_4$ , le  $\text{CO}_2$  et l' $\text{H}_2\text{O}$ . 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 cherts archéens ont montré des valeurs très particulières indiquant des températures de

l'ordre de 70°C pour les océans il y a 3,5 Ga. Pour essayer de mieux comprendre la signification des cherts précambriens en termes de paléotempératures, nous avons étudié avec la sonde ionique leurs compositions isotopiques en silicium, le silicium étant a priori moins sensible que l'oxygène à des altérations deutériques ou hydrothermales. Nos résultats (Nature 2006, 443, 969-972) montrent une augmentation relative progressive des compositions isotopiques du Si au cours du Précambrien. Ces variations peuvent s'expliquer dans un modèle où, contrairement au phanérozoïque, deux puits existent au précambrien pour le silicium océanique : une partie du Si dissous participe à la silicification de la croûte océanique et l'autre partie est utilisée dans la précipitation directe de silice amorphe au fond des océans, les cherts étant les produits de la diagénèse de cette silice amorphe. Dans ce modèle une variation de la température des océans conduit à une



évolution relative de ces deux flux et par effet de bilan à un changement de leur composition isotopique. Les températures ainsi calculées pour les océans précambriens à partir des compositions isotopiques du Si des cherts sont en très bon accord avec celles proposées il y a 30 ans à partir des isotopes de l'oxygène (FigCosmo14, page suivante). L'hypothèse d'un océan très chaud (60-80°C) vers 3,5 milliards d'années et son refroidissement vers 2,0 milliards d'années est donc confortée par ces résultats.

FigCosmo14 : Variations de température recalculées pour les océans Précambriens à partir des variations de compositions isotopiques de l'oxygène et du silicium (Nature 2006, 443, 969-972).

## LES DIFFÉRENTES SOURCES DE FINANCEMENT

Durant la période 2004-2007 le thème «Cosmochimie et Planétologie» a obtenu des financements qui ont permis d'auto-financer les recherches du thème et d'installer de nouveaux équipements. La région Lorraine a soutenu notre projet «Cosmochimie et préparation au retour d'échantillons extraterrestres» de 2001 à 2004 (15 k€ en 2004) et a cofinancé la construction et l'aménagement des salles hors poussières de préparation des échantillons extraterrestres Genesis et Stardust (40 k€ en 2005). La région Lorraine, à travers le contrat de plan état-région a aussi co-financé l'acquisition d'un spectromètre de masse N-gaz rares (70 k€ du CPER en 2005). La Comité Urbaine du Grand Nancy (CUGN) a aussi cofinancé la construction et l'aménagement des salles hors poussières de préparation des échantillons (25 k€ en 2005). Le CNES a cofinancé ces équipements et a soutenu l'analyse des échantillons des missions Genesis (29 k€ en 2004, 28 k€ en 2005, 34,4 k€ en 2006) et Stardust (20 k€ en 2007). Les participants au thème ont obtenu 29,75 k€ au total sur des projets financés par le Programme National de Planétologie depuis 2004. Un financement de 6k€ au Programme d'étude de la Chimie du Milieu Interstellaire (PCMI a été obtenue en 2004. Une ACI jeune chercheur (Jérôme Aléon) de 34 k€ a été obtenue du ministère en 2004 (pour 2004-2007). Un financement de 5k€ au Programme DyETI a été obtenu en 2005 sur l'étude l'expérimentale du fractionnement isotopique métal-silicate du fer. En 2006 le projet ECSS «Etude cosmochimie du

système solaire» a été financé par l'ANR pour 3 ans (125 k€ pour les 3 ans / participant). Ce projet regroupe, sous l'animation du CRPG, 4 participants : le CRPG, le LEME du MNHN de Paris, l'équipe de géochimie-cosmochimie de l'IPG de Paris et le laboratoire de géologie de l'ENS de Lyon. Un financement ANR du projet eLIFE du forage Pilbara a été obtenu en 2007 pour 3 ans (138,2 k€ pour 3 ans pour le CRPG). Il est coordonné par l'IPG Paris (P. Philippot) et comprend l'équipe de Géobiosphère actuelle et primitive (IPG Paris), le groupe cosmochimie-Terre primitive du CRPG et l'unité d'Ecologie, Systématique et Evolution de l'Université Paris-Sud.

A ces co-financements se rajoute le soutien de l'INSU au fonctionnement de la sonde ionique ims 1270 (environ 70k€ /an depuis 2005) : l'INSU a labellisé en 2005 sous le titre «Plateforme nationale d'analyse de la matière extraterrestre» un réseau d'équipements qui comprend la sonde ionique ims 1270 du CRPG de Nancy, la sonde ionique Nanosims du MNHN de Paris, les MC ICPMS et les spectromètres de masse source solide de l'ENS de Lyon et de l'IPG de Paris.

Le total des cofinancements obtenus sur 2004-2007 spécifiquement pour le thème «Cosmochimie et Planétologie» se monte donc pour simplifier à 80 k€ de la Région Lorraine et de la CUGN (sans compter les 70 k€ du CPER), 111,4 k€ du CNES, 35,75 k€ du PNP et du PCMI, 34 k€ de l'ACI jeune chercheur et 70 k€ de l'ANR, soit un total de 331,15k€.

## LES PUBLICATIONS RELATIVES AU THÈME COSMOCHIMIE ET PLANÉTOLOGIE

Les publications du CRPG sont présentées suivant la méthode d'évaluation par quartiles utilisée par la section 18 du Comité National du CNRS.

- Le premier quartile (A1) correspond aux revues ayant un impact factor supérieur ou égal à 1,6
- Le deuxième quartile (A2) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 1 et 1,6
- Le troisième quartile (A3) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 0,6 et 1
- Le quatrième quartile (B) correspond aux revues ayant un impact factor inférieur à 0,6

### PUBLICATIONS DE RANG A1

- Lemelle L., Guyot F., Leroux H., **Libourel G.** (sous presse). Mechanism of precipitation of (Fe, Ni) alloys in olivine single crystals under reducing conditions. *J. Geophys. Res.*
- Marty B.**, Palma R., Pepin R.O., **Zimmermann L.**, Schlutter D., **Burnard P.**, Westphal A., Snead C.J., Bajt S., Becker R.H., Simones J.E. (sous presse). Helium and neon abundances and compositions in cometary matter. *Science*.
- Zanda B., **Libourel G.**, Blanc P. (sous presse). Source chondrites for refractory forsterites in primitive chondrites. *Meteor. & Planet. Sci.*
- 2007**
- Aléon J.**, El Goresy A., Zinner E. (2007). Oxygen heterogeneities in the earliest protosolar gas recorded in a meteoritic calcium-aluminum-rich inclusion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **263**, 114-127.
- Krot A.N., Yurimoto H., Hutcheon I.D., **Chaussidon M.**, MacPherson G.J., Paque-Heather J. (2007). Remelting of refractory inclusions in the chondrule-forming regions: evidence from chondrule-bearing type C calcium-aluminum-rich inclusions from Allende. *Meteor. & Planet. Sci.* **42**, 1197-1219.
- Krot A.N., Yurimoto H., Hutcheon I.D., **Libourel G.**, **Chaussidon M.**, **Tissandier L.**, Petaev M.I., MacPherson G.J., Paque-Heather J., and Wark D. (2007). Type C CAIS from Allende: Evidence for multistage formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 4342-4364.
- Libourel G.**, Krot A. N. (2007) Evidence for the presence of planetesimal material among the precursors of magnesian chondrules of nebular origin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **254**, 1-2, 1-8.
- Luais B.** (2007). Isotopic fractionation of Germanium in Iron Meteorites: significance for nebular condensation, core formation and impact processes. *Earth Planet. Sci. Lett.* **262**, 21-36.
- Pack A.**, Russel S.S., Shelley J.M.G., van Zuilen M. (2007). Geo- and cosmochemistry of the twin elements yttrium and holmium. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 4592-4608.
- Pisapia C.**, **Chaussidon M.**, Mustin C., Humbert B. (2007) O and S isotopic composition of dissolved and attached oxidation products of pyrite by *Acidithiobacillus ferrooxidans*: Comparison with abiotic oxidations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 2474-2490.
- Robert F. & **Chaussidon M.** (2007) Reply to the comment on « A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes » by Kasting et al.. *Nature* **447**, E1-E2.
- Sangély L.**, **Chaussidon M.**, Michels R., Brouand M., Cuney M., Huault V. and Landais P. (2007) Micrometer scale carbon isotopic study of bitumen associated with Athabasca uranium deposits: Constraints on the genetic relationship with petroleum source-rocks and the abiogenic origin hypothesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**, 378-396.
- Sharp Z. D., Barnes J. D., Brearley A. J., **Chaussidon M.**, Fischer T. P., Kamenetsky V. S. (2007) Chlorine isotope homogeneity of the mantle, crust and carbonaceous chondrites. *Nature*, **446**, 1062-1065.
- van Zuilen M., **Chaussidon M.**, **Rollion-Bard C.**, **Marty B.** (2007) Carbonaceous cherts of the Barberton Greenstone Belt, South Africa: Isotopic, chemical and structural characteristics of individual microstructures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 3, 655-669.
- 2006**
- Beck P., **Chaussidon M.**, Barrat J. A., Gillet P., Bohn M. (2006) Diffusion induced Li isotopic fractionation during the cooling of magmatic rocks: the case of pyroxene phenocrysts from nakhlite meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 18, 4813-4825.
- Brownlee D., Tsou P., **Aleón J.**, Alexander C. M. O., Araki T., Bajt S., Baratta G. A., Bastien R., Bland P., Bleuet P., Borg J., Bradley J. P., Brearley A., Brenker F., Brennan S. & al. (2006) Research article - Comet 81 P/Wild 2 under a microscope. *Science*, **314**, 5806, 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  $^{10}\text{Be}$  and for the possible presence of the short-lived nuclide  $^7\text{Be}$  in the early solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 224-245.
- Chaussidon M.**, Robert F., McKeegan K. D. (2006) Reply to the comment by Desch and Ouellette on « Li and B isotopic variations in an Allende CAI: Evidence for the in situ decay of short-lived  $^{10}\text{Be}$  and for the possible presence of the short-lived nuclide  $^7\text{Be}$  in the early solar system ». *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 21, 5433-5436.
- Krot A. N., **Libourel G.**, **Chaussidon M.** (2006) Oxygen isotope compositions of chondrules in CR chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 3, 767-779.
- Krot A. N., Yurimoto H., McKeegan K. D., Leshin L., Jones R. H., **Chaussidon M.**, **Libourel G.**, Yoshitake M., Huss G. R., Zanda B. (2006) Oxygen isotopic compositions of chondrules. *Chemie der Erde*, **66**, 249-326.
- Libourel G.**, Krot A. N., **Tissandier L.** (2006) Role of gas-melt interaction during chondrule formation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **251**, 3-4, 232-240.
- Lundstrom C. C., Sutton A. L., **Chaussidon M.**, McDonough W. F., Ash R. (2006) Trace element partitioning between type B CAI melts and melilite and spinel: Implications for trace element distribution during CAI formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 13, 3421-3435.
- Marty B.** (2006) The primordial Porridge. *Science*, **312**, 706-707.
- Marty B.**, Heber V. S., Grimberg A., Wieler R., Barrat J. A. (2006) Noble gases in the Martian meteorite Northwest Africa 2737: a new chassignite signature. *Meteor. & Planet. Sci.*, **41**, 5, 739-748.
- McKeegan K. D., **Aleón J.**, Bradley J., Brownlee D., Busemann H., Butterworth A., **Chaussidon M.**, Fallon S., Floss C., Gilmour J., Gounelle M., Graham G., Guan Y. B., & al. (2006) Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. *Science*, **314**, 5806, 1724-1728.

- Remusat L., **Palhol F.**, Robert F., Derenne S., **France-Lanord C.** (2006) Enrichment of deuterium in insoluble organic matter from primitive meteorites: A solar system origin? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **243**, 1-2, 15-25.
- Robert F., **Chaussidon M.** (2006) A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts. *Nature*, **443**, 7114, 969-972.
- Roskosz M.**, **Luais B.**, Watson H. C., Toplis M., Alexander C., Mysen B. O. (2006) Experimental quantification of the fractionation of Fe isotopes during metal segregation from a silicate melt. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **248**, 3-4, 851-867.
- Toppani A.**, **Libourel G.**, Robert F., Ghanbaja J. (2006) Laboratory condensation of refractory dust in protosolar and circumstellar conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 19, 5035-5060.
- Yokochi R.**, **Marty B.** (2006) Fast chemical and isotopic exchange of nitrogen during reaction with hot molybdenum. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **G3**, **7**, Q07004.

## 2005

- Aléon J.**, Krot A. N., McKeegan K. D., MacPherson G. J., Ulyanov A. A. (2005) Fine-grained, spinel-rich inclusions from the reduced CV chondrite Efremovka: II. Oxygen isotopic composition. *Meteoritics & Planet. Sci.*, **40**, 7, 1043-1058.
- Aléon J.**, Robert F., Duprat J., Derenne S. (2005) Extreme oxygen isotope ratios in the early Solar System. *Nature*, **437**, 7057, 385-388.
- Ballentine C. J., **Marty B.**, Sherwood Lollar B., Cassidy M. (2005) Neon isotopes constrain convection and volatile origin in the Earth's mantle. *Nature*, **433**, 7021, 33-38.
- Barrat J. A., **Chaussidon M.**, Bohn M., Gillet P., Göpel C., Lesourd M. (2005) Lithium behavior during cooling of a dry basalt: an ion-microprobe study of the lunar meteorite Northwest Africa 479 (NWA 479). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 23, 5597-5609.
- Gillet P., Barrat J. A., Beck P., **Marty B.**, Greenwood R. C., Franchi I. A., Bohn M., Cotten J. (2005) Petrology, geochemistry and cosmic-ray exposure age of lherzolitic shergottite Northwest Africa 1950. *Meteoritics & Planet. Sci.*, **40**, 8, 1175-1184.
- Hashizume K., **Chaussidon M.** (2005) A non-terrestrial <sup>16</sup>O-rich isotopic composition for the protosolar nebula. *Nature*, **434**, 7033, 619-622.
- Kolodny Y., **Chaussidon M.**, Katz A. (2005) Geochemistry of a chert breccia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 2, 427-439.
- Krot A. N., Hutcheon I. D., Yurimoto H., Cuzzi J. N., McKeegan K. D., Scott E. R. D., **Libourel G.**, **Chaussidon M.**, **Aléon J.**, Petaev M. (2005) Evolution of oxygen isotopic composition in the inner solar nebula. *Astrophys. J.*, **622**, 1, 1333-1342.
- Marrocchi Y.**, Derenne S., **Marty B.**, Robert F. (2005) Interlayer trapping of noble gases in insoluble organic matter of primitive meteorites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 3-4, 569-578.
- Marrocchi Y.**, Razafitianmaharavo A., Michot L. J., **Marty B.** (2005) Low-pressure adsorption of Ar, Kr, and Xe on carbonaceous materials (kerogen and carbon blacks), ferrihydrite, and montmorillonite: Implications for the trapping of noble gases onto meteoritic matter. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 9, 2419-2430.
- Marty B.** (2005) On the Moon as it was on Earth. *Nature*, **436**, 7051, 631-632.
- Marty B.**, Robert P., **Zimmermann L.** (2005) Nitrogen and noble gases in micrometeorites. *Meteoritics & Planet. Sci.*, **40**, 6, 881-894.

- Pack A.**, Palme H., Michael J., Shelley G. (2005) Origin of chondritic forsterite grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 12, 3159-3182.
- Papineau D., Mojzsis S. J., Karhu J. A., **Marty B.** (2005) Nitrogen isotopic composition of ammoniated phyllosilicates: case studies from Precambrian metamorphosed sedimentary rocks. *Chem. Geol.*, **216**, 1-2, 37-58.
- Sangély L.**, **Chaussidon M.**, Michels R., Huault V. (2005) Microanalysis of carbon isotope composition in organic matter by secondary ion mass spectrometry. *Chem. Geol.*, **223**, 4, 179-195.
- Semenenko V. P., Jessberger E. K., **Chaussidon M.**, Weber I., Stephan T., Wies C. (2005) Carbonaceous xenoliths in the Krymka LL3.1 chondrite: mysteries and established facts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 2165-2182.
- 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**, 7062, 1121-1124.
- Yokochi R.**, **Marty B.** (2005) Geochemical constraints on mantle dynamics in the Hadean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **238**, 1-2, 17-30.
- Yokochi R.**, **Marty B.**, **Pik R.**, **Burnard P.** (2005) High <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios in peridotite xenoliths from SW Japan revisited: evidence for cosmogenic <sup>3</sup>He released by vacuum crushing. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **G3**, **6**, 1, 1-12.

## 2004

- Aléon J.**, Robert F. (2004) Interstellar chemistry recorded by nitrogen isotopes in solar system organic matter. *Icarus*, **167**, 2, 424-430.
- Beck P., Barrat J. A., **Chaussidon M.**, Gillet P., Bohn M. (2004) Li isotopic variations in single pyroxenes from the Northwest Africa 480 shergottite (NWA 480): a record of degassing of Martian magmas? *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 13, 2925-2933.
- Dauphas N., Davis A. M., **Marty B.**, **Reisberg L.** (2004) The cosmic molybdenum-ruthenium isotope correlation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **226**, 3-4, 465-475.
- Dauphas N., **Marty B.** (2004) "A large secular variation in the nitrogen isotopic composition of the atmosphere since the Archaean?": response to a comment on "The nitrogen record of crust-mantle interaction and mantle convection from Archaean to present" by R. Kerrich and Y. Jia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **225**, 3-4, 441-450.
- Dauphas N., Van Zuilen M., Wadhwa M., Davis A. M., **Marty B.**, Janney P. E. (2004) Clues from Fe isotope variations on the origin of early Archean BIFs from Greenland. *Science*, **306**, 5704, 2077-2080.
- Hashizume K., **Chaussidon M.**, **Marty B.** (2004) Protosolar carbon isotopic composition: implications for the origin of meteoritic organics. *Astrophys. J.*, **600**, 1, 480-484.
- Krot A. N., **Libourel G.**, Goodrich C., Petaev M. I. (2004) Silica-rich igneous rims around magnesian chondrites in CR carbonaceous chondrites: evidence for condensation origin from fractionated nebular gas. *Meteor. Planet. Sci.*, **39**, 12, 1931-1955.
- Pack A.**, Shelley G., Palme H. (2004) Chondrules with peculiar REE patterns: implications for solar nebular condensation at high C/O. *Science*, **303**, 5660, 997-1000.
- Pack A.**, Yurimoto H., Palme H. (2004) Petrographic and oxygen-isotopic study of refractory forsterites from R-chondrite Dar al Gani (R3.5-6), unequilibrated ordinary and carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 5, 1135-1157.

## LES PUBLICATIONS DE RANG A2

- Pack A.**, Hoernes S., Göbbels M., Bross R., Buhr A. (2005) Stable oxygen isotopes - A new approach for tracing the origin of oxide inclusions in steels. *Eur. J. Mineral.*, **17**, 483-493.

## LES PUBLICATIONS DE RANG A3

- Chaussidon M.**, Gounelle M. (2007) Short-lived radioactive nuclides in meteorites and early solar system processes. *C. R. Geosciences*, **339**, 872-884.
- Chaussidon M.**, Robert F. (2007) Formation du système solaire : approche cosmochimique dans le contexte astrophysique. *C. R. Geosciences*, **339**, 859-861.
- Gounelle M., **Chaussidon M.** & Montmerle T. (2007) Irradiation in the early solar system and the origin of short-lived radioactive nuclides. *C. R. Geosciences*, **339**, 885-894.

## LES PUBLICATIONS DE RANG B

- Gargaud M., Albarède F., Boiteau L., **Chaussidon M.**, Douzery E., Montmerle T. (2006) Dating methods and corresponding chronometers in astrobiology. *Earth, Moon and Planets*, **98**, 11-38.
- Martin H., Albarède F., Claeys P., Gargaud M., **Marty B.**, Morbidelli A., Pinti D. (2006) Building of a habitable planet. *Earth, Moon and Planets*, **98**, 97-151.
- Montmerle T., Augereau J. C., **Chaussidon M.**, Gounelle M., **Marty B.**, Morbidelli A. (2006) Solar system formation and early evolution: the first 100 million years. *Earth, Moon and Planets*, **98**, 39-95

## LES LIVRES ET LES CHAPITRES DE LIVRES

- Kallenberg R., Clayton R.N., **Marty B.**, Ott U. (sous presse). Isotopic variations among solar system objects. In : *Isotopic compositions of light elements in the solar system. Institute for Space Science. Kluwer Academy*.
- Becker R.H., Clayton R.N., Galimov E.M., Lammer H., **Marty B.**, Pepin R.O., Wieler R. (sous presse). Terrestrial planets. In *Kallenbach R. (Ed.) Isotopic compositions of light elements in the solar system. Institute for Space Science. Kluwer Academy*.
- Chaussidon M.** (2007) Formation of the Solar system: a chronology based on meteorites. In «*Lectures in astrobiology II*», M. Gargaud, H. Martin & Ph. Claeys eds, Springer, 45-74.
- Chaussidon M.** & Gounelle M. (2006) Irradiation processes in the early solar system in «*Meteorites and early solar system II*», D. Lauretta and L. Leshin eds, Arizona University press, p 323-339.
- Marty B.** & Yokochi R. (2006). Water in the Early Earth. In *Water in nominally anhydrous minerals. Rev. Mineral Geochem*, **62**, 421-450.
- Chaussidon M.** (2005) Chronologie de la formation du système solaire : les informations données par les météorites. In: *Des atomes aux planètes habitables, Presses Universitaires de Bordeaux* 57-78.
- Hewins R. H., Connolly H. C., Lofgren G. E., **Libourel G.** (2005) Experimental constraints on chondrule formation. In: *In Chondrites and the Protoplanetary Disk, Eds. A N Krot, E R D Scott, B Reipurth. Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 341.
- Kolodny Y., **Chaussidon M.** (2004) Boron isotopes in DSDP cherts: fractionation and diagenesis. In: *Hill RJ, Leventhal J, Aizenshtat Z, Baedeker MJ, et al. (Eds), Geochemical Society* 1-14.







# BILAN DU THÈME : GÉODYNAMIQUE : COUPLAGES ENTRE PROCESSUS SUPERFICIELS ET PROFONDS

Chercheurs CNRS : 9  
Enseignant-chercheurs INPL : 6  
Enseignant-chercheurs UHP Nancy 1 : 6  
Doctorants : 29  
Post-doctorants : 2

Nombre de publications : 128 (82 A1, 7 A2, 28 A3, 4 B et 7 Chapitres de livre)  
Nombre de thèses soutenues : 14

## INTRODUCTION

Ce thème a été mis en place pour prendre en compte les couplages entre les processus superficiels et profonds, en combinant plusieurs disciplines (tectonique, pétrologie, géochimie, géochronologie et géomathématiques). Quatre axes de recherches ont été mis en avant; (1) initiation du rifting; (2) modélisation numérique des objets géologiques (logiciel gOcad); (3) subduction exhumation et (4) processus magmatiques. Les personnes impliquées sont 10 enseignants-chercheurs (6 de l'ENSG et 4 de l'UHP), 5 chercheurs CNRS et 5 ingénieurs de recherche, auxquelles il faut ajouter 14 doctorants et un post doctorant et de nombreuses collaborations au niveau national et international. Ce thème a été financé par de nombreux projets nationaux (Diety, Sedit et 3f, ANR blanche et CaTel) et internationaux (UE, collaborations avec le Maroc, le Québec, la Chine ...) et dans le cadre du consortium gOcad. Ce thème aura produit depuis 2004, 59 publications de rang A. Il est à noter qu'en plus de son développement propre, le logiciel gOcad a été de plus en plus intégré dans les autres axes de recherche.

## BILAN DES TRAVAUX

### INITIATION DU RIFTING

**Chercheurs impliqués :** *Mary Ford, David Jousselin, Sylvain Bourlange, Christian Le Carlier de Veslud, Edward A. Williams.*

**Thésards :** *Nicolas Backert, (CRPG-G2R), Sébastien Rohais (IFP Rennes, CRPG)*

**Collaborations principales :** *IFP, Université de Rennes I, Université de Barcelone, Université de Neuchâtel (Suisse), EOST, Université de Nantes, Université de Oregon, Université de Hawaii, Université de Washington, Woods Hole Oceanographic Institution.*

### SOURCES DE FINANCEMENTS

Corinthe (Mary Ford): 3F (INSU), 10K Euro pour 8 partenaires (2007); CatTel@CRL, projet ANR de F.Cornet, 12k Euro (2007-09); DyeTi, 13 k Euro (2004-06)

Remiremont (Sylvain Bourlange) : 19 k Euro. Subvention jeune chercheur, Région Lorraine.

### LE GOLFE DE CORINTHE

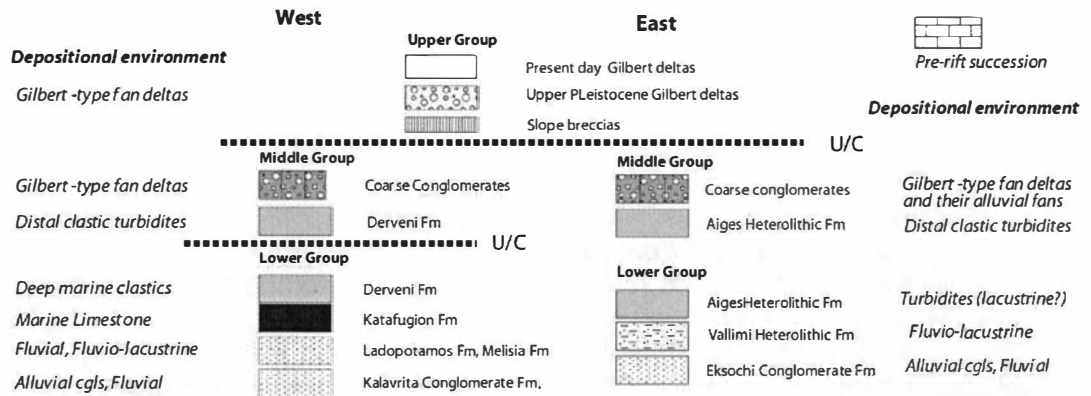
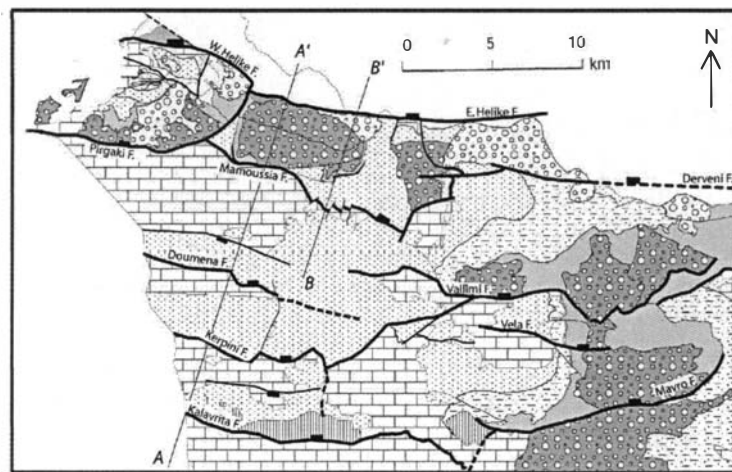
Le Golfe de Corinthe (ouest de la Grèce) est la cible d'une activité de recherche internationale intense focalisée sur les phénomènes sismiques, notamment avec la mise en place du 'Corinth Rift Laboratory' (CRL). Depuis 5 ans, les équipes du CRPG et du G2R ont travaillé sur l'histoire complète du rifting de Corinthe dans le cadre de 4 projets nationaux (GdR Corinthe, DyeTi, ANR catTel@CRL, 3F). Nos objectifs

sont de comprendre tous les aspects du développement du rift depuis son initiation en utilisant une approche multidisciplinaire couplant la cartographie géologique avec les analyses structurales, sédimentologiques, biostratigraphiques et géochimiques. Deux thèses ont été lancées en 2004 dans le cadre de ces recherches: l'une vient de se terminer (S. Rohais, Rennes-IFP-CRPG) et l'autre doit s'achever début 2008 (N. Backert, CRPG-G2R). Quatre grands types de résultats ont pu être obtenus.

### Evolution détaillée du rift

Grâce à de nombreuses campagnes de terrains, il a été possible de construire une nouvelle carte géologique sous SIG des dépôts et les failles syn-rifts. Une nouvelle stratigraphie syn-rift a également été établie et les unités ont pu être corrélées entre les blocs de failles (FigGeodyn1 ci-dessous) Nous montrons que le rift a évolué en trois phases (Ford *et al.*, 2007; Rohais *et al.* 2007) :

*FigGeodyn1. Nouvelle carte géologique de la partie centrale de la côte sud du Golfe de Corinthe.*



Le Rift Précoce (4-2 Ma à 1.2 Ma, Lower Group) était large et dominé par des blocs basculés remplis par des dépôts alluviaux allant jusqu'à 1.3 km d'épaisseur dans l'ouest venant du W et WSW et passant à des dépôts lacustres épais vers l'est. Le taux de distension était faible et le rejet vertical sur les failles était <1.5 km.

Le Rift Moyen (1.2-0.6 Ma; Middle Group) est caractérisé par une augmentation de la subsidence mais dans un rift beaucoup plus étroit,

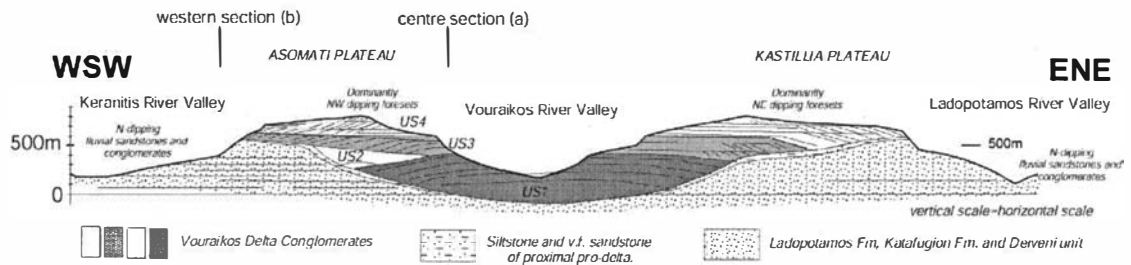
et par le dépôt de deltas géants de type Gilbert. La base du Middle Group est marquée par une discordance importante à l'ouest qui disparaît vers l'est.

Le Rift Tardif (Upper Group): A partir de 0.6 Ma le rift est devenu encore plus étroit et est associé à un soulèvement de la cote sud dont le taux varie de 1.1 à 1.5 mm/a. Le taux de distension augmente accompagné par des déplacements verticaux plus importants sur quelques grandes failles.

## Architecture stratigraphique des grands Gilbert Deltas (Pléistocène inférieur à moyen)

Pendant le Pléistocène inférieur et moyen, une dizaine de fans deltas de type Gilbert (Gilbert deltas) se sont déposés dans le rift de Corinthe. Ces deltas, qui sont d'une taille exceptionnelle (jusqu'à 900m d'épaisseur et jusqu'à 4 km de rayon), sont aujourd'hui soulevés et incisés par les rivières de la côte sud du Golfe. Ceci

*FigGeodyn2. Profil orienté ENE-OSO de la partie proximale du delta de Vouraikos orthogonal à sa direction de progradation, montrant la discordance à sa base (US1 et la paléo-vallée remplie par le delta précoce. Adapté de Ford et al. (2007).*



a permis de conduire des études pointues sur leur architecture et leur faciès, afin de mettre en évidence le rôle des paramètres climatiques, eustatiques et tectoniques dans la construction de ces deltas. Nous nous sommes focalisés sur les deltas Pléistocène inférieur à moyen de Vouraikos (FigGeodyn2 ci-dessus, Malatre *et al.* 2004, Ford *et al.* 2007), de Kerinitis (Backert *et al.* soumis) et d'Ilias-Evrostini (Rohais *et al.* 2007).

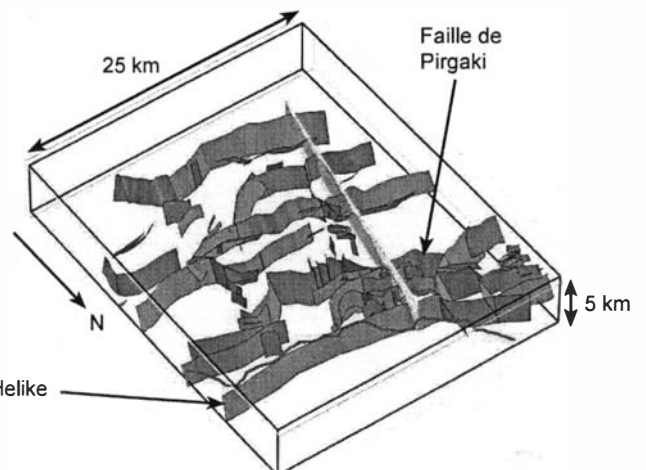
La base du delta de Vouraikos (800m) est marquée par une discordance érosive majeure. Le delta est composé de 5 unités stratigraphiques (US) séparés par des discordances ou des surfaces stratigraphiques significatives. L'US1 est affectée par un anticlinal syn-sédimentaire de type rollover, impliquant l'activité d'une faille

normale listrique précoce. L'édifice est coupé par des failles normales planaires syn- et post-sédimentaires. Les datations palynologiques préliminaires, nous indiqueraient que les 5 US se sont déposées pendant une période de 400 à 600 ka, ceci impliquant que chaque US peut représenter une période inter-glaciaire de 100 ka (défini par les assemblages palynologiques). Ce signal eustatique est superposé à une subsidence contrôlée par la faille de Pirgaki-Mamoussia. On peut reconnaître, l'initiation, la croissance et la décélération de cette faille normale. Une discordance interne majeure entre US1 et US2-US3 représente un évènement tectonique anormal. La même surface stratigraphique majeure est reconnue dans les deux autres deltas, le Kerinitis et le Ilias-Evrostini.

### Bases de données et modèles géométriques sous SIG-gOcad

Depuis plusieurs années, le CRPG a acquis une grande expérience dans la réalisation de modèles numériques couplant l'utilisation de SIG et du modeleur 3D gOcad (projets nationaux: GéoFrance 3D Massif Central, Fossé rhénan, projet ANR TectoAnnot (Le Carlier *et al.* 2001; Le Carlier *et al.* 2005; Ford *et al.* in press; Salles *et al.* 2007). Dans le cadre de l'étude du golfe de Corinthe, une analyse des données de terrain et de la cinématique du réseau de failles du rift a été initiée, dans le but de mieux contraindre la propagation des failles et la migration de leur activité dans l'espace et dans le temps (Ford *et al.* 2006; Rohais *et al.* 2006; Backert *et al.* 2005). Toutes ces informations ont été intégrées dans un modèle 3D sur le modeleur gOcad, couvrant

une zone d'environ 40 par 30 km le long de la côte sud (FigGeodyn3). Ce travail montre que les principales failles du secteur sont beaucoup plus connectées latéralement que ne le laissaient présager les cartes géologiques antérieures.



*FigGeodyn3. Vue du NE du réseau de failles onshore de la côte sud du golfe de Corinthe mettant en évidence leur forte connectivité.*

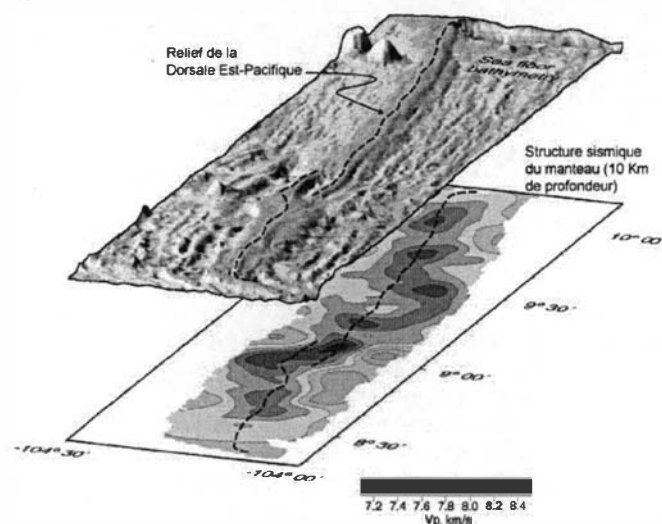
## Etudes géomorphologiques, évolution du réseau hydrographique

Une étude du réseau hydrographique de la côte sur du golfe de Corinthe a été menée à l'aide du SIG à partir d'un MNT à 75 m issu du SRTM. A l'aide de relations du type Pente/Aire drainée, il a été possible de mettre en évidence sur ces rivières l'existence d'un léger déséquilibre.

Cependant, les variations faibles du coefficient de pente suggèrent une relative uniformité du taux de soulèvement dans la région étudiée : les 30 km de la marge sud du golfe à l'ouest de la ville d'Aigion.

## INITIATION, ÉVOLUTION ET DYNAMIQUE DES RIFTS ET DORSALES

Le traitement de données de tomographie à la dorsale Est-Pacifique, a été poursuivi et achevé en 2006 (Toomey *et al.*, 2007). Cette activité, non affichée dans le plan quadriennal précédant a été un des axes de recherche les plus importants pour D. Jousselin. L'étude présente la première image d'une tranche de manteau, à 8 Km de profondeur (FigGeodyn4 ci-contre). Elle révèle que les zones riches en magma ne sont pas toujours exactement à l'aplomb de la dorsale, mais peuvent s'en écarter de plus de 10 km. Là où les zones riches en magma se trouvent sous la dorsale, les éruptions volcaniques sont plus fréquentes et les phénomènes hydrothermaux plus vigoureux. Il est aussi montré que les mouvements du manteau ne sont pas passifs, mais que ce sont eux, au contraire, qui influencent la dynamique des plaques sus-jacentes.



FigGeodyn4. vue en perspective de la structure sismique du manteau (10km de profondeur) et de la bathymétrie sus-jacente. La limite de plaque évolue pour mieux correspondre à la zone d'alimentation en magma dans le manteau (cf sens de rotation de la limite figurée en pointillé). La segmentation de la dorsale (OSC) est le résultat de la géométrie en échelon des zones d'alimentation dans le manteau.

## PRÉSENCE DE FLUIDES DANS LA ZONE DE SISMICITÉ DE REMIREMONT-EPINAL-RAMBERVILLERS

Ce projet est centré sur l'étude de la zone de sismicité de Remiremont-Epinal-Rambervillers dans les Vosges. Il vise à étudier les relations entre les circulations de fluides dans les failles et la relation avec la genèse des séismes. La région que l'on peut définir par le triangle Epinal-Remiremont-Rambervillers présente une sismicité orientée grossièrement Nord-Sud. La profondeur de nucléation de ces tremblements

de terre n'est que très imparfaitement connue. Elle est de l'ordre de 5 km. La mise en œuvre des techniques de prospection magnétotellurique a permis de construire une image de résistivité électrique apparente du sous-sol le long du profil (FigGeodyn5 ci-dessous). Cette image révèle un fort contraste de résistivité électrique entre la partie Nord et la partie Sud du profil ; la conductivité électrique étant plus élevée au Nord. Nous interprétons cette structure électrique du sous-sol comme le reflet de la présence dans la partie Nord d'un réseau de failles saturées en fluides entraînant une dilatance des fractures affectant le massif et augmentant ainsi la connectivité des réseaux de fractures.

La mise en relation du profil de résistivité électrique apparente réalisé avec la répartition

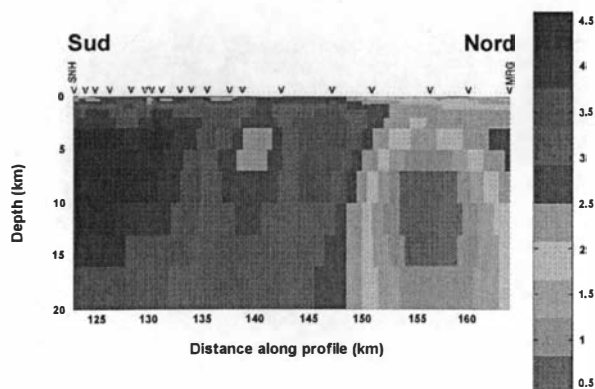


Fig. Geodyn5. Résistivité électrique apparente du sous-sol le long du profil s'étendant de Faymont à Rambervillers, soit sur 41 km.

spatio-temporelle des séismes ayant affectés la région montre que la région affectée le plus récemment par des tremblements de terre correspond à la zone qui présente la plus faible conductivité électrique. Cette observation renforce

l'hypothèse d'un lien entre les zones affectées par des tremblements de terre, et la présence d'un réseau de faille dilaté par des fluides en surpression.

#### DISTENTION EN COLLISION : LE FOSSÉ RHÉLAN

Un modèle 3D du bassin de Dannemarie (extrémité S du Fossé Rhélan), intégrant toutes les données disponibles (puits et 70 lignes sismiques) a été construit sur le modèleur gOcad (Le Carlier de Veslud *et al.*, 2005). Ce modèle montre un contrôle de la subsidence par des flexures syn-rift kilométriques associées à des failles normales. Ces flexures sont interprétés comme des plis par propagation de faille, se développant au dessus de failles normales. De telles structures s'expliquent par (Ford *et al.*, in press): (1) la réactivation de failles de socles favorablement orientées, (2) la présence de couches visqueuses permettant un découplage vertical de la déformation, (3) un taux

de déformation lent.

A plus grande échelle, une méthodologie nouvelle (Bourgeois *et al.*, in press) a été proposée pour séparer les signatures de rifting et de flambement lithosphérique dans le NW de l'avant pays alpin. Il en ressort que les grands rifts cénozoïques se sont développés principalement entre 37 et 17Ma alors que le flambement lithosphérique s'est développé dans les derniers 17 Ma. Le remplissage de ces rifts a été affecté par le développement de ces plis (longueur d'onde de 270 km et amplitude verticale de 1500m), avec une érosion dans les anticlinaux et une sédimentation dans les synclinaux.

#### MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES OBJETS GÉOLOGIQUES

**Chercheurs :** Jean-Laurent Mallet, Guillaume Caumon

**Ingénieurs de recherche :** Jean-Jacques Royer, Pierre Jacquemin, Christian Le Carlier de Veslud

**Doctorants (année de soutenance) :** Evelyn Bennewitz (2009), Luc Buatois (2008), Laurent Castanié (2006), Lætitia Macé (2006), Laurent Labat (2004), Emmanuel Labrunye (2004), Emmanuel Fetel (2007), Pierre Kedzierski (2007), Bruno Leflon (2005), Rémi Moyen (2005), Pierre Muron (2005), Luciano Pereira dos Reis (2005), Laurent Souche (2004), Anne-Laure Tertois (2007), Marc-Olivier Titeux (2008), Sarah Vitel (2007).

**Postdoctorant :** Ling Zhang (2005-2006).

**Nombre de thèse soutenues :** 11 thèses de doctorat + 1 HDR.

**Collaborations :** Stanford (USA), Harvard (USA), FU-Berlin (D), PUC, Rio de Janeiro (Brésil), Univ. Freiberg (D), IFP (Paris), UMR G2R, Inria-Lorraine, GDR ZAM, consortium gOcad (77 universités et 22 industriels), EarthDecision/Paradigm, Total, Chevron (USA), Petrobras (Brésil).

**Distinctions :**

**Prix Nicolas-Joachim Lehmann, pour la thèse de Tobias Frank, attribué par la Saxonian confederation of information technologies (Sax-IT), 2006**

**Mathematical Geology best paper award: Mallet J.-L. (2004). Space-Time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical Geology*, 36 (1), 1-32.**

**Grand Prix Dolomieu de l'Académie des Sciences - J.L. Mallet (2004)**

**Prix Marcel Roubault de l'Union Française des Géologues. J.L. Mallet (2005)**

**AAPG Distinguished Lecturer – J.-L. Mallet (2006)**

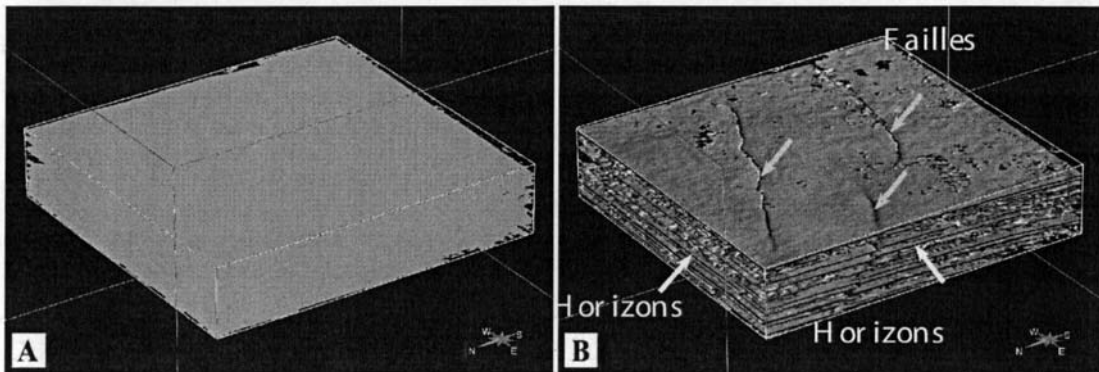
La modélisation tridimensionnelle des objets géologiques est une étape essentielle pour la compréhension et la quantification des processus géologiques, ainsi que pour une gestion raisonnée des ressources naturelles. Au cours de ce dernier quadriennal, nos travaux de recherche ont touché à plusieurs aspects de la géomodélisation, depuis la visualisation et l'interprétation sismique jusqu'à la gestion d'incertitudes sur les écoulements dans les réservoirs.

## VISUALISATION ET INTERPRÉTATION AUTOMATIQUE DE DONNÉES SISMQUES

L'interprétation d'horizons dans un cube sismique s'appuie sur la cohérence du signal sismique. En revanche, la détection de failles requiert des outils de visualisation puissants (FigGeodyn6 ci-dessous, Castanié *et al.*, 2005), ou le calcul d'attributs sismiques particuliers, comme la semblance. C'est à partir de tels attributs qu'une méthode de construction utilisant une double transformée de Hough a été développée

pour extraire automatiquement et séparément les failles (Jacquemin et Mallet, 2005).

L'interprétation sismique demande également de visualiser de gigantesques volumes de données. Pour cela, nous avons travaillé, en partenariat avec la compagnie EarthDecision et le Loria, sur la parallélisation à la fois du stockage des données et le traitement graphique de ces données (Castanié *et al.*, 2005 ; 2006).



FigGeodyn6 : Rendu volumique de données sismiques sans (A) ou avec (B) application d'un modèle d'illumination locales. Ce modèle d'illumination permet de mettre en évidence les horizons et les failles (voir flèches) en 3D.

## MAILLAGES 3D NON STRUCTURÉS

Les méthodes de maillages mises au point avant 2003 ont été prolongées pour permettre la visualisation de grilles fortement non structurées (Caumon *et al.*, 2005 ; Buatois *et al.*, 2006). Par ailleurs, nous avons montré comment utiliser ces maillages efficacement pour construire rapidement des surfaces complexes comme des dômes de sel (FigGeodyn7 ci-contre, Frank *et al.*, sous presse). Pour cela, nous proposons de calculer une fonction implicite sur tous les nœuds du maillage, en contraignant sa valeur à 0 au niveau de points de données, et son gradient par des points de contrôle placés interactivement. La surface est alors obtenue implicitement par une isovaleur de ce champ scalaire. L'originalité de cette approche réside dans la parfaite prise en compte des failles, et dans la gestion du niveau de précision souhaité par un raffinement adaptatif du maillage.

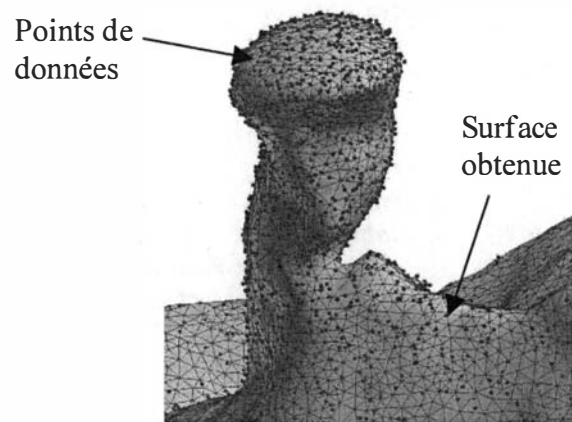
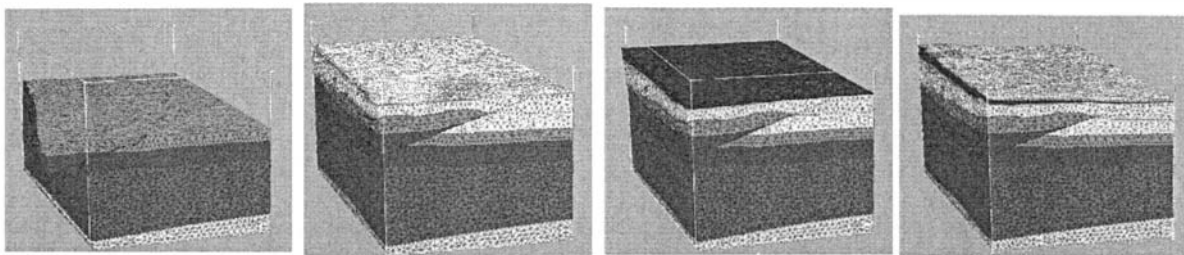


Fig. Geodyn7 : Reconstruction automatique d'un dôme de sel par fonction implicite à partir de points de données (avec l'aimable autorisation de Shell)

## RESTAURATION 3D DE STRUCTURES GÉOLOGIQUES : DES CLÉS POUR VALIDER ET PRÉDIRE

La reconstruction 3D des objets géologiques s'appuie avant tout sur l'intégration quantitative des données d'observation. La prise en compte des processus géologiques ne peut donc se faire que de manière indirecte. Outre l'observation, une validation quantitative des géo-modèles est donc nécessaire. Dans le cas des formations sédimentaires, elle passe en particulier par la restauration des structures. Pour cela, une

approche par éléments finis a été développée, sous une hypothèse de comportement élastique. La relaxation dynamique a été utilisée pour gérer les failles (FigGeodyn8 ci-après). Ces approches fournissent une carte 3D des déformations subies par le modèle au cours du temps, lesquelles sont un indice de réalisme, et, dans certains cas, fournissent de précieuses informations sur les réseaux de fractures.



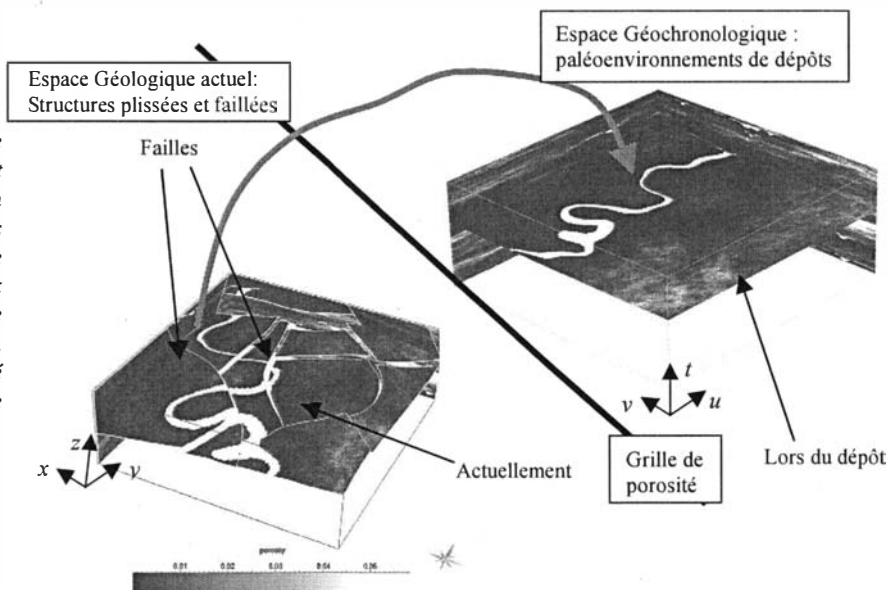
FigGeodyn8 : Restauration couche par couche d'une structure faillée synsédimentaire (modèle Chevron/Harvard)

**MISE EN ŒUVRE DES CONCEPTS DE CHRONOSTRATIGRAPHIE  
DANS LES MODÈLES D'ARCHITECTURE STRATIGRAPHIQUE.**

La mise en forme mathématique des concepts de stratigraphie séquentielle est une approche originale développée dans le projet Gocad (Mallet, 2004 ; Moyen *et al.*, 2004). Elle définit les horizons géologiques comme des surfaces équipotentiels du temps géologique (FigGeodyn9). Ce modèle géochronologique permet d'une part de découpler la représentation de la géométrie du sous-sol de la

représentation de ses propriétés pétrophysiques (Mallet, 2004, Caumon *et al.*, 2004). D'autre part, il donne accès au taux de sédimentation, qui peut être utilisé en liaison avec les variations eustatiques et le taux de subsidence pour calculer des probabilités de faciès en tout point de l'espace géologique (Kedzierski *et al.*, 2007).

FigGeodyn9 : Principe du modèle Géochron, et résultat de la modélisation du champ de porosité dans un réservoir fluviatile faillé. À gauche : deux sections verticales et une surface isochrone faillée. À droite : cube de porosité construit dans l'espace chronostratigraphique.



**CARACTÉRISATION DE RÉSERVOIRS FRACTURÉS**

La distribution de fractures dans le sous-sol est extrêmement difficile à appréhender à partir des données du sous-sol. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés à la génération stochastique de réseaux de fractures à partir des déformations calculées par restauration structurale (Macé *et al.*, 2004 ; 2005 ; Royer *et al.*, 2004). Dans des réservoirs fracturés, ces réseaux

sont constitués typiquement par des millions de fractures. Il est donc indispensable d'effectuer une mise à l'échelle avant d'envisager une simulation d'écoulement. Cette mise à l'échelle a fait l'objet d'un travail original qui offre un excellent compromis entre précision, rapidité et facilité d'exécution (Vitel, 2006).



## MODÉLISATION DES INCERTITUDES

Tout modèle tridimensionnel du sous-sol est empreint d'incertitudes. La gestion du risque sismique ou pétrolier passe nécessairement par une modélisation de ces incertitudes, qui concernent à la fois la géométrie des objets géologiques et leurs propriétés. Les résultats obtenus par l'équipe pour la modification interactive des géométries d'horizons et de failles sous contraintes de cohérence géologique (Caumon *et al.*, 2004 ; Tertois *et al.*, 2007) sont des points-clés pour cette modélisation, car ils permettent de générer plusieurs modèles

possibles en perturbant une interprétation de référence.

L'intégration des incertitudes dans les processus d'analyse de risque est une tâche complexe qui doit déterminer et classer les paramètres incertains les plus significatifs. Dans ce cadre, nous avons également développé un cadre théorique et logiciel pour calculer l'impact d'un ensemble de paramètres incertains sur la réponse du modèle (Fetel et Caumon, sous presse).

## SOURCE DE FINANCEMENT

Consortium Gocad

## PROCESSUS MAGMATIQUES

**Participants :** Pierre Barbey, Peter Burnard, Françoise Chalot-Prat, Alain Cheilletz, Etienne Deloule, Stéphanie Duchêne, François Faure, Béatrice Luais, Daniel Ohnenstetter, Maryse Ohnenstetter, Laurie Reisberg

**Doctorants et post-doctorants :** Elsa Pupier (2006), Mathieu Roskosz (2004), Olivier Rabeau, Clément Yonta Ngoune, Benoît Welsch

**Collaborations :** A-S. André (G2R), M-C Boiron (G2R), J.P. Burg, (Zürich), F. Bussy (Lausanne), K. Farley (Caltech), T. Fischer (New Mexico), D. Gasquet (Chambéry), D. Graham (Oregon), C. Harris (Afrique du Sud), D. Hilton, (Scripps), J. Leroy (G2R), C. Pin (Clermont), J. Pons (Orléans), M. Toplis (Toulouse), M. Tredoux (Afrique du Sud), X. Zhi (Chine)

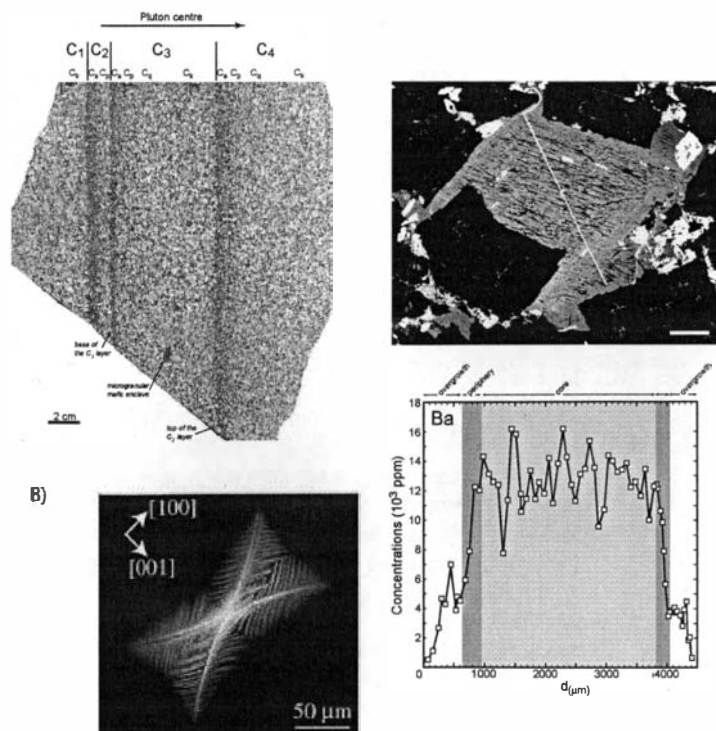
## STRUCTURES ET TEXTURES ASSOCIÉES À LA CRISTALLISATION DES MAGMAS

Les textures sont des marqueurs potentiels des processus magmatiques et peuvent donc, à ce titre, apporter des contraintes fortes sur les mécanismes et la cinétique de mise en place des magmas (FigGeodyn10 ci-contre).

*FigGeodyn10 : Structures et textures des roches magmatiques. A) Litage dans le pluton du Dolbel, Niger (thèse E. Pupier 2006) B) Olivine dendritique (photo F. Faure) C) Zonation dans un plagioclase (thèse E. Pupier, 2006).*

Les approches expérimentales visent à établir le lien entre croissance cristalline, histoire du refroidissement des magmas, et texture des roches magmatiques. Plusieurs études ont été menées dans ce sens.

1) En partant d'un liquide juste au-dessus de la transition vitreuse, les expériences de dévitrification



ont mis en évidence la facilité de germination et de cristallisation de phases métastables et non stoechiométriques (Roskosz *et al.*, 2005),

2) En partant d'un liquide surchauffé, des expériences de cristallisation dynamique ont permis d'associer les variations de morphologie de l'olivine aux processus contrôlant la croissance cristalline (Faure *et al.*, 2007) et d'expliquer l'origine des inclusions magmatiques dans les olivines en fonction des mécanismes de croissance mis en jeu (Faure et Schiano, 2005). L'application de ces recherches purement expérimentale a permis d'apporter des réponses à des énigmes telles que les mécanismes de cristallisation impliqués dans la formation de la texture spinifex des komatiites (Faure *et al.*, 2006) ou la dynamique dans les chambres magmatiques des rides océaniques (Faure et Schiano, 2004).

3) Des expériences de cristallisation réalisées sur des basaltes ont permis d'estimer les influences relatives de la vitesse de refroidissement, de l'accrolement de cristaux et du mode de nucléation sur l'évolution des distributions de tailles de cristaux (CSD) de plagioclases au cours de la cristallisation (thèse E. Pupier 2006, Pupier *et al.*, subm). La forme log-linéaire décroissante des CSD est expliquée par une décroissance exponentielle du taux de nucléation en fonction du temps au début du processus de cristallisation. Cependant, lors du refroidissement, la pente des CSD s'aplatit de façon significative. Les textures montrent que cela résulte principalement d'un processus d'agglomération des cristaux, qui conduit à une diminution relative du nombre de petits cristaux au profit des plus gros. Nous montrons par ailleurs que l'histoire thermique au-dessus du liquidus a un rôle majeur sur la cristallisation (nucléation hétérogène dominante).

Parallèlement aux études expérimentales, l'étude des complexes lités a permis de mettre

en évidence l'interaction entre les processus pétrologiques (cristallisation fractionnée) et mécaniques (sédimentation, convection compositionnelle, compaction, gonflement des intrusions par recharges magmatiques) dans la genèse du litage.

Dans le pluton alcalin du Dolbel, nous montrons (Pupier *et al.* soumis), à partir de l'étude des textures et des gradients chimiques dans les phases minérales (i) que la cristallisation fractionnée joue un rôle fondamental dans le développement du litage au cours de la mise en place des plutons (ii) que non seulement elle n'est pas antagoniste d'une mise en place par injection pulsée comme couramment considéré par de nombreux auteurs, mais qu'elle est étroitement liée à ce processus. Dans les plutons calco-alcalins de Tarçouate (Maroc) (Pons *et al.* 2006) et Budduso (Sardaigne) (Barbey *et al.* soumis), nous montrons (i) que le développement du litage est étroitement lié à une convection locale (et non pas à l'échelle du corps plutonique) probablement stimulée par l'injection intermittente de magma mafique dans un magma granodioritique en cours de cristallisation (ii) que les mélanges magmatiques peuvent localement avoir un rôle important sur le développement des schlieren et du litage.

Enfin, nous avons abordé le rôle de la cinétique sur les réactions se produisant à la transition solide-liquide, aussi bien lors de la fusion partielles (migmatites, granulites) que de la cristallisation (granites alumineux). A partir de l'étude des intercroissances que forment le grenat, la cordiérite et la tourmaline avec le quartz, nous montrons que la déstabilisation de la biotite et la croissance des minéraux ferromagnésiens alumineux résultent d'un processus unique lié aux propriétés de diffusion de Si et Al dans les liquides silicatés (Barbey, accepté).

## LE MAGMATISME DU MANTEAU

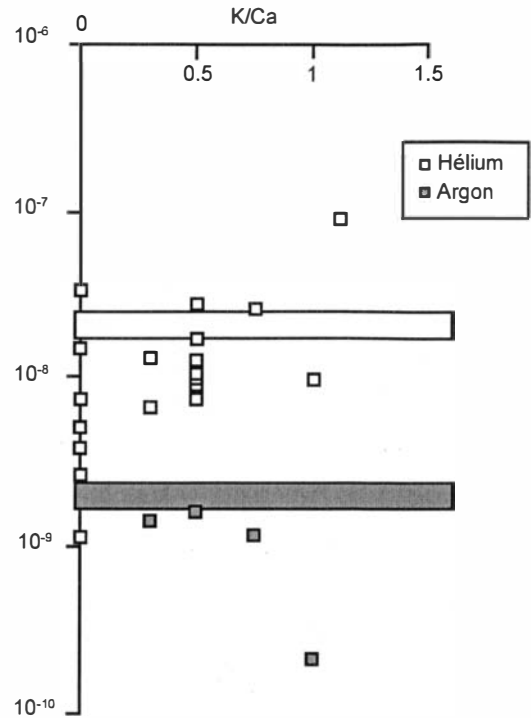
La signature géochimique d'un magma provenant du manteau est contrôlée à la fois par la composition de la source, par les processus de fusion partielle et de différenciation, et par l'interaction éventuelle avec la lithosphère. Les gaz rares sont parmi les outils les plus adaptés pour étudier ces processus. Le laboratoire des Gaz Rares du CRPG a suivi deux pistes afin d'aborder ce sous thème. 1) l'étude d'échantillons synthétiques (olivines et verres de carbonatite ou de silicate), équilibrés avec une atmosphère enrichie en gaz rares au Laboratoire Haute Température du CRPG et puis analysés au laboratoire des gaz rares et 2) l'analyse d'échantillons naturels, notamment les verres basaltiques des rides médio-océaniques et des gaz volcaniques de Tanzanie. L'objectif des expériences à haute température

était de contraindre le partage des gaz rares entre plusieurs phases fondues lors de la fusion du manteau. Principalement, nous avons étudié le partage de l'He et de l'Ar entre des liquides carbonatés (qui existent dans le manteau, et qui forment des réservoirs importants pour les éléments incompatibles) et des phases silicatées, solides ou liquides (FigGeodyn11 page suivante). Nous nous sommes intéressés également au problème du partage de l'He entre les olivines et les liquides silicatés. Nous avons constaté qu'il existe au moins deux sites de solubilité de l'He dans les grains d'olivine, ce qui remet en cause les études antérieures.

En parallèle, nous analysons des échantillons naturels, notamment des gaz volcaniques de Tanzanie, produits du seul volcan carbonatitique mondial, et une série de verres basaltiques

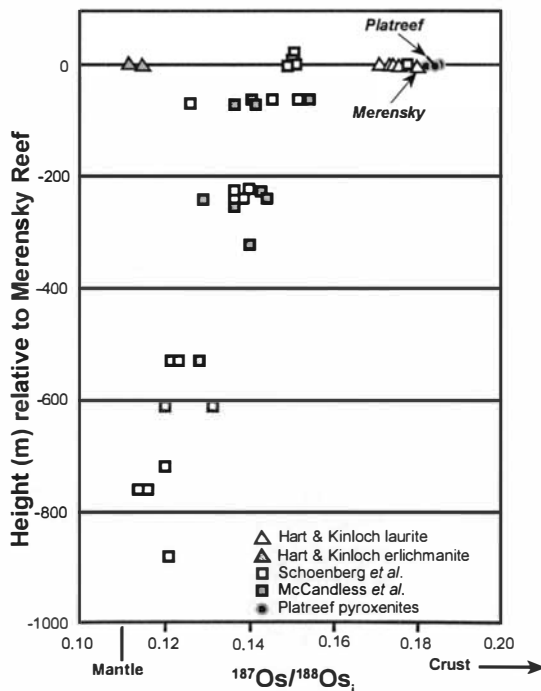
provenant de la ride du Galápagos est en cours. A cause de son interaction ride - panache, cette ride est la cible de plusieurs études géophysiques et géochimiques, dans lesquelles le laboratoire gaz rares du CRPG est impliqué pour l'étude des gaz rares légers (He, Ne, Ar). Les premiers résultats montrent que, alors que l'He est dominé par une origine asthénosphérique, le Ne provient essentiellement du panache.

Une autre facette du magmatisme mantellique investiguée au CRPG concerne l'interaction tectonique et géochimique entre le volcanisme et la lithosphère océanique ou continentale. Le rapport entre le magmatisme et le développement de la lithosphère océanique est également abordé sous le rubrique «Rifting». Dans une étude d'une ophiolite alpine (Chenaillet-Alpes), nous démontrons le lien entre le volcanisme et les processus tectoniques lithosphériques (Chalot-Prat, 2005). L'étude de l'interaction entre le magmatisme mantellique et la lithosphère continentale montre qu'elle donne lieu à la modification des compositions géochimiques des basaltes, mais également à celles des péridotites lithosphériques, notamment en ce qui concerne les éléments hautement sidérophiles, comme le Re et l'Os (Reisberg et al., 2004; 2005).



FigGeodyn11. Solubilité de l'He et de l'Ar dans les liquides carbonatés selon le rapport K/Ca. Les expériences ont montré que les solubilités de l'He et de l'Ar dans des liquides carbonatés (carrés blancs - He; carrés gris - Ar) et silicatés (rectangle blanc - He; rectangle gris - Ar) ne sont pas très différentes.

LES CONCENTRATIONS MÉTALLIFÈRES LIÉES DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT AU MAGMATISME



FigGeodyn12. Rapports  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  initiaux (à 2.05 Ga) des pyroxénites du Platreef comparés à d'autres données isotopiques d'Os du Bushveld. La similarité entre la composition isotopique du Platreef (lobe du Nord) et celle du Merensky Reef (lobes de l'est et de l'ouest) suggèrent une parenté entre les deux gisements. Un composant crustal important est exigé dans ces deux zones de minéralisation.

Le magmatisme induit parfois des concentrations en métaux précieux, comme les éléments du groupe du platine (EGP). Cependant, les mécanismes exacts de cette concentration (ségrégation des sulfures, hydrothermalisme...) restent très débattus. Cette controverse est particulièrement vive pour le complexe du Bushveld, en Afrique du Sud, qui représente la source la plus importante des EGP au monde. Nous avons entrepris une étude Re-Os du Platreef, dans le lobe du Nord du Bushveld, un gisement d'EGP qui a été peu exploité jusqu'à récemment. Notre but était de mieux comprendre le lien entre ce gisement et les autres minéralisations en EGP du Bushveld. Nos résultats (FigGeodyn12 ci-contre) ont démontré une parenté entre le Platreef et le célèbre Merensky Reef de la partie principale du Bushveld, avec un taux important de contamination crustale profonde dans les deux cas (Tredoux et al., soumis).

Le magmatisme provoque un transfert de matière entre le manteau et la croûte, ainsi que dans la croûte elle-même, et donne souvent lieu à la concentration de métaux précieux. Nous nous intéressons à deux cas particuliers, celui des gisements de l'argent et de l'or de l'Anti-Atlas marocain et celui de la ceinture centrale Mexicaine. Il s'agit de mettre en évidence le rôle des multiples réservoirs de la lithosphère continentale dans l'origine du stock de métal concentré. Le gisement d'Imiter, gisement associé à l'évolution tardi-panafricaine de la marge continentale Anti-atlasique (Gasquet *et al.*, 2005), est aujourd'hui, avec un potentiel de 8000 t d'Ag, un des tout premiers sites de production d'Ag dans le monde. Les travaux de thèse de Gilles Levresse ont permis d'établir l'âge et la source de la minéralisation, notamment au moyen de l'utilisation de la sonde ionique CAMECA IMS 1270 du CRPG et des traceurs isotopiques Re-Os et soufre (Cheilletz *et al.*, 2002; Levresse *et al.*, 2004). Pour la Société minière partenaire, l'établissement d'un nouveau modèle métallogénique de type épithermal permet de produire des guides d'exploration extrêmement efficaces sur le plan tactique et sur le plan stratégique. Au Mexique, les premiers résultats des travaux conduits en collaboration avec l'UNAM

(Centre de Quérétaro) montrent pour la première fois l'implication d'un magmatisme de type adakitique dans la genèse des minéralisations Au-Fe de type skarn. Ces travaux se poursuivent aujourd'hui avec notamment la réinterprétation des modèles génétiques de certains gisements de type VMS (Francisco y Madero) ou skarn (Charcas). Les implications de ces études sur les stratégies d'exploration minière dans ces pays sont également développées en partenariat avec les entreprises concernées.

Un nouveau projet de collaboration scientifique avec le Bureau de Recherches et de Participations Minières (BRPM-Maroc) est en cours. Il porte sur l'étude métallogénique des principaux gisements et indices de métaux précieux de l'Anti-Atlas marocain (Thèse E. Pelleter). Enfin, la compréhension et la quantification des processus de transfert dans la lithosphère ne peut être abordée aujourd'hui sans la modélisation géométrique et numérique des objets géologiques. Ce nouveau thème de recherche est abordé en collaboration avec nos collègues du projet Gocad grâce à une thèse en co-tutelle (UQAM-Montréal, INPL) portant sur la plus grande ceinture volcano-sédimentaire archéenne de la planète, la sous-province de l'Abitibi (Thèse O. Rabeau).

## SUBDUCTION - EXHUMATION

**Participants :** Pierre Barbey, Etienne Deloule, Stéphanie Duchêne, Mary Ford, Christian Le Carlier De Veslud, Béatrice Luais, Laurie Reisberg

**Doctorants et post-doctorants :** Sandra Birtel (post-doc), Anne-Sophie Bouvier, Laure Martin (2004), Céline Martin, Francesca Micheletti (2005), X. Yang, L. Zheng

**Collaborations :** O. Vanderhaeghe, C. Hibsich (G2R, Nancy); J. de Sigoyer, B. Goffé, P. Philippot (Paris); D. Chen, QK Xia, X. Zhi (Chine), S. Chakraborty (Ruhr-Universität Bochum, Allemagne), F. Cagnard et D. Gapais (Rennes), Y. Denèle, G. Gleizes, P. Olivier (Toulouse), F. Micheletti, A.M. Fornelli, G. Piccareta (Bari)

## TRANSFERTS LORS DE LA SUBDUCTION

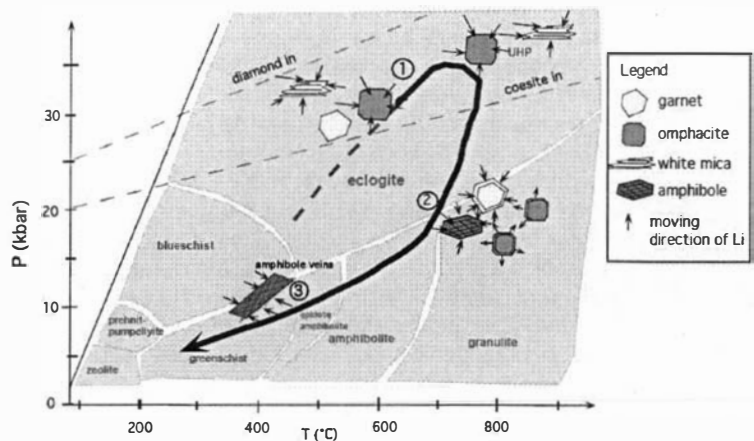
Les transferts élémentaires qui ont lieu lors de la subduction ont été abordés par l'étude d'éclogites et autres roches de haute et très haute pression, qui sont des témoins directs de la plaque subductée, et par l'étude de roches volcaniques, qui portent la signature de l'effet de la subduction sur leurs régions sources. Dans le cadre d'une collaboration avec l'Université des Sciences et Technologies de Chine (USTC, Hefei), les éclogites de deux localités de la ceinture ultra-haute pression des Dabie Shan (Bixilling et Shuanghe) ont été l'objet d'une étude pétrographique et géochimique pour décrire le comportement des fluides et des éléments légers lors du cycle subduction-exhumation. Des éclogites de compositions variées (mafique ou felsique, anhydre ou incluant des minéraux

hydratés –phlogopite et/ou mica-) ont été analysées. L'étude pétrographique et isotopique montre que, au cours de la subduction, ces roches ont conservé leur composition isotopique initiale, avec des signatures continentales marquées ( $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  très négatifs) préservées dans les phases progrades de l'ensemble des échantillons, excluant donc une interaction significative avec le manteau. L'analyse des phases rétrogrades (amphibole, feldspath) montrent par contre qu'au cours de l'exhumation, des fluides présentant des signatures isotopiques mantelliques ont interagi de façon limitée avec les éclogites, les produits de cette altération ne représentant qu'une petite portion des roches (Birtel and Deloule, in prep). La distribution chimique et isotopique du Lithium et du Bore met en évidence une très faible mobilité

du Li lors du trajet prograde, avec un fort enrichissement des clinopyroxènes (>200 ppm dans les omphacites) et des micas (> 300 ppm dans les micas blancs) formés à haute pression. Par opposition le B reste à des teneurs de quelques ppm à quelques dizaines de ppm, sans enrichissement sensible. La signature isotopique du lithium, comme celles de l'hydrogène et de l'oxygène, ne semble pas affectée par la subduction, avec des compositions homogènes aux cœurs des minéraux progrades, représentatives des roches sources. L'appauvrissement et le fractionnement isotopique du Li observés aux bordures des minéraux mettent en évidence sa lixiviation partielle lors de l'exhumation des éclogites. Ainsi les éclogites échangeraient plus de Li avec leur environnement lors de leur exhumation que lors de leur subduction. (Birtel, Deloule, Philippot and Chen, soumis à GCA) (FigGeodyn13 ci-dessus).

Parallèlement à l'étude du lithium, la systématique Re-Os des éclogites des Dabie Shan a été étudiée dans le cadre de la thèse en co-tutelle (CRPG-USTC) de Lei Zheng. Les résultats montrent une perte importante de Re lors de la subduction et/ou de l'exhumation. Cette observation est en opposition avec la mobilité très limitée des éléments légers. La perte de Re lors de la subduction suggère qu'il y ait peu de re-injection de cet élément dans le manteau convectif. Par contre, la mobilité de l'Os lui-même semble limitée lors de la subduction aux Dabie Shan. Ceci est confirmé par l'étude du massif péridotitique de Raobazhai, dans le nord des Dabie, qui représente le manteau lithosphérique au-dessus de la zone de subduction (Zheng *et al.*, soumis). Malgré l'évidence d'une interaction très forte entre des fluides et la péridotite, les isotopes de l'Os n'ont pas été perturbés et retiennent une signature ancienne. Ce constat va à l'encontre d'études de beaucoup d'autres régions qui suggèrent un transfert important de l'Os vers le prisme mantellique lors de la subduction.

Un aspect complémentaire des transferts lors de la subduction est abordé dans la thèse débutée en 2005 par Anne Sophie Bouvier intitulée « Étude des magmas primitifs des Petites Antilles par les inclusions vitreuses préservées dans les olivines des basaltes », co-encadrée par E. Deloule et N. Metrich, dans le cadre du chantier « ANTILLES » de l'INSU et financé par l'ANR CATEL portée par C. Chauvel et M. Pichavant. L'étude chimique et isotopique des inclusions vitreuses préservées



FigGeodyn13. Mobilité de lithium dans les différentes phases lors du métamorphisme prograde (subduction) et retrograde (exhumation) des éclogites des Dabie Shan.

dans les olivines entraînées par les laves des volcans des Antilles permettent de caractériser les magmas sources de ces laves, avant qu'ils ne soient affectés par le processus éruptif. Les premiers résultats obtenus sur les laves de St Vincent montrent des signatures chimiques et isotopiques majoritairement proche des MORB, auxquels viennent s'ajouter deux contributions distinctes, l'une avec une signature sédimentaire, l'autre avec une signature de croûte océanique subductée, montrant ainsi une contribution identifiable mais minoritaire de ces deux composantes de la subduction sous l'arc des Antilles. Ce travail va être poursuivi en étudiant des laves de Grenade et de la Guadeloupe, pour essayer de voir comment l'importance de ces contributions peut varier le long de l'arc des Antilles.

Les phénomènes de transferts de fluides dans les structures superficielles des zones de subduction sont également abordés. Les études menées sur le prisme d'accrétion de Nankai dans le cadre du programme ODP ont permis de montrer les modalités originales de mise en place du décollement, alliant des processus de compaction des matériaux argilo-silteux avec des phénomènes de fracturation dilatante. Des travaux de modélisation numérique de la circulation de fluides le long du décollement entre la zone sismogénique et le front du prisme d'accrétion ont également permis de proposer un modèle de transfert de la pression de fluide le long du décollement en considérant que la perméabilité augmente dans le décollement quand la pression effective diminue. Ce modèle aboutit à la propagation d'une onde solitaire de pression de fluide le long du décollement à des vitesses compatibles avec les constantes de temps du cycle sismique (Bourlange and Henry, 2007). Ce travail va être poursuivi notamment lors

des nouvelles campagnes IODP sur le prisme d'accrétion de Nankai qui débuteront à l'automne

2007, et qui ont pour objectif de forer la zone sismogénique de cette zone de subduction.

#### CINÉTIQUE ET CINÉMATIQUE DE L'EXHUMATION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

Comprendre les processus d'exhumation des roches métamorphiques est une question centrale des études géodynamiques des chaînes de montagnes depuis une quinzaine d'années. Nous avons abordé ce problème essentiellement sous l'angle de la caractérisation du trajet Pression-Température-temps (PTt) des roches métamorphiques dans différents contextes géodynamiques: le contexte alpin (avec deux cibles: les Alpes et la mer Egée), dominé par un métamorphisme HP/BT, le Svécofennien de Finlande et le domaine Varisque (Massif Central, Pyrénées, Calabre), dominés par des contextes MP/MT ou MP/HT.

L'étude des roches métamorphiques de Naxos (mer Egée) fait partie d'un projet commun entre le G2R et le CRPG. Le contexte géodynamique

favorable de l'île de Naxos nous a permis d'étudier le comportement des chronomètres U-Pb sur zircons et Sm-Nd et Rb-Sr sur minéraux au cours du métamorphisme. La croissance des zircons et la signification des âges U-Pb a été tracée de manière originale en mettant en corrélation la composition isotopique de l'oxygène des zircons et celle des grenats (FigGeodyn14 ci-dessous), et en étudiant les zonations des zircons en éléments traces (thèse L. Martin 2004, Martin *et al.*, 2006, Martin *et al.* subm). Cette étude montre qu'il est possible 1) de discuter les mécanismes de croissance des zircons à l'aide du traçage géochimique 2) d'associer la croissance du zircon à celle des minéraux cardinaux du métamorphisme et aux circulations de fluides 3) que la croissance métamorphique

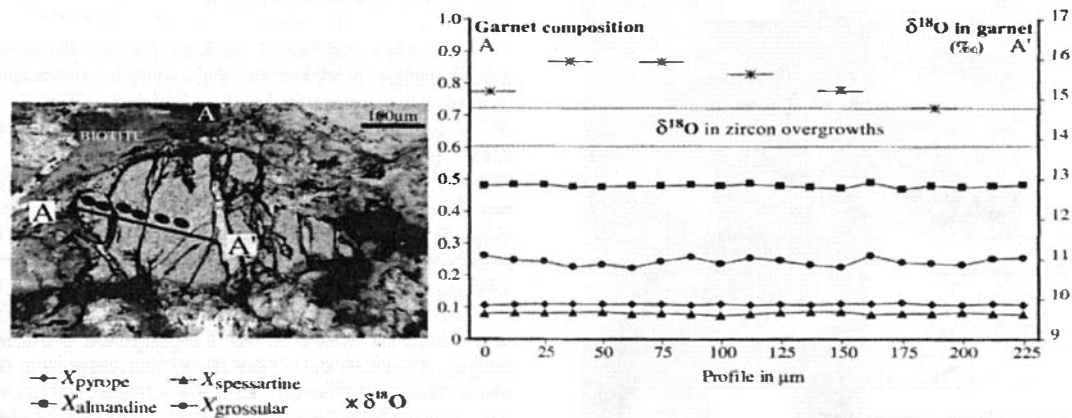


Fig. Geodyn14. Comparaison des compositions isotopiques de l'oxygène dans les grenats et les zircons métamorphiques de l'île de Naxos (Martin *et al.*, 2006).

du zircon n'est pas nécessairement associée au pic de température enregistré par les minéraux métamorphiques, mais que lithologie, circulations de fluide et pression pourraient être les facteurs dominant le contrôle de la croissance des zircons. L'association des données U-Pb, Rb-Sr et Sm-Nd et des données pétrologiques a permis de retracer à divers niveaux structuraux du dôme les trajets PTt (Duchêne *et al.*, 2006; thèse L. Martin 2004).

L'étude des trajets PTt des roches métamorphiques dans le domaine alpin s.l., (domaine égéen et Alpes Occidentales) a été comparée à celle de l'évolution superficielle (érosion, sédimentation) enregistrée dans les bassins sédimentaires afin de discuter des conditions et des mécanismes de l'exhumation des roches métamorphiques. Le résultat essentiel de ces confrontations (Ford *et al.*, 2006) est que l'exhumation profonde n'est pas contemporaine

de la création de relief et de la période d'érosion paroxysmale. Dans les Alpes, nous mettons de plus en évidence que les vitesses d'exhumation excèdent les vitesses de la tectonique des plaques estimées par les reconstitutions paléomagnétiques, ce indique soit une prédominance des forces de volumes, soit une expulsion de croûte profonde par constriction sur la bordure transpressive de la chaîne.

En combinant études structurales, pétrologiques et géochronologiques, nous avons abordé l'analyse du comportement mécanique des lithosphères continentales en compression en fonction de leurs caractéristiques thermiques dans des domaines crustaux HT-MT. L'approche a été appliquée à l'évolution de la croûte Paléoprotérozoïque du Svécofennien de Finlande (Cagnard *et al.*, 2007) et à celle de la croûte plus Varisque) des dômes gneissiques de

Calabre (Micheletti *et al.*, 2007) et des Pyrénées (Denèle *et al.*, soumis). Dans de nombreuses zones de collision il existe de fortes évidences de localisation de la déformation et de couplage entre croûte et manteau lithosphérique (par exemple, exhumation des domaines éclogitiques, grands décrochements). Cependant, il existe de vastes domaines, répandus dans les zones orogéniques anciennes, où affleure la croûte moyenne ou inférieure, souvent partiellement fondue. Ces affleurements de domaines crustaux HT-MT se caractérisent généralement par l'absence de reliques de roches de haute pression dont l'exhumation semble souvent intervenir précocement dans l'histoire collisionnelle. Ces observations suggèrent un découplage au niveau de la croûte inférieure. Nous montrons sur l'exemple du Paléoproterozoïque de Finlande (i) que le raccourcissement régional est accommodé par un épaissement distribué sans évidence de grand chevauchement, (ii) qu'il n'existe pas d'effondrement gravitaire associé à des cisaillements normaux, et (iii) que l'exhumation est fondamentalement contrôlée par une compétition

entre érosion et épaissement crustal. Des comportements similaires sont également mis en évidence dans les Pyrénées.

Au contraire, une campagne de datations  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur les formations métamorphiques du Limousin à l'échelle régionale permet de proposer deux phases d'exhumation, et de les associer chacune à une période d'extension (Le Carlier, C. *et al.*, in prep). La première est mise en évidence par des âges argon constants à 335 Ma, sur près de 200 km du nord Limousin à la Sioule et la Brevenne. Ces âges sont interprétés comme traduisant, 15-20 Ma après la fin de la tectonique des nappes, la mise en place d'un régime d'extension syn-collisionnelle dans les zones internes de la chaîne, alors que la compression était encore active au nord et au sud de la chaîne. La seconde période d'extension peut être reliée à l'effondrement de la chaîne varisque vers 300 Ma. Dans le Limousin, cette extension se traduit par l'émergence du complexe leucogranitique de Saint Sylvestre, par glissement latéral de sa couverture métamorphique.

## LES PUBLICATIONS RELATIVES AU THÈME GÉODYNAMIQUE : COUPLAGES ENTRE PROCESSUS SUPERFICIELS ET PROFONDS.

Les publications du CRPG sont présentées suivant la méthode d'évaluation par quartiles utilisée par la section 18 du Comité National du CNRS.

Le premier quartile (A1) correspond aux revues ayant un impact factor supérieur ou égal à 1,6  
Le deuxième quartile (A2) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 1 et 1,6  
Le troisième quartile (A3) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 0,6 et 1  
Le quatrième quartile (B) correspond aux revues ayant un impact factor inférieur à 0,6

### PUBLICATIONS DE RANG A1

- |  |   |
|--|---|
| <p><b>Barbey P.</b> Diffusion-controlled biotite breakdown reaction textures at the solid/liquid transition in the continental crust. <i>Contrib. Mineral. Petrol.</i>, accepté</p> <p><b>Ford M., Le Carlier de Veslud C., Bourgeois O.</b> (sous presse). Kinematic and Geometric Analysis of Fault-Related folds in a Rift Setting (Dannemarie Basin, Upper Rhine Graben, France). <i>J. Struct. Geol.</i></p> <p><b>Marignac C.</b> et Laumonier B. (sous presse) Comment on: "Structural, AMS and geochronological study of a laccolith emplaced during Late Variscan orogenic extension: the Rocles pluton (SE French Massif Central)" by Be Mezeme <i>et al.</i>, <i>Intern. J. Earth Sci.</i></p> <p><b>Martin L., Duchêne S., Deloule E., Vanderhaeghe O.</b> Mobility of trace elements and oxygen isotopes in metamorphism: consequences on geochemical tracing. <i>Earth Planet. Sci. Lett.</i>, accepté</p> <p><b>Montagner J. P., Marty B., Stuzmann E., Sicilia D., Cara M., Pik R., Lévêque J. J., Roult G., Beucler E., Debayle E.</b> (sous presse). Mantle upwellings and convective instabilities revealed by seismic tomography and helium isotope geochemistry beneath eastern Africa. <i>Geophys. Res. Lett.</i></p> <p><b>Pik R., Marty B., Carignan J., Yirgu G., Ayalew T.</b> Timing of East African Rift development in Southern Ethiopia: Implication for mantle plumes activity and evolution of topography. <i>Geology</i>, accepté.</p> <p><b>Pupier E., Duchêne S., Toplis M.</b> (sous presse). Experimental quantification of plagioclase crystal size distribution during cooling of a basaltic liquid. <i>Contrib. Mineral. Petrol.</i></p> | <p><b>Reisberg L., Rouxel O., Ludden J., Staudigel J. H. and Zimmermann C.</b> (sous presse) Re-Os results from ODP Site 801: Evidence for extensive Re uptake during alteration of oceanic crust, <i>Chem. Geol.</i></p> <p style="text-align: center;"><b>2007</b></p> <p><b>Barbey P.</b> (2007). Diffusion-controlled biotite breakdown reaction textures at the solid/liquid transition in the continental crust. <i>Contrib. Mineral. Petrol.</i>, <b>154</b>, 707-716.</p> <p>Bonhoure J., Kister P., Cuney M., <b>Deloule E.</b> (2007). Methodology for Rare Earth Element determinations of uranium oxides by ion microprobe. <i>Geostand. Geoanal. Res.</i>, <b>31</b>, 3, 209-226.</p> <p>Bourgeois O., <b>Ford M.</b>, Diraison M., <b>Pik R.</b>, Gerbault M., <b>Le Carlier de Veslud C.</b>, Ruby N. &amp; Bonnet S. (2007). Separation of rifting and lithospheric folding signatures in the NW-Alpine foreland. <i>Intern. J. Earth Sci.</i> 10.1007/s00531-007-0202-2.</p> <p>Cagnard F., Gapais D., <b>Barbey P.</b> (2007) Collision tectonics involving juvenile crust: the example of the southern Finnish Svecofennides. <i>Precambrian Res.</i>, <b>154</b>, 125-141.</p> <p>Desbois G., Ingrin J., Kita N. T., Valley J. W., <b>Deloule E.</b> (2007) New constraints on metamorphic history of Adirondack diopsides (New York, USA): Al and <math>d^{18}\text{O}</math> profiles. <i>Am. Mineral.</i>, <b>92</b>, 4, 453-459.</p> <p><b>Faure F.</b>, Schiano P., Troliard G., Nicollet C., Soulestin B. (2007) Textural evolution of polyhedral olivine experiencing rapid cooling rates. <i>Contrib. Mineral. Petrol.</i>, <b>153</b>, 4, 369-492.</p> |
|--|---|

- Ford M., Le Carlier de Veslud C., Bourgeois O. (2007). Kinematic and Geometric Analysis of Fault-Related folds in a Rift Setting (Dannemarie Basin, Upper Rhine Graben, France). *J. Struct. Geol.*, **29**, 1811-1830.
- Maurel O., Monié P., Pik R., Arnaud N., Brunel M., Jolivet M. (2007) The Meso-Cenozoic thermo-tectonic evolution of the Eastern Pyrenees: an  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  fission track and (U-Th)/He thermochronological study of the Canigou and Mont-Louis massifs. *Intern. J. Earth Sci.*, DOI : 10.1007/s00531-007-0179-x.
- Micheletti F., Barbey P., Fornelli A., Piccarreta G., Deloule E. (2007) Latest Precambrian to Early Cambrian U-Pb zircon ages of augen gneisses from the Calabria (Italy), with inference to the Alboran microplate in the evolution of the peri-Gondwana terranes. *Intern. J. Earth Sci.*, **96**, 843-860.
- Moune S., Faure F., Gauthier P. J., Sims K. W. W. (2007) Pele's hairs and tears: natural probe of volcanic plume. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **164**, 244-253.
- Pelleter E., Cheillettz A., Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., El Hakour A., Deloule E. and Féraud G. (2007) Hydrothermal zircons: a tool for ion microprobe U-Pb dating of gold mineralization (Tamlait-Menhouhou gold deposit - Morocco). *Chem. Geol.*, **245**, 135-161.
- Rohais S., Guillocheau F., Eschard R., Ford M. and Moretti I. (2007). Stratigraphic architecture of the Plio-Pleistocene infill of the Corinth rift : implications for its structural evolution. *Tectonophysics.* **440**, 5-28.
- Toomey D. R., Jousselein D., Dunn R. A., Wilcock W. S. D., Detrick R. S. (2007) Skew of mantle upwelling beneath the East Pacific Rise governs segmentation. *Nature*, **446**, 7134, 409-414.
- Wagner C. and Deloule E. (2007). Behaviour of Li and its isotopes during metasomatism of French Massif Central Iherzolites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 4279-4296.

## 2006

- Devineau K., Devouard B., Villieras F., Faure F., Devidal J. L., Kohler A. (2006) Evolution of product phase assemblages during thermal decomposition of muscovite under strong disequilibrium conditions. *Am. Mineral.*, **91**, 413-424.
- Extebarria M., Chalot-Prat F., Apraiz A., Eguluz L. (2006) Birth of a volcanic passive margin in Cambrian time: Rift paleogeography of the Ossa-Morena Zone, SW Spain. *Precambrian Res.*, **147**, 366-386.
- Faure F., Arndt N., Libourel G. (2006) Formation of Spinifex texture in komatiites: an experimental study. *J. Petrol.*, **47**, 8, 1591-1610.
- Ford M., Duchêne S., Gasquet D., Vanderhaeghe O. (2006) Two-phase orogenic convergence in the external and internal SW Alps. *J. Geol. Soc., London*, **163**, 815-826.
- Gleizes G., Crevon G., Asrat A., Barbey P. (2006) Structure, age and mode of emplacement of the Hercynian Borderes-Louron pluton (Central Pyrenees, France). *Intern. J. Earth Sci.*, **95**, 1039-1052.
- Marignac, C., Cathelineau, M. (2006). Comment on the paper by Sanchez-España *et al.*: source and evolution of ore-forming hydrothermal fluids in the northern Iberian pyrite belt massive sulphide deposits (SW Spain): evidence from fluid inclusions and stable isotopes (Mineralium Deposita 38: 519-537). *Mineral. Deposita*, **40**, 742-748.
- Martin L., Duchêne S., Deloule E., Vanderhaeghe O. (2006) The isotopic composition of zircon and garnet: A record of the metamorphic history of Naxos, Greece. *Lithos*, **87**, 3-4, 174-192.
- Pik R., Marty B., Hilton D. R. (2006) How many mantle plumes in Africa? The geochemical point of view. *Chem. Geol.*, **226**, 100-114.
- Pons J., Barbey P., Nachit H., Burg J. P. (2006) Development of igneous layering during growth of pluton: The Tarçouate Laccolith (Morocco). *Tectonophysics*, **413**, 271-286.
- Rossi P., Cocherie A., Fanning C. M., Deloule E. (2006) Variscan to eo-Alpine events recorded in European lower-crust zircons sampled from the French Massif Central and Corsica, France. *Lithos*, **87**, 3-4, 235-260.
- Schiano P., Provost A., Clocchiatti R., Faure F. (2006) Transcrystalline melt migration and earth's mantle. *Science*, **314**, 5801, 970-974.
- Xia Q. K., Yang X. Z., Deloule E., Sheng Y. M., Hao Y. T. (2006) Water in the lower crustal granulite xenoliths from Nushan, eastern China. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **111**, B11, B11202, doi:10.1029/2006JB004296.
- Yokochi R., Marty B. (2006) Fast chemical and isotopic exchange of nitrogen during reaction with hot molybdenum. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **G3**, **7**, Q07004.

## 2005

- Arndt N., Jenner G., Ohnenstetter M., Deloule E., Wilson A. H. (2005) Trace elements in the Merensky Reef and adjacent norites Bushveld Complex South Africa. *Mineral. Deposita*, **40**, 5, 550-575.
- Barbey P., Ayalew D., Yirgu G. (2005) Insight into origin of gabbro-dioritic cumulo-phyric aggregates from silicic ignimbrites: Sr and Ba zoning profiles of plagioclase phenocrysts from Oligocene Ethiopian Plateau rhyolites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **149**, 2, 233-245.
- Boyet M., Garcia M. O., Pik R., Albarède F. (2005) A search for  $^{142}\text{Nd}$  evidence of primordial mantle heterogeneities in plume basalts. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L04306, doi: 10.1029/2004GL021873.
- Chazot G., Charpentier S., Kornprobst J., Vannucci R., Luais B. (2005) Lithospheric mantle evolution during continental break-up: the West Iberia non-volcanic passive margin. *J. Petrol.*, **46**, 12, 2527-2568.
- Demouchy S., Deloule E., Frost D. J., Keppler H. (2005) Pressure and temperature-dependence of water solubility in Fe-free wadsleyite. *Am. Mineral.*, **90**, 7, 1084-1091.
- Faure F., Schiano P. (2005) Experimental investigation of equilibration conditions during forsterite growth and melt inclusion formation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 882-898.
- Féménias O., Ohnenstetter D., Coussaert N., Berger J., Demaiffe D. (2005) Origin of micro-layering in a deep magma chamber: evidence from two ultramafic-mafic layered xenoliths from Puy Beauvit (French Massif Central). *Lithos*, **83**, 3-4, 347-370.
- Fischer T. P., Marty B. (2005) Volatile abundances in the sub-arc mantle: insights from volcanic and hydrothermal gas discharges. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, **104**, 205-216.
- Gaffney A. M., Nelson B. K., Reisberg L., Eiler J. (2005) Oxygenium isotope systematics of West Maui lavas: a record of shallow-level magmatic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **239**, 122-139.
- Gasquet D., Levresse G., Cheillettz A., Azizi-Samir M. R., Mouttaqi A. (2005) Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian-Cambrian transition. *Precambrian Res.*, **140**, 1-2, 157-182.
- Lundstrom C. C., Chaussidon M., Hsui A. T., Kelemen P., Zimmerman M. (2005) Observations of Li isotopic variations in the Trinity ophiolite: evidence for isotopic fractionation by diffusion during mantle melting. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 6, 735-151.
- Meyzen C., Ludden J., Humler E., Luais B., Toplis M., Mével C., Storey M. (2005) New insights into the origin and distribution of the DUPAL isotope anomaly in the Indian Ocean mantle from MORB of the Southwest Indian Ridge. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **G3**, **6**, 11, 1-34.
- Pucéat E., Lécuyer C., Reisberg L. (2005) Neodymium isotope evolution of NW Tethyan upper ocean waters throughout the Cretaceous. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 3-4, 705-720.
- Reisberg L., Zhi X., Lorand J. P., Wagner C., Peng Z., Zimmermann C. (2005) Re-Os and S systematics of spinel peridotite xenoliths from east central China: Evidence for contrasting effects of melt percolation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **239**, 286-308.
- Roskosk M., Toplis M. J., Richet P. (2005) Experimental determination of crystal growth rates in highly supercooled aluminosilicate liquids: implications for rate-controlling processes. *Am. Mineral.*, **90**, 7, 1146-1156.



- Toplis M. J.** (2005) The thermodynamics of iron and magnesium partitioning between olivine and liquid: criteria for assessing and predicting equilibrium in natural and experimental systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **149**, 1, 22-39.
- Vielzeuf D., **Champenois M.**, Valley J. W., Brunet F., Devidal J. L. (2005) SIMS analyses of oxygen isotopes: Matrix effects in Fe-Mg-Ca garnets. *Chem. Geol.*, **223**, 4, 208-226.
- Yamamoto J., **Burnard P.** (2005) Solubility controlled noble gas fractionation during magmatic degassing: implications for noble gas compositions of primary melts of OIB and MORB. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 3, 727-734.
- Yokochi R., Marty B.** (2005) Geochemical constraints on mantle dynamics in the Hadean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **238**, 1-2, 17-30.

## 2004

- Alexandre P., **Chalot-Prat F.**, Saintot A., Wijbrans J., Stephenson R., Wilson M., Kithcka A., Stovba S. (2004)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of magmatic activity in the Donbass foldbelt and the Scythian platform (Eastern European Craton). *Tectonophysics*, **23**, 15.
- Ali Bouhifd M., Richet P., Besson P., **Roskosz M.** (2004) Redox state, microstructure and viscosity of partially crystallized basalt melts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **218**, 1-2, 31-44.
- Asrat A., **Barbey P.**, Ludden J., **Reisberg L.**, Gleizes G., Ayalew D. (2004) Petrology and isotope geochemistry of the Pan-African Negash Pluton, Northern Ethiopia: mafic-felsic magma interactions during the construction of shallow-level calc-alkaline plutons. *J. Petrol.*, **45**, 6, 1147-1179.
- Behrens H., Ohlhorst S., Holtz F., **Champenois M.** (2004)  $\text{CO}_2$  solubility in dacitic melts equilibrated with  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{CO}_2$  fluids: implications for modeling the solubility  $\text{CO}_2$  in silicic melts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 22, 4687-4703.
- Burnard P.** (2004) Diffusive fractionation of noble gases and helium isotopes during mantle melting. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **220**, 3-4, 287-295.
- Burnard P.**, Graham D., Farley K. (2004) Fractionation of noble gases (He, Ar) during MORB mantle melting: a case study on the Southeast Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **227**, 3-4, 457-472.
- Burnard P.**, Polya D. (2004) Importance of mantle derived fluids during granite associated hydrothermal circulation: He and Ar isotopes of ore minerals from Panasqueira. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 7, 1607-1615.
- Buschaert S., Fourcade S., Cathelineau M., **Deloué E.**, Martineau F., Ayt Ougougdal M. and Trouiller A. (2004) Widespread cementation induced by inflow of continental water in the eastern part of the Paris Basin: O and C isotopic study of carbonate cements, *Appl. Geochem.*, **19**, 1201-1215.
- Essaifi A., Capdevila R., Fourcade S., Lagarde J. L., Ballèvre M., **Marignac C.** (2004) Hydrothermal alteration, fluid flow and volume change in shear zones: the layered mafic-ultramafic Kettara intrusion (Jebilet Massif, Variscan belt, Morocco). *J. Metam. Geol.*, **22**, 1, 25-43.
- Faure F.**, Schiano P. (2004) Crystal morphologies in pillow basalts: implications for mid-ocean ridge processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **220**, 331-344.
- Ford M.** (2004) The significance of growth structures in foreland basin development. *Basin Res.*, **16**, 361-375.
- Henry P., **Bourlange S.** (2004) Smectite and fluid budget at Nankai ODP sites derived from cation exchange capacity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **219**, 1-2, 129-145.
- Hovis G. L., **Toplis M. J.**, Richet P. (2004) Thermodynamic mixing properties of sodium silicate liquids and implications for liquid-liquid immiscibility. *Chem. Geol.*, **213**, 1-3, 173-186.
- Hu R. Z., **Burnard P. G.**, Bi X.-W., Zhou M.-F., Pen J.-T., Su W.-C., Wu K.-X. (2004) Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River–Jinshajiang fault belt, SW China. *Chem. Geol.*, **203**, 305-317.
- Laporte D., **Toplis M. J.**, Seyler M., Devidal J. L. (2004) A new experimental technique for extracting liquids from peridotite at very low degrees of partial melting: application to partial melting of a depleted peridotite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **146**, 4, 463-464.
- Levresse G., **Cheilletz A.**, Gasquet D., **Reisberg L.**, **Deloué E.**, **Marty B.**, Kyser K. (2004) Osmium, sulphur, and helium isotopic results from the giant Neoproterozoic epithermal Imiter silver deposit, Morocco: evidence for a mantle source. *Chem. Geol.*, **207**, 1-2, 59-79.
- Levresse G., Gonzalez-Partida E., Carrillo-Chavez A., Tritla J., Camprubi A., **Cheilletz A.**, Gasquet D., **Deloué E.** (2004) Perology, U/Pb dating and (C-O) stable isotope constraints on the source and evolution of the adakite-related Mezcala Fe-Au skarn district, Guerrero, Mexico. *Mineral. Deposita*, **39**, 301-312.
- Luais B.** (2004) Temporal changes in Nd isotopic composition of Piton de la Fournaise magmatism (Réunion Islan, Indian Ocean). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **G3**, **5**, 1, 1-17.
- Marignac, C.** (2004). Comment on « Formation and evolution processes of the Salanfe W-Au-As-skarns (Aiguilles Rouges Massif, western Swiss Alps) » by Chiarad M. (*Mineral. Deposita* **38**, 154-168). *Mineral. Deposita* **39**, 396-398.
- Reisberg L.**, Alard O., Lorand J. P., **Ohnenstetter M.** (2004) Highly siderophile element behavior in high temperature processes. *Chem. Geol.*, **208**, 1-4.
- Reisberg L.**, Lorand J. P., Bedini R. M. (2004) Reliability of Os model ages in pervasively metasomatized continental mantle lithosphere: a case study of Sidamo spinel peridotite xenoliths (East African Rift, Ethiopia). *Chem. Geol.*, **208**, 119-140.
- Roskosz M.**, **Toplis M.**, Richet P. (2004) The structural role of Ti in aluminosilicate liquids in the glass transition range: insights from heat capacity and shear viscosity measurements. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 591-606.
- Rouxel O., Fouquet Y., **Ludden J.** (2004) Subsurface processes at the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic ridge: evidence from sulfur, selenium and iron isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 2295-2311.
- Seyler M., Lorand J. P., **Toplis M.**, Godard G. (2004) Asthenospheric metasomatism beneath the mid-ocean ridge: evidence from depleted abyssal peridotites. *Am. Mineral.*, **32**, 301-304.
- Tikhomirov P. L., **Chalot-Prat F.**, Nazarevitch B. P. (2004) Triassic volcanism in the eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. *Tectonophysics*, **381**, 119-142.
- Toplis M. J.**, Dingwell D. B. (2004) Shear viscosities of  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  and  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  liquids: implications for the structural role of aluminium and the degree of polymerisation of synthetic and natural aluminosilicate melts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 5169-5188.
- Xia Q. K., Dallai L., **Deloué E.** (2004) Oxygen and hydrogen isotope heterogeneity of clinopyroxene magacrysts from Nushan Volcano, SE China. *Chem. Geol.*, **209**, 137-151.
- Yokochi R., Marty B.** (2004) A determination of the neon isotopic composition of deep mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **225**, 77-88.

## PUBLICATIONS DE RANG A2

- Bourlange S.**, Henry P. (2007). Numerical model of fluid pressure solitary wave propagation along the décollement of an accretionary wedge, application to the Nankai wedge. *Geofluids*, **7**, 323-334.

- Dereje A., **Marty B.**, **Barbey P.**, Yirgu G., Ketefo E. (2006) Sub-lithospheric source for Quaternary alkaline Tepi shield, southwest Ethiopia. *Geochem. J.* **40**, 47-56.
- Cheilletz A.**, **Pelleter E.**, Martin-Izard A., Tornos F. (2005) World skarn deposits: skarns of Western Europe. *Econ. Geol. 100th Anniversary Volume*, 1-10.

- Roskosk M., Toplis M., Besson P., Richet P. (2005) Nucleation mechanisms: a crystal-chemical investigation of phases forming in highly supercooled aluminosilicate liquids. *J. Non-Cryst. Solids*, **351**, 14-15, 1266-1282.
- Seidel M., Pack A., Sharp Z. D., Seidel E. (2005) The Kakopetros and Ravdoucha iron-oxide deposits, Western Crete, Greece: fluid transport and mineralization within a detachment zone. *Econ. Geol.*, **100**, 1, 165-174.
- Rouxel O., Fouquet Y., Ludden J. (2004) Copper isotope systematics of the Lucky Strike, Rainbow and Logatchev seafloor hydrothermal fields on the Mid Atlantic Ridge. *Econ. Geol.*, **99**, 585-600.
- Vallance J., Boiron M.-C., Cathelineau M., Fourcade S., Varlet M., Marignac C. (2004). The granite-hosted gold deposit of Mouli, de Chéni (Saint-Yrieix district, Massif Central, France): petrographic, structural, fluid inclusion and oxygen isotope constraints. *Mineral. Deposita*, **39**, 265-281.

## PUBLICATIONS DE RANG A3

- Le Carlier de Veslud C., Cuney M., Lorilleux G., Royer J.J., Jébrac M., Kister P. (sous presse) 3D modelling of uranium-bearing solution-collapse breccias in Proterozoic sandstones (Athabasca Basin, Canada). *Computer & Geosci.*
- Le Carlier de Veslud C., Ford M., Moretti I. (sous presse). Preliminary 3D structural model for region of Aigion, Gulf of Corinth (Greece). *C. R. Geosciences*.
- Nkoumbou C., Yonta Ngouné C., Villiéras F., Barbey P., Njopwouo D., Yvon J. (sous presse). Petrogenesis of amphibole pyroxenites from the Pan-african Youné group (Cameroon): geodynamic implications. *J. Af. Earth Sci.*
- Pelleter E., Cheillett A., Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., El Hakour A. Feraud G. (sous presse). The Tamlat-Menouhou gold occurrence 'Eastern High Atlas, Morocco): a variscan mineralizing event at the northern border of the West African Craton. *J. Af. Earth Sci.*
- Xia Q.K., Chen D.G., Deloule E., Zhi X.C. (sous presse). Heterogeneity of hydrogen isotope composition of mantle-derived mica megacrysts: ion probe study. *Chinese Sci. Bull.*
- Xia Q.K., Chen D.G., Deloule E., Zhi X.C. (sous presse). Hydrogen isotope compositions of mantle-derived amphibole megacrysts from Qilin and its tectonic significance. *Chinese Sci. Bull.*
- Toteu S. F., Penaye J., Deloule E., Van Schmus W. R., Tchameni R. (2006). Diachronous evolution of volcano-sedimentary basins north of the Congo craton: Insights from U-Pb ion microprobe dating of zircons from the Poli, Lom and Yaounde' Groups (Cameroon). *J. Af. Earth Sc.*, **44**, 428-442.
- Toteu S. F., Fouateu R. Y., Penaye J., Tchakounte J., Seme Mouangue A. C., Van Schmus W. R., Deloule E., Stendal H. (2006). U-Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonic in southern Cameroon: consequence for the Pan-African orogenic evolution of the central African fold belt. *J. Af. Earth Sc.*, **44**, 479-493.

## 2005

- Abia E. H., Nachit H., Marignac C., Ibbi A., Ait Saadi S. (2005). Reply to discussion of « The polymetallic Au-Ag bearing veins of Bou Madine (Jbel Ougnat, eastern Anti-Atlas, Morocco) : tectonic control and evolution of a Neoproterozoic epithermal deposit ». *J. Af. Earth Sci.* **41**, 155-159.
- Barbey P., Macaudière J., Marignac C., Jabbori J. (2005) Les concentrations à sillimanite du Sud de Velay et l'évolution P-T-t fini-hercynienne dans le Massif central (France). *C. R. Géoscience*, **337**, 872-879.
- Caumon G., Lévy B., Castanié L., Paul J. C. (2005) Visualization of grids conforming to geological structures: a topological approach. *Computers & Geosciences*, **31**, 671-680.
- Le Carlier de Veslud C., Bourgeois O., Diraison M., Ford M. (2005) 3D stratigraphic and structural synthesis of the Dannemarie basin (Upper Rhine Graben). *Bull. Soc. géol. Fr.*, **176**, 433-442.
- Prevost M., Lepage F., Durlifsky L. J., Mallet J. L. (2005) Unstructured 3D gridding and upscaling for coarse modelling of geometrically complex reservoirs. *Petroleum Geoscience*, **11**, 339-345.
- Stone W.E., Deloule E., Beresford S.W. and Fiorentini M., 2005, Anomalous High  $\delta D$  Values for Archean Ferropicrite Melt: implications for magmatic and post-magmatic Crustal Evolution, *Can. Mineral.*, **43**, 1745-1758.

## 2007

- Numbem Tchakounté J., Toteu S. F., Randall Van Schmus W., Penaye J., Deloule E., al. e. (2007) Evidence of ca 1.6Ga detrital zircon in the Bafia Group (Cameroon): Implication for the chronostratigraphy of the Pan-African Belt north of the Congo craton. *C. R. Geosciences*, **339**, 132-142.
- Solgadi F., Moyen J. F., Vanderhaeghe O., Sawyer E. W. and Reisberg L. (2007) The relative contributions of crustal anatexis and mantle-derived magmas in the genesis of synorogenic, Hercynian granites of the Livradois area, French Massif Central, *Can. Mineral.*, **45**, 581-606.
- Toteu S. F., Yongue Fouateu R., Penaye J., Seme Mouangue A. C., Van Schmus W. R., Tchakounte J., Deloule E. H. Stendal H. (2007) Reply to the comment by Mvondo et al. on "U-Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonics in southern Cameroon: Consequence for the Pan-African orogenic evolution of the central African fold belt by Toteu et al., 2006" (*J. Af. Earth Sci.*, **44**, 479-493) *J. Af. Earth Sci.*, **48**, 53-54.

## 2006

- Duchêne S., Aïssa R., Vanderhaeghe O. (2006) Pressure-temperature-time evolution of metamorphic rocks from Naxos (Cyclades, Greece): constraints from thermobarometry and Rb/Sr dating. *Geodin. Acta*, **19/5**, 301-321.
- Lerouge C., Cocherie A., Toteu S. F., Penaye J., Milési J. P., Tchameni R., Nsifa E. N., Fanning C. M., Deloule E. (2006). Shrimp U-Pb zircon age evidence for Paleoproterozoic sedimentation and 2.05 Ga syntectonic plutonism in the Nyong Group, South-Western Cameroon: consequences for the Eburnean-Transamazonian belt of NE Brazil and Central Africa. *J. Af. Earth Sc.*, **44**, 413-427.
- Oberli F., Burg J. P., Nachit H., Pons J., Meier M. (2004) The Paleoproterozoic in western Anti-Atlas (Morocco): a clarification. *J. Af. Earth Sci.*, **39**, 239-245.
- Caumon G., Lepage F., Sword C., Mallet J. L. (2004) Building and editing a sealed geological model. *Mathematical Geology*, **36**, 105-424.
- Gasquet D., Chevremont P., Baudin T., Chalot-Prat F., Guerrot C., Cocherie A., Roger J., Hassenforder B., Cheillett A. (2004) Polycyclic magmatism in the Tagragra d'Akka and Kerdous-Tafeltast inliers (Western Anti-Atlas, Morocco). *J. Af. Earth Sci.*, **39**, 267-275.
- Kister P., Cuney M., Golubev V. N., Royer J. J., Le Carlier de Veslud C., Rippert J. C. (2004) Radiogenic lead mobility in the Shea Creek unconformity-related uranium deposit (Saskatchewan, Canada): migration pathways and Pb loss quantification. *C. R. Géoscience*, **336**, 205-215.

- Laumonier B., Autran A., Barbey P., Cheilletz A., Baudin T., Cocherie A., Guerrot C. (2004) Conséquences de l'absence de socle cadomien sur l'âge et la signification des séries pré-varisques (anté-Ordovicien supérieur) du sud de la France (Pyrénées, Montagne Noire). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **175**, 643-655.
- Laumonier B., Marignac C., Gasquet D. (2004). Comment on Duplex at the lateral tip of a thrust fault: the « La Cagalière » example (NE Pyrenees, France) by C. Souque *et al. Geodin. Acta*, **17**, 179-181.

- Le Carlier de Veslud C., Alexandrov P., Cuney M., Ruffet G., Cheilletz A., Virlogeux D. (2004) Thermochronologie  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  et évolution thermique des granitoïdes méso-varisques du complexe plutonique de Charroux-Civray (seuil du Poitou). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **175**, 147-156.
- Malartre F., Ford M., Williams E. A. (2004) Preliminary biostratigraphy and 3D geometry of the Vouraikos Gilbert-type fan delta, Gulf of Corinth (Greece). *C. R. Géoscience*, **336**, 269-280.
- Mallet J. L. (2004) Space-Time mathematical framework for sedimentary geology. *Journal of Mathematical Geology*, **36**, 1-32.

## LES PUBLICATIONS DE RANG B

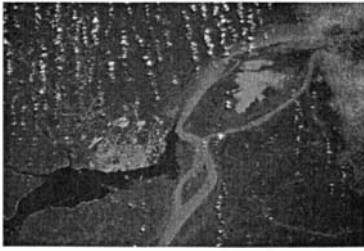
- Chalot-Prat F., Tikhomirov P.L., Saintot A. (2007). Devonian and Triassic basalts from the southern continental margin of the East European Platform, tracers of a same heterogeneous lithospheric mantle source. *J. Earth Syst. Sci.* **116**, 469-492.
- Ikenne M., Madi A., Gasquet D., Cheilletz A., Hilal R., Mortaji A., Mhaili E. (2005) Petrogenetic significance of podiform chromitites from the Neoproterozoic ophiolitic complex of Bou-Azzer (anti-Atlas Morocco). *Af. Geosci. Rev.* **12**, 131-143.

- Barros C. E. M., Macambira M. J. B., Barbey P., Scheller T. (2004) Dados isotópicos Pb-Pb en zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**, 351-358.
- Mayer A., Cortiana G., Dal P., Deloule E., De Pieri R., Jobstraibizer P. (2004) U-Pb single zircon of the Adamello Batholith, Southern Alps. *Memorie di Scienze Geologiche*, **55**, 151-167.

## LES LIVRES ET LES CHAPITRES DE LIVRES

- Ford, M., Williams, E.A. and Malartre, F. (sous presse). Stratigraphic architecture, sedimentology and structure of the Vouraikos Gilbert-type delta, Gulf of Corinth, Greece. *Special Publication of the International Association of Sedimentologists*, edited by G.J. Nichols, E.A. Williams, C. Paola.
- Chalot-Prat F. (2005) An undeformed ophiolite in the Alps: Field and geochemical evidence for a link between volcanism and shallow plate tectonic processes. In: *Plates, plumes and paradigms*, (881 p.). 388), *The Geological Society of America*. 751-780.
- Ford M., Lickorish W. H. (2004) Foreland basin evolution around the western Alpine arc. In: *P. Joseph & S. Lomas (eds), New perspectives on Turbidites, the Grès d'Annot Sandstones, SE France*, Geological Society, London, Special Publications, 221, 39-63
- Neradovsky Y. N., Ohnenstetter M. (2004) Cu-Ni and PGE-bearing sulphide deposits of the Monchepluton. In: *Smolkin VF, Fedotov ZA, Neradovsky YN, Bayanova VV, Glaznev VN, Dedyukhin AN, Orsoev DA, Ohnenstetter M, Ohnenstetter D, et al. (Eds), Layered intrusions of the Monchegorsk ore region: petrology, mineralization, isotopy, deep structure, 2), Russian Academy of Sciences Apatity: Kola Centre*, 71-94.

- Neradovsky Y. N., Ohnenstetter M., Ohnenstetter D. (2004) Mineral composition of the noble-metal mineralization in the Monchepluton. In: *Smolkin VF, Fedotov ZA, Neradovsky YN, Bayanova VV, Glaznev VN, Dedyukhin AN, Orsoev DA, Ohnenstetter M, Ohnenstetter D, et al. (Eds), Layered intrusions of the Monchegorsk ore region: petrology, mineralization, isotopy, deep structure, 2), Russian Academy of Sciences Apatity: Kola Centre*, 95-101.
- Saintot A., Brunet M. F., Yakovlev F., Sébrier M., Stephenson R., Ershov A., Chalot-Prat F., Mc Cann T. (2006). The Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Greater Caucasus. *From Gee DG & Stephenson RA (eds) 2006. European Lithosphere Dynamics. Geological Society, London, Memoirs*, 32, 277-289.
- Smolkin V. F., Fedotov Z. A., Orsoev D. A., Ohnenstetter D. (2004) Ore-bearing layered Monchepluton, (in Russian). In: *Smolkin VF, Fedotov ZA, Neradovsky YN, Bayanova VV, Borisova VV, Glaznev VN, Dedyukhin AN, Orsoev DA, Ohnenstetter M, Ohnenstetter D & al. (Eds), Layered intrusions of the Monchegorsk ore region: petrology, mineralization, isotopy, deep structure, 1), Russian Academy of Sciences Apatity: Kola Centre*, 36-74.



## BILAN DU THÈME : RELIEF - ÉROSION - CLIMAT

Chercheurs CNRS : 6 (2DR, 2CR, 2IR)  
Enseignant-chercheurs : 1 MC ENSG/INPL  
Doctorants : 5  
Post-doctorants : 2 (CNRS et UE)

Nombre de publications : 48 (45 A1, 1 A3 et 2 chapitres d'ouvrages)  
Nombre de thèses soutenues : 4

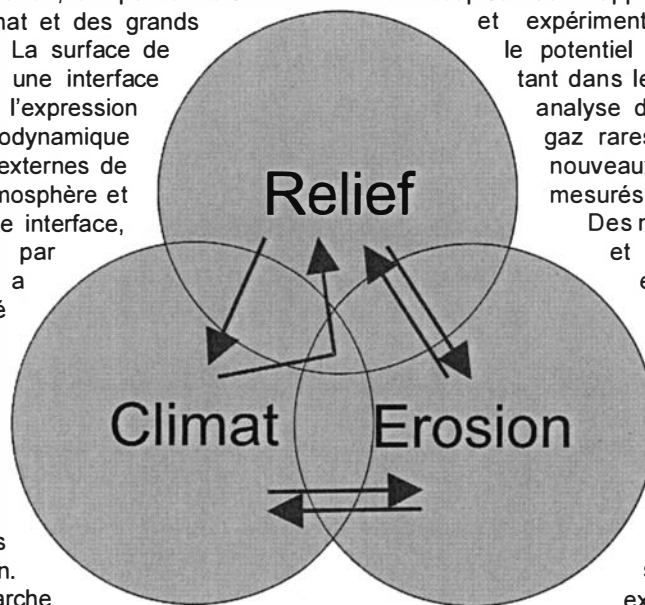
### INTRODUCTION

Ce thème de recherche a fédéré les actions conduites au CRPG autour des processus qui affectent la surface de notre planète et qui, tout en modelant son évolution, ont pu contrôler les variations du climat et des grands cycles géochimiques. La surface de la Terre est en effet une interface complexe entre l'expression superficielle de la géodynamique interne et les cycles externes de l'hydrosphère, de l'atmosphère et de la biosphère. Cette interface, qui est matérialisée par le relief terrestre, a donc la particularité d'être à la fois le témoin privilégié et accessible des processus qui régissent la dynamique de notre planète, ainsi que le terrain de jeu de tous les acteurs de l'érosion.

Notre démarche scientifique pour aborder l'étude de ces processus a été basée en partie sur notre expérience du développement de traceurs chimiques et isotopiques ainsi

que, plus récemment, de thermochronomètres et chronomètres spécifiques des courtes échelles de temps. Ces développements, couplés aux approches minéralogiques et expérimentales, s'appuient sur le potentiel analytique du CRPG, tant dans le domaine de la micro-analyse des isotopes stables et gaz rares, que dans celui des nouveaux systèmes isotopiques mesurés par MC-ICPMS.

Des nombreuses interactions et rétroactions existants entre le relief, l'érosion et le climat à la surface de notre planète, trois axes de recherche ont été identifiés dans ce bilan et ceci dans un souci de clarté et de synthèse. Ils sont bien sûr thématiquement extrêmement liés et interdépendants et ont été souvent abordés conjointement par les différents acteurs de ce thème de recherche sur des chantiers phares de la surface du globe.



### BILAN DES TRAVAUX

#### ÉVOLUTION DES RELIEFS ET DYNAMIQUE DE L'ÉROSION

**Chercheurs impliqués :** Peter Burnard, Jean Carignan, Christian France-Lanord, Raphaël Pik, Nathalie Vigier

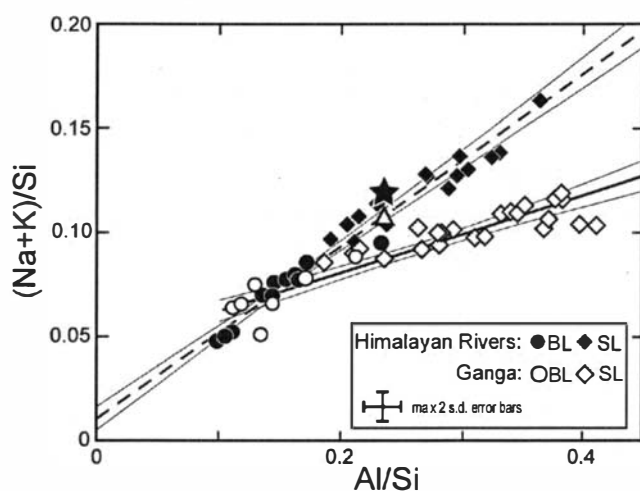
**Étudiants - Post-doctorants :** Pierre-Henri Blard (Co-dir. CEREGE), Valier Galy, Alice Williams (post-doc MC-RTN)

**Collaborations principales :** LGCA (Grenoble), IPG (Paris), ENS (Paris)

Le modelé particulier du relief est le résultat d'interactions complexes et variables dans le temps et l'espace, entre une tendance générale à son élévation d'origine interne (e.g. soulèvement orogénique) et une tendance générale à sa destruction d'origine externe (érosion). Notre approche pour mettre en évidence les processus, interactions et rétroactions (entre climat, érosion et tectonique) qui contrôlent l'évolution et la genèse des reliefs a été basée sur le développement d'outils de quantification de l'érosion et de l'exhumation et leur application à certains des reliefs les plus spectaculaires de notre planète, principalement en Asie et en Afrique de l'Est.

#### BILAN D'ÉROSION DES GRANDS FLEUVES

Les sédiments transportés par les grands fleuves, comme le Gange et le Brahmapoutre en Himalaya, sont soumis à d'intenses phénomènes de tri minéralogique et granulométrique qui peuvent biaiser profondément les bilans d'érosion établis à l'aide de ce matériel détritique. Afin de décrire et de prendre en compte les hétérogénéités sédimentaires au sein de ces

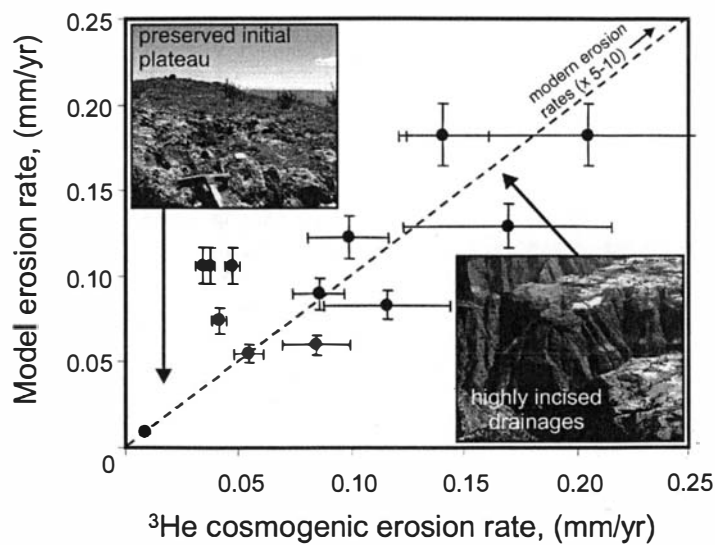


FigREC1 : Composition chimique des sédiments de rivière dans le bassin du Gange, à la sortie de la chaîne himalayenne et à l'exutoire du bassin. Les sédiments de rivière s'alignent le long de droites de mélange entre les sédiments de fond (BL) et les matières en suspension (SL) de surface. Les sédiments transportés par le Gange sont nettement plus altérés ( $Na+K/Si$  plus faibles) que ceux transportés par les rivières himalayennes. Leur composition se situe nettement en dessous de la composition moyenne des roches érodées (étoile noire), mais également en dessous de la composition calculée en supposant que l'altération est à l'état stationnaire (triangle blanc).

#### QUANTIFICATION DU SOULÈVEMENT ET DE LA DÉNUDATION

Associée à l'étude pétrologique et géochimique des sédiments de rivière exportés, nous avons développé une approche utilisant l'histoire thermochronologique du socle exhumé, soit directement dans les roches affleurantes des massifs orogéniques, soit dans le matériel détritique des rivières ou des enregistrements sédimentaires. En parallèle de développements techniques et de standards de la méthode (U-Th)/He (Kraml *et al.*, 2006) cette approche nous a permis d'examiner et de mieux comprendre l'histoire de la dénudation liée à la formation du relief orogénique sous l'influence des différentes phases tectoniques dans les Pyrénées (Maurel *et al.*, 2007 ; Denele, in prep.), ou encore dans le système Himalaya-Tibet. Notamment, dans la chaîne des Longmen Shan (Godard *et al.*, soumis à EPSL) où, grâce à une approche systématique

le long de profils altitudinaux, nous avons pu mettre en évidence les variations spatiales de la dénudation et sa focalisation le long de cette marge du plateau Tibétain qui domine le bassin du Sichuan et qui a subi une exhumation de 6-7 km depuis sa formation il y a environ 10 Ma. Au sud de la chaîne himalayenne, notre approche s'est focalisée sur l'utilisation de la thermochronologie détritique de façon à préciser la distribution et l'intensité de l'érosion à l'échelle des bassins, et ceci dans les sédiments du Brahmapoutre (Pik *et al.*, in prep.), ainsi que dans les sédiments de la chaîne d'avant pays des Siwaliks par une approche originale de double datation Traces de Fission et U/Pb (Bernet *et al.*, 2006). Au-delà de ces informations thermo-chronologiques couvrant une gamme de quelques millions à dizaines de millions d'années, une autre



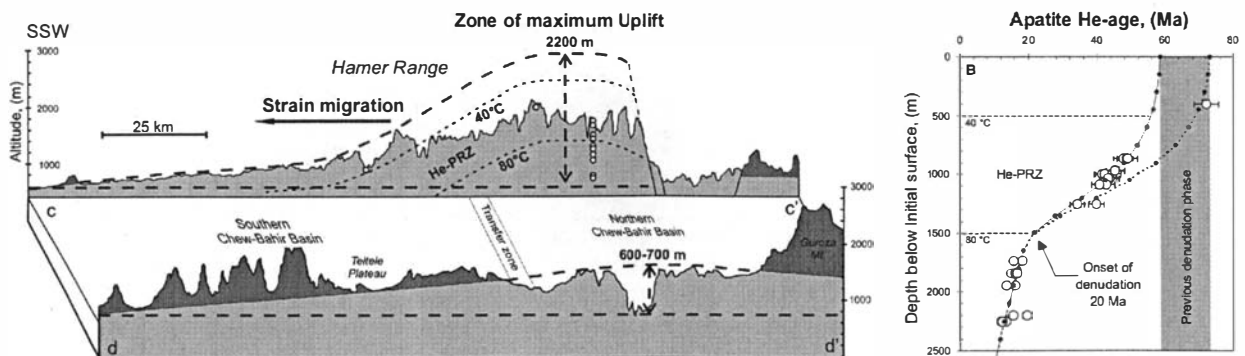
FigREC2 : Taux d'érosion dérivés de la mesure de  $^3\text{He}$  cosmogénique dans les olivines des sédiments de rivières du plateau Nord-Ethiopien. Les variations liées aux différentes zones morpho-climatiques et morpho-tectoniques du plateau sont clairement mises en évidence par les mesures cosmogéniques et par un modèle d'érosion-incision de type shear-stress calibré pour des lithologies volcaniques basiques. Notons que ces vitesses d'érosion intégrées à l'échelle de temps géologique sont un ordre de grandeur plus bas que la mesure de la quantité de sédiments exportés actuellement par le Nil Bleu, reflétant ainsi l'amplification due à la déforestation et à l'activité agricole dans ces zones de plateau intertropicales.

information importante pour quantifier l'intensité de l'érosion et ses variations sur une période beaucoup plus récente (quelques milliers à dizaines de milliers d'années) réside dans la mesure de l'accumulation des isotopes cosmogéniques soit directement sur des surfaces géomorphologiques, soit dans les minéraux des sédiments de rivières. Nous avons focalisé notre action sur la mise au point de la mesure de l'hélium cosmogénique ( $^3\text{He}$ ) dans les olivines et les grenats (Gayer *et al.*, 2004 ; Yokochi *et al.*, 2005 ; Blard *et al.*, 2006b ; Dunaï *et al.*, 2007 ; Blard and Pik, soumis à Chem. Geol.). Une telle approche a notamment été menée pour étudier la préservation du plateau Ethiopien qui représente les restes de la grande province volcanique de type «Trapps», mise en place en Afrique de l'Est, il y a 30 Ma. Cette quantification des vitesses d'érosion dans les différentes zones morpho-climatiques du plateau (FigREC2, Pik *et al.*, in prep.) nous a permis (1) de mettre en évidence les contrôles de l'intensité de l'érosion principalement représentés par le relief, ainsi que (2) de calibrer un modèle d'érosion pour les lithologies volcaniques basiques (modélisation réalisée en collaboration avec Jérôme Lavé, LGCA).

#### PALÉO-TOPOGRAPHIES ET PALÉO-ALTITUDES

En géomorphologie quantitative, il est très difficile de reconstruire les paléo-topographies et notamment les paléo-altitudes dont les variations peuvent avoir une grande importance notamment dans le cas de la création de barrières atmosphériques pouvant potentiellement contrôler le climat à l'échelle locale ou régionale. Ces problèmes pour reconstituer la paléo-topographie sont principalement dus à un manque d'outils de quantification directs qui puissent être transposés dans le passé sans que la précision n'en soit trop affectée. Nous avons montré (Blard *et al.*, 2006a)

que les isotopes cosmogéniques de la famille des gaz rares ( $^3\text{He}$  et  $^{21}\text{Ne}$ ) constituent un outil de choix en paléo-géomorphologie car ils sont stables et ne décroissent donc pas une fois produit à la surface des objets géomorphologiques. Nous avons dans un premier temps utilisé ces expositions «fossiles» au rayonnement cosmique pour mettre au point, en collaboration avec le LGCA (Grenoble) et le CEREGE (Aix-en-Provence), un paléo-altimètre basé sur la dépendance du taux de production des isotopes cosmogéniques à l'altitude. Ce paléo-altimètre a été testé avec succès sur un objet



FigREC3 : Mise en évidence du soulèvement et de la dénudation le long du Mont Hamer (SW Ethiopia) à l'aide de la thermochronologie (U-Th)/He sur apatites.

simple comme le strato-volcan Etna (Blard *et al.*, 2005) et est actuellement en cours d'application pour reconstruire l'histoire du soulèvement des hauts plateaux comme les Andes ou le Tibet.

L'histoire paléo-topographique d'une région peut aussi être étudiée grâce à la thermochronologie (U-Th)/He mesurée dans les apatites, étant donné que ces minéraux enregistrent l'information chronologique lors du passage à travers un isotherme très superficiel (~70 °C). En utilisant cette propriété, nous avons conduit une étude détaillée de

thermochronologie (U-Th)/He le long d'un des plus beaux escarpements de faille du Rift Est Africain, dans le sud de l'Ethiopie (Pik *et al.*, sous presse à *Geology*). Cette quantification précise du refroidissement lié au soulèvement de cette épaule de rift (FigREC3, page précédente) nous a permis de préciser l'histoire du fonctionnement de ce rift, et la façon dont son soulèvement a pu affecter et modifier la topographie, en relations avec l'activité des panaches mantelliques le long du système de rift (Pik *et al.*, 2006) et l'aridification de l'Afrique de l'Est.

## ÉROSION ET CYCLE DU CARBONE

**Chercheurs impliqués : Jean Carignan, Christian France-Lanord, Laurie Reisberg, Nathalie Vigier**

**Étudiants - Post-doctorants : Agnès Brenot, Valier Galy, Maxence Paul, Emile Bolou Bi**

**Collaborations principales : HYDRASA, LIMOS, IFREMER, BRGM, Université de Grenoble, LDEO, LMTG, Univ. Iceland.**

Les flux d'érosion physique et chimique jouent un rôle majeur dans le cycle de l'eau et du carbone, et sur l'évolution du climat. Les processus les plus importants en terme de consommation de CO<sub>2</sub> sont l'altération des silicates, ainsi que l'enfouissement de la matière organique. Nous avons exploré ces deux aspects, en nous basant sur des outils isotopiques spécifiques ou nouvellement développés, dans le but d'aboutir à une quantification pertinente des flux associés ainsi que de leurs facteurs de contrôle.

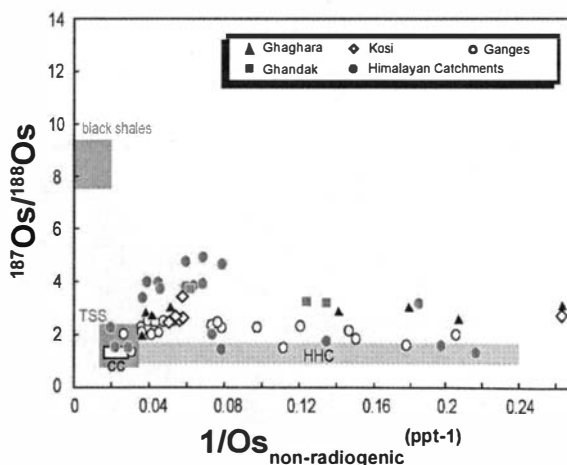
### TRAÇAGE DE L'ÉROSION AVEC LES ISOTOPES RADIOGÉNIQUES

Les isotopes radiogéniques tels que les isotopes de l'osmium, et du strontium, mesurés dans les rivières, permettent de déterminer plus précisément les sources lithologiques, et les phases minérales altérées à l'échelle d'un bassin versant. Récemment, il a été suggéré que la signature isotopique de l'hafnium dans l'océan pourrait refléter l'intensité de l'érosion à grande échelle ('effet zircon'), mais aucune mesure directe dans les eaux de rivières n'avait encore

pu être effectuée. Au-delà du traçage de source, ces outils, et en particulier les séries de l'uranium, permettent aussi de poser des contraintes de temps sur l'altération, et d'estimer le rôle des perturbations climatiques récentes, comme les glaciations, sur les processus d'érosion chimique et physique des sols.

L'enregistrement marin des isotopes de l'osmium pourrait documenter les variations des taux d'érosion dans le passé. Néanmoins, l'interprétation de cet enregistrement nécessite une meilleure connaissance des sources lithologiques de l'Os à l'océan. Pour cette raison, nous avons entrepris, dans le cadre de la thèse de Maxence Paul, d'étudier les sédiments et les eaux issus de l'érosion himalayenne. Des études antérieures ont montré que les produits de l'érosion himalayenne seraient parmi les plus radiogéniques du monde, un fait qui a été attribué à la présence de schistes noirs, riches en Os radiogénique (<sup>187</sup>Os).

Nous avons démontré que la faible teneur en Os non-radiogénique des roches himalayennes serait un facteur déterminant dans la signature isotopique des sédiments (FigREC4 ci-contre). Les rapports <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os très élevés des sédiments et des eaux provenant de l'érosion himalayenne sont en fait dus, en grande partie, aux faibles teneurs en <sup>188</sup>Os des roches mères, plutôt qu'à un enrichissement excessif en <sup>187</sup>Os. La teneur moyenne en <sup>187</sup>Os des roches himalayennes n'est donc guère plus importante que celle de la croûte



FigREC4 : <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os des sédiments transportés par le Ganges et ses affluents, en fonction de l'inverse de la concentration en Os non radiogénique. Par rapport à la croûte continentale (CC), les sédiments sont radiogéniques et pauvres en Os.

continentale typique. Cela implique, qu'à l'inverse du strontium, la chaîne himalayenne n'est pas une source exceptionnelle d'Os radiogénique. L'érosion himalayenne pourrait cependant avoir une influence forte sur l'océan dans le cas d'une érosion chimique très poussée.

Un autre aspect peu compris de l'Os marin est son temps de résidence dans l'océan. Les estimations publiées donnent des résultats peu concordants, qui suggèrent un flux non considéré d'Os à l'océan. Ce flux pourrait provenir des eaux souterraines. Pour tester cette hypothèse, M. Paul mesure actuellement la composition en Os des eaux souterraines du Bassin du Bengale (collaboration avec L. Charlet de l'Université de Grenoble et Y. Zheng de LDEO). Ces travaux ont nécessité le développement d'un nouveau protocole chimique, plus adapté aux conditions réductrices des eaux souterraines. Les premiers résultats, ont été présentés à la Goldschmidt 2007 (Cologne), démontrent que le flux souterrain d'Os dans cette région est potentiellement très important. Cependant, une partie de cet Os peut se trouver immobilisé dans les sédiments de la zone de transition eau douce - eau salée. Pour résoudre cette question, nous allons

prochainement analyser des sédiments du Bassin du Bengale, susceptibles d'être des 'pièges' à osmium.

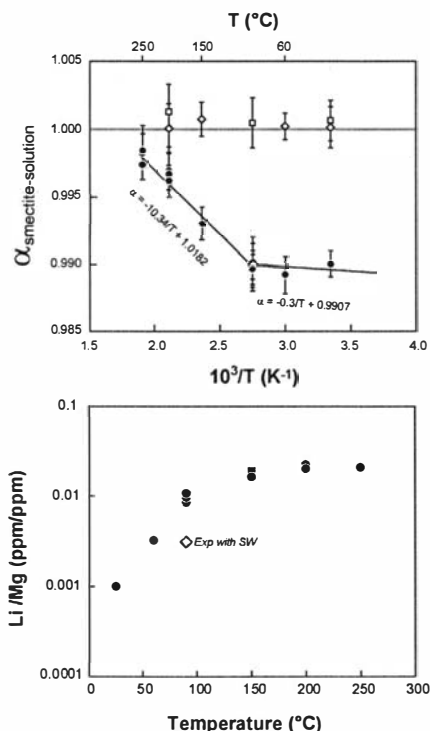
Dans un autre domaine, l'étude de petits bassins versants, comme celui de la Moselle, a permis de montrer le fort potentiel des signatures isotopiques en hafnium des eaux de rivières, qui ont pu être mesurées pour la première fois, dans le cadre d'une collaboration avec G. Bayon (IFREMER). Les eaux de rivières sont nettement plus radiogéniques que les roches et sols, et leur signature peut être reliée à l'intensité de l'altération (Bayon *et al.*, 2006; voir ZAM dans le thème «activités anthropiques»). Si ces résultats sont généralisables, les variations paléo-océaniques pourraient directement refléter l'intensité de l'altération des silicates à grande échelle.

D'autre part, une étude détaillée des bassins monolithologiques islandais a permis de contraindre les temps et taux caractéristiques de l'érosion en Islande, avec les séries de l'uranium mesurés dans les rivières, et de mettre en évidence le rôle inhibiteur de la dernière glaciation sur les taux d'érosion chimique (Vigier *et al.*, 2006).

#### LES NOUVEAUX TRACEURS DE L'ÉROSION: LES ISOTOPES DU LI ET DU MG.

Nous avons exploré les fractionnements des isotopes du lithium et du magnésium dans le but d'apporter des informations complémentaires sur les processus d'altération des silicates. Nous avons dans un premier temps développé les mesures isotopiques de ces deux traceurs pour tous types d'échantillons naturels et de matériaux de référence (Carignan *et al.*, 2004; 2007; Bolou Bi *et al.*, soumis à GGR). Puis, nous avons effectué des recherches dans deux directions principales: (1) une approche expérimentale pour calibrer et quantifier les fractionnements isotopiques et (2) une approche in-situ, de bassins versants fortement étudiés.

Dans le cadre de l'approche expérimentale, deux voies ont été explorées : des synthèses d'argiles en milieu contrôlé, et des altérations et recyclages par des plantes. Des smectites trioctahédriques (hectorites) ont été synthétisées à des températures comprises entre 25°C et 250°C, en présence de solutions enrichies en lithium. Les fractionnements isotopiques correspondants à l'incorporation du lithium



FigRECS : (a) Facteurs de fractionnements isotopiques ( $\alpha_{\text{smectite-solution}}$ ) du lithium lors de la formation de smectite à diverses températures (points noirs). Les fractionnements isotopiques lors de la désorption du lithium sont aussi montrés (points blancs). (b) Evolution du rapport Li/Mg dans les smectites en fonction de la température. Pour comparaison, l'expérience avec une solution de lithium à matrice d'eau de mer est indiquée (losange blanc). La composition de la solution n'a pas d'effet sur le fractionnement isotopique, mais sur la quantité de lithium incorporée dans les sites octaédrique. Les coefficients de partage  $\text{Li}_{\text{argile}}/\text{Li}_{\text{solution}}$  correspondants sont faibles (<0.14), et ne permettent pas d'expliquer les teneurs élevées des argiles océaniques.



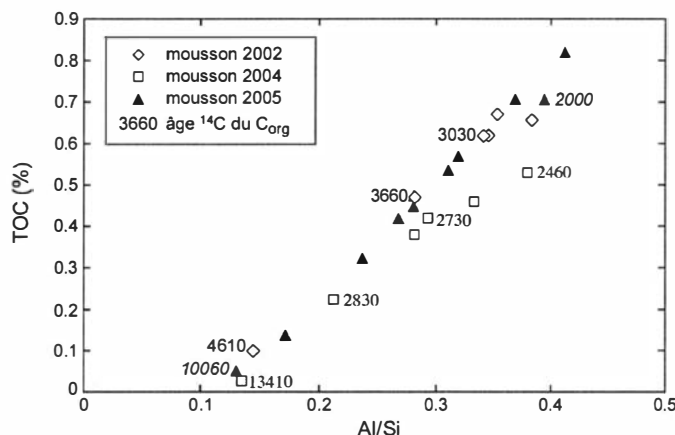
dans les sites octaédriques de la smectite, en substitution du magnésium, ont été déterminés ( $\Delta\text{Li}_{\text{day-solution}}$ ) (Vigier *et al.*, en révision à GCA). Les fractionnements corrèlent inversement avec la température, comme le prédit la théorie, et des lois empiriques utilisables dans des modèles d'altération sont proposées (FigREC5, page précédente). Un modèle simple d'altération continentale a été développé, qui montre le rôle prépondérant des phases secondaires dans la signature isotopique des eaux de rivières et de leurs sédiments.

Nous explorons aussi le rôle de la végétation sur l'altération et la composition isotopique des produits d'altération. Des croissances de trèfle et de ray-grass ont été effectuées en présence de solutions (hydroponique), de micas, et de magnésie (Thèse d'Emile Bolou Bi). Les fractionnements isotopiques du magnésium lors de son prélèvement par les racines, et lors de sa translocation vers les parties aériennes, ont été déterminés. Les plantes sont isotopiquement différentes de leur source de magnésium, ce qui indique le fort potentiel de ce traceur dans ce domaine (Bolou Bi *et al.*, in prep).

Des bassins versants à lithologie simple, ou

fortement étudiés, ont été utilisés comme atelier dans le but de mieux comprendre les relations entre l'altération des silicates et les signatures isotopiques en lithium et magnésium des eaux de rivières. Le bassin de la Moselle a été étudié dans le cadre de la ZAM, et de la FR-EST (voir thème Activités anthropiques) (Brenot *et al.*, soumis à GCA). Dans le cadre d'une collaboration avec le BRGM, le grand bassin à lithologie mixte de la Mackenzie (Canada) nous a permis de montrer sans ambiguïté le rôle majeur des lithologies silicatées sur la signature isotopique en lithium des eaux des grands fleuves. Enfin, les bassins islandais ont été choisis pour leur monolithologie basaltique, et parce que l'ensemble des taux d'érosion chimique et physique a été déterminé, ainsi que le temps de résidence des sols (Vigier *et al.*, 2006). Une corrélation négative entre le  $\delta^7\text{Li}$  des eaux de rivières et les taux d'érosion chimique des basaltes est mise en évidence. Un modèle simple d'altération prenant en compte la formation des phases secondaires permet d'expliquer l'ensemble des données. Un article est actuellement en cours de rédaction (Vigier *et al.*, sous presse à EPSL).

#### EXPORTATION ET ENFOUISSEMENT DE CARBONE ORGANIQUE LORS DE L'ÉROSION CONTINENTALE



FigREC6 : Teneur en carbone organique (TOC) des sédiments du Gange au Bangladesh en fonction de leur composition chimique (Al/Si). Le rapport Al/Si caractérise l'hétérogénéité sédimentaire: il augmente avec la proportion de phyllosilicates et de particules fines. La tendance linéaire observée entre le TOC et le rapport Al/Si permet de définir la charge en carbone organique de ces sédiments. Elle montre que les particules organiques et les particules minérales répondent de façon similaire aux processus de tri pendant le transport fluvial. La composition de la matière organique est également affectée comme le montre l'évolution de l'âge apparent de la matière organique avec le rapport Al/Si. Les sédiments de fond, grossiers et riches en quartz, sont pauvres en carbone organique et dominés par du carbone fossile libéré lors de l'érosion des roches himalayennes. Les matières en suspension de surface, fines et riches en phyllosilicates, sont enrichies en carbone organique et dominées par de la matière organique récente composée de débris végétaux et de matière organique des sols.

Les orogènes actifs sont caractérisés par une surrection rapide ainsi qu'une érosion physique intense. D'autre part, à travers le cycle du carbone, ils jouent un rôle prépondérant dans la régulation du climat. L'étude de l'érosion de la chaîne himalayenne, qui représente le relief majeur ayant affecté la surface de notre planète depuis plusieurs centaines de Ma, apporte de nouvelles informations sur les processus qui participent à cette régulation. En Himalaya, l'enfouissement de carbone organique assure la majeure partie de la séquestration de  $\text{CO}_2$  (Aucour *et al.*, 2006 ; Galy *et al.* soumis à Nature).

L'exportation de carbone organique par les rivières du système Gange-Brahmapoutre est gouvernée par les processus de transport. La charge en carbone organique des sédiments de rivière est contrôlée par (1) la ségrégation des particules organiques dans la tranche d'eau et (2) l'association préférentielle de la matière organique avec les phyllosilicates (Galy *et al.*, soumis à GCA). L'âge apparent du carbone organique, déterminé par analyse du  $^{14}\text{C}$ , varie en fonction des propriétés sédimentaires et de la teneur en carbone organique (FigREC6 ci-contre). La proportion de carbone fossile varie entre 10 et 20 %

dans les matières en suspension et entre 50 et 100 % dans les sédiments de fond (Galy *et al.*, soumis à Nature).

La comparaison des roches himalayennes, des sédiments de rivières et des sédiments marins déposés dans le cône du Bengale, a permis de réaliser un bilan complet d'érosion, de transport et d'enfouissement du carbone organique au cours de l'érosion de l'Himalaya (Galy *et al.*, soumis à Nature). La matière organique enfouie dans les sédiments du cône du Bengale est très majoritairement dominée par la matière organique délivrée par le système fluvial Gange-Brahmapoutre. En outre, la charge en carbone organique des sédiments marins est identique à celle des sédiments de rivière. Le carbone organique délivré par le système Gange-

Brahmapoutre est donc essentiellement préservé et enfoui dans les sédiments océaniques. Cela contraste fortement avec la majorité des systèmes deltaïques où, en moyenne, 70 % de la matière organique est oxydée et retourne dans l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub>. A lui seul, le système himalayen est responsable d'environ 15 % du flux global d'enfouissement de carbone organique récent. L'exceptionnelle efficacité d'enfouissement de la matière organique dans le système himalayen est principalement entretenue par l'érosion physique très intense de la chaîne himalayenne. L'exemple de l'Himalaya montre donc que l'érosion rapide des orogènes actifs favorise la séquestration de CO<sub>2</sub> atmosphérique par enfouissement de carbone organique et exerce une rétroaction négative sur climat.

#### L'HIMALAYA SOURCE DE CO<sub>2</sub> POUR L'ATMOSPHÈRE ?

Les bassins orogéniques sont caractérisés par une érosion physique accélérée qui tend à appauvrir l'atmosphère en CO<sub>2</sub> par altération des silicates (Singh *et al.*, 2005, 2006) et par enfouissement de matière organique. Parallèlement aux recherches que nous menons sur ces processus, nous nous sommes intéressés aux flux de CO<sub>2</sub> associés à la formation d'une chaîne de montagne. L'épaississement crustal induit en effet le métamorphisme de formations superficielles qui, lorsqu'elles sont carbonatées, peut libérer des quantités considérables de CO<sub>2</sub>. Les sources thermales présentes dans les

principales vallées himalayennes sont connues pour être très carbonatées en raison de ce dégazage profond. Nous avons pu quantifier leurs flux (Evans *et al.*, 2004) et démontrer que leurs compositions isotopiques de carbone impliquent des taux de dégazage considérables (Evans *et al.* soumis à Nature). Ces flux de dégazage ont plus récemment été observés et quantifiés sur un champ thermal (Perrier *et al.*, soumis à EPSL). Au total nous estimons que l'apport de CO<sub>2</sub> métamorphique peut contrebalancer les effets de l'altération des silicates.

#### TRACEURS PALÉO-ENVIRONNEMENTAUX

**Chercheurs impliqués : Marc Chaussidon, Christian France-Lanord, Raphaël Pik, Fabien Pahlol, Laurie Reiser, Claire Rollion-Bard, Nathalie Vigier**  
**Étudiants - Post-doctorants : Pierre-Henri Blard, Valier Galy, Céline Pisapia**  
**Collaborations principales : Université de Jérusalem, Israël, ENS Paris, LSCE Gif-sur-Yvette.**

#### TRAÇAGE PALÉO-ENVIRONNEMENTAL EN MILIEU MARIN

L'étude pour une meilleure compréhension des enregistrements des marqueurs environnementaux dans les carbonates biogéniques (notamment coraux et foraminifères) s'est poursuivie grâce à l'analyse in situ par microsonde ionique. Les systèmes isotopiques étudiés ont ainsi été l'oxygène, le bore et le lithium dans des échantillons naturels et d'autres poussés sous conditions contrôlées en laboratoire (Juillet-Leclerc *et al.*, sous presse ; Cuif *et al.*, sous presse ; Watanabe *et al.*, 2006 ; Blamart *et al.*, 2005). Les mesures des isotopes du lithium, de l'oxygène et du carbone dans les carbonates ont nécessité des développements analytiques et ont fait l'objet de papiers techniques (Vigier *et al.*,

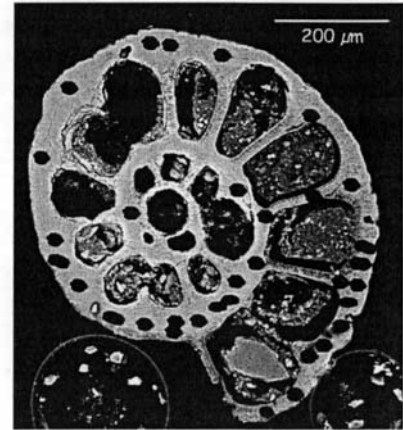
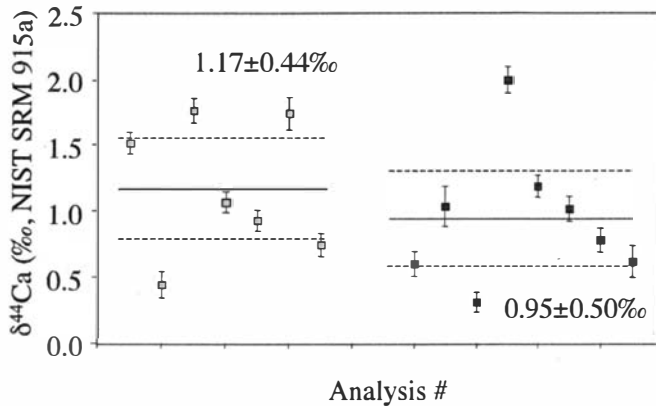
2007 ; Rollion-Bard *et al.*, 2007).

Les foraminifères ou les coraux sont largement utilisés comme marqueurs des paléoclimats. Cependant, on ne connaît pas encore très bien leur mode de biominéralisation. Tous les processus de biominéralisation vont affecter à un degré plus ou moins important les mesures des compositions isotopiques et modifier leur valeur par rapport à celle qu'on obtiendrait si ces animaux précipitaient leur squelette carbonaté directement à partir de l'eau de mer. Nous avons ainsi montré que les mesures des isotopes du lithium peuvent être fortement affectées par l'incorporation de grains aluminosilicatés dans les murs des foraminifères, ces grains étant très

riches en lithium et de composition isotopique très distincte de la calcite du foraminifère (Vigier *et al.*, 2007). L'incorporation de ces grains peut se faire lors de la vacuolisation de l'eau de mer qui précède la précipitation du carbonate par le foraminifère. Les mesures de  $\delta^{44}\text{Ca}$  (FigREC7 ci-dessous) montrent également une très grande variabilité. Celle-ci est sans doute la combinaison de plusieurs phénomènes comme les variations des taux de précipitations, la présence de calcite

primaire et de calcite secondaire (Rollion-Bard *et al.*, 2007) Ainsi, l'étude de la biominéralisation par l'intermédiaire de diverses compositions isotopiques va nous permettre une amélioration de l'utilisation des carbonates biogéniques en tant que marqueurs paléoenvironnementaux.

La détermination des conditions paléo-environnementales s'est également effectuée sur des environnements plus anciens comme le Crétacé supérieur par l'analyse du  $\delta^{11}\text{B}$  dans des



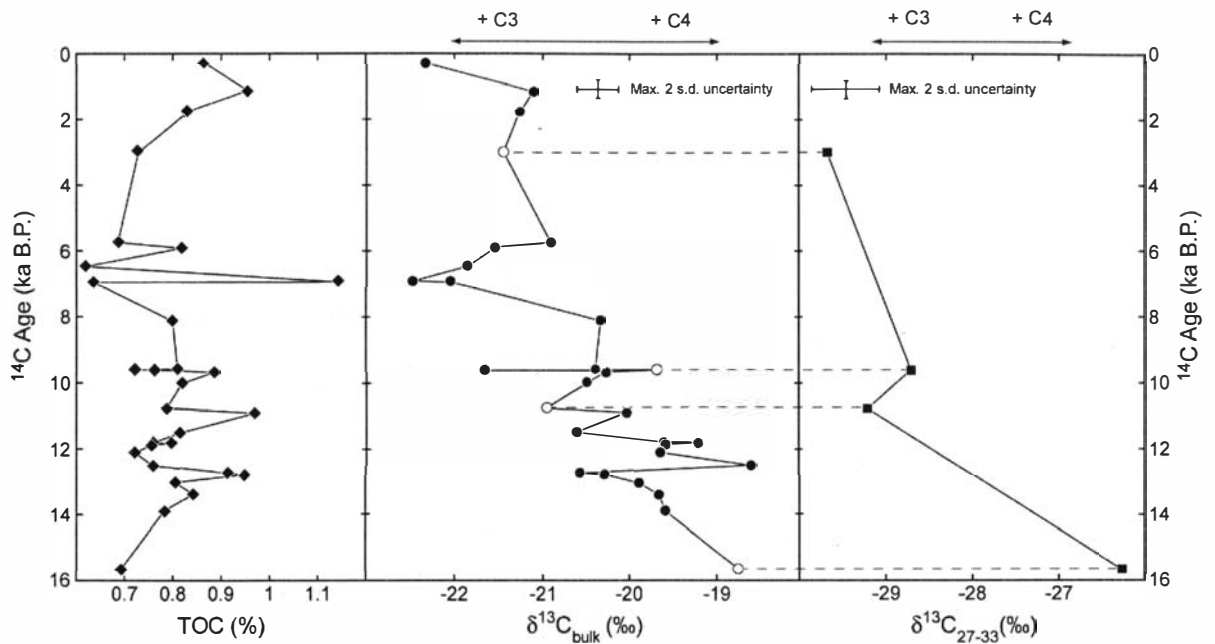
*FigREC7 : Variabilité intratest de  $\delta^{44}\text{Ca}$  dans des foraminifères d'âge 2,8 Ma. Les lignes pleines indiquent la moyenne obtenue pour chaque foraminifère et les lignes en pointillés indiquent les valeurs à plus ou moins  $1\sigma$ . Malgré une variabilité intratest significative, les moyennes des deux foraminifères sont identiques (Rollion-Bard *et al.* 2007).*

cherts (Kolodny and Chaussidon, 2004; Kolodny *et al.*, 2005). Ceux-ci ont montré une très grande variation de leur composition isotopique de bore avec des valeurs parmi les plus négatives publiées pour des cherts. Cette grande variation est sans doute le résultat du mélange entre un pôle météoritique (pauvre en B et  $\delta^{11}\text{B}$  petit) et un pôle eau de mer (riche en B et  $\delta^{11}\text{B}$  élevé).

#### TRAÇAGE PALÉO-ENVIRONNEMENTAL EN MILIEU CONTINENTAL

Les variations de l'intensité de la mousson au cours du dernier cycle glaciaire-interglaciaire sont bien documentées par des enregistrements océaniques. En revanche, les archives continentales de portée régionale sont rares. Les sédiments déposés dans le cône du Bengale sont les produits de l'érosion himalayenne et constituent donc un enregistrement des conditions sur le continent à l'échelle du bassin. L'étude de la matière organique contenue dans les sédiments déposés depuis le dernier maximum glaciaire montre une évolution importante de la végétation présente dans le bassin himalayen (Galy *et al.*, soumis à QSR). La composition isotopique du carbone organique total et de biomarqueurs spécifiques des végétaux supérieurs diminue de 3 à 4 ‰ entre le dernier maximum glaciaire et l'Holocène (FigREC8, page suivante) indiquant une forte diminution de la proportion de plantes en C4. Cette évolution de la végétation suggère une nette diminution de l'aridité et est donc en accord avec une augmentation de l'intensité de la mousson.

Afin de contraindre de manière plus directe les changements climatiques accompagnant les modifications de végétations constatées au cours des temps et de reconstruire des conditions de paléoprécipitations, une autre approche a également été mise en œuvre. Les précipitations étant la seule source d'hydrogène pour les plantes continentales, le rapport D/H des composés organiques qu'elles produisent est conditionné par les conditions de température et d'aridité. Dans ce contexte, les analyses isotopiques moléculaires du rapport D/H que nous réalisons permettent de reconstruire des conditions de paléoprécipitations et de paléohumidité grâce à la matière organique fossile préservée dans les sédiments. Après avoir calibré les conditions de transfert et de préservation du signal isotopique de l'hydrogène de la matière organique soluble des sédiments, nous avons vérifié la stabilité du signal isotopique au cours du temps sous des conditions de diagenèse légère. Nous avons ainsi pu suivre l'évolution de l'aridité depuis le dernier maximum glaciaire et mettre en évidence un enrichissement



FigREC8 : Teneur et composition isotopique de la matière organique enfouie dans les sédiments du cône du Bengale depuis le dernier maximum glaciaire. La composition isotopique de la matière organique totale ( $\delta^{13}C_{bulk}$ ) diminue de 3 à 4 ‰ entre le dernier maximum glaciaire (16 ka B.P.) et l'optimum climatique de l'Holocène. La composition isotopique de biomarqueurs des végétaux supérieurs (n-alcanes en 27, 29, 31 et 33 carbones) présente une évolution comparable. Cette évolution de composition isotopique du carbone indique une diminution marquée de la proportion de plantes en C4 dans le bassin himalayen.

de 40 ‰ en  $\delta D$  du signal à la fin de la période de glaciation, correspondant à une augmentation de l'humidité sur le bassin du Gange (Palhol *et al.*, in prep.).

Les enregistrements sédimentaires nous permettant de remonter aux conditions paléo-environnementales en milieu continental sont rares. Les changements climatiques ayant affectés l'intérieur des continents sont donc moins bien connus et documentés que pour les océans. Dans ce contexte, la dynamique des glaciers est un objet de choix pour retracer les variations des précipitations et des températures qui ont pu contrôler les phases de déglaciation. De façon à pouvoir exploiter au mieux cette information, nous avons mis au point et utilisé les datations par  $^3He$  cosmogénique des objets glaciaires (moraines et polis) qui permettent d'établir une chronologie

haute précision. Une telle chronologie, nous a permis de mettre en évidence au Népal Central (Himalaya, Gayer *et al.*, 2006) le rôle important des précipitations comme modulateur de la déglaciation vers 7-9 ka. De même, grâce à une étude sur les produits glaciaires du sommet du volcan Mauna Kea (Hawaii) nous avons daté le dernier maximum glaciaire entre 16 et 19 ka (FigREC9 ci-dessous) dans le Pacifique Central et montré, en couplant ces données avec un modèle, que cette dynamique de déglaciation tardive était compatible avec les données paléo-environnementales du Groenland suggérant ainsi un modèle d'atmosphère connecté entre le Pacifique et l'Atlantique-Nord, autorisant les échanges de masse d'air, d'humidité et de température à grande échelle dans l'hémisphère Nord (Blard *et al.*, sous presse).

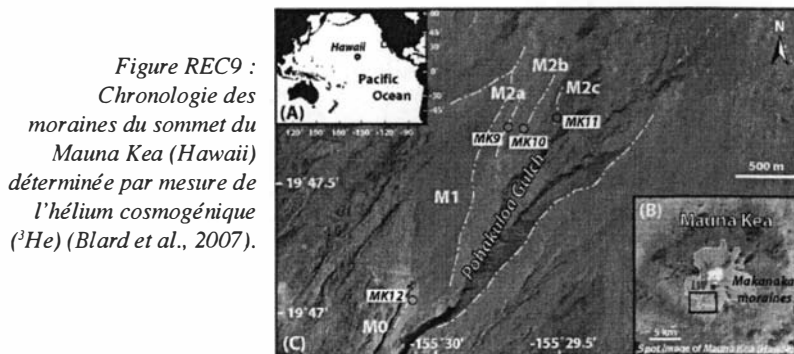
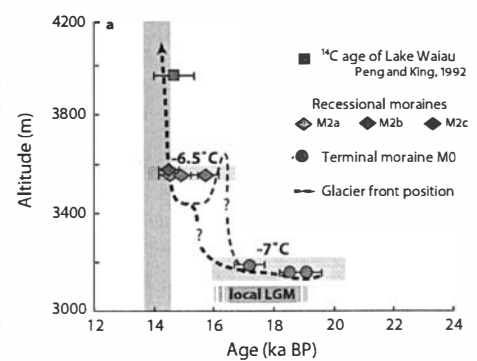


Figure REC9 : Chronologie des moraines du sommet du Mauna Kea (Hawaii) déterminée par mesure de l'hélium cosmogénique ( $^3He$ ) (Blard *et al.*, 2007).



Afin de préciser au mieux les biosignatures isotopiques possibles dans des minéraux, des études expérimentales d'oxydation de minéraux en présence de bactéries ont été menées. Le choix des minéraux s'est porté sur la pyrite qui est un minéral commun et qui est impliqué dans de nombreux processus géochimiques et

biologiques. Les mesures par microsonde ionique des isotopes du soufre et de l'oxygène ont montré l'existence d'au moins 2 chemins pour la bio-oxydation. Mais la grande hétérogénéité des  $\delta^{34}\text{S}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  à la surface du minéral montrent qu'ils ne peuvent pas, à eux seuls, être une biosignature univoque (Pisapia *et al.*, 2007).

## LES SOURCES DE FINANCEMENT

- Financement par la région du projet «Développement et utilisation de nouveaux traceurs isotopiques pour reconstituer les climats et environnements du passé» (C. Rollion-Bard, N. Vigier et F. Pahlol).
- Financement FR E.S.T. : les mécanismes biologiques induisent-ils un fractionnement des isotopes du magnésium dans l'environnement ? (porteur A. Poszwa)
- Financement du programme national «Reliefs de la Terre» pour 2004-2006 :  
Quantification du Soulèvement et de l'Erosion des Hauts Plateaux Ethiopiens (porteur R. Pik)  
Lois d'érosion des grands fleuves (porteur J. Gaillardet)  
Mise au point de paléoaaltimètres basés sur les isotopes cosmogéniques et étude de la dépendance à l'altitude des différents isotopes cosmogéniques produits in-situ (porteur J. Lavé)  
Flux tectonique et relief de l'Himalaya : une approche par thermo-chronologie détritique et géomorphologie (porteur J.L. Mugnier)  
Etude des processus d'altération des roches continentales par les isotopes stables légers (porteur N. Vigier).

## LES PUBLICATIONS RELATIVES AU THÈME RELIEF-ÉROSION-CLIMAT

Les publications du CRPG sont présentées suivant la méthode d'évaluation par quartiles utilisée par la section 18 du Comité National du CNRS.

- Le premier quartile (A1) correspond aux revues ayant un impact factor supérieur ou égal à 1,6
- Le deuxième quartile (A2) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 1 et 1,6
- Le troisième quartile (A3) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 0,6 et 1
- Le quatrième quartile (B) correspond aux revues ayant un impact factor inférieur à 0,6

## PUBLICATIONS DE RANG A1

- Blard P.-H.**, Bourlès D., **Pik R.**, **Lavé J.** (sous presse) In situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  in olivines and pyroxenes, *Quaternary Geochronology*.
- Calmels D.**, **Gaillardet J.**, **Brenot A.**, and **France-Lanord C.** Carbonate weathering: a possible source of atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Geology*. accepté.
- Cuif J.P.**, **Dauphin Y.**, **Meibom A.**, **Rollion Bard C.**, **Salomé M.**, **Susini J.**, **Williams C. T.** (sous presse) Fine scale growth patterns in coral skeletons: biochemical control on crystallization of aragonite fibres and assessment of early diagenesis in fossil records. *Biogeosciences*.
- Galy V.**, **France-Lanord C.**, and **Lartiges B.** Loading and fate of particulate organic carbon from the Himalaya to the Ganga-Brahmaputra delta. *Geochim. Cosmochim. Acta*. accepté.
- Galy V.**, **François L.**, **France-Lanord C.**, **Faure P.**, **Kudrass H.**, **Palhol F.**, and **Singh S.** C4 plants decline in the Himalayan basin since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Sci. Rev.* accepté.
- Juillet-Leclerc A.**, **Reynaud S.**, **Rollion-Bard C.**, **Cuif J.-P.**, **Dauphin Y.**, **Blamart D.**, **Ferrier-Pagès C.** and **Allemand D.** (sous presse) Oxygen isotopic signature of the growth units identified in coral skeleton: comparison between cultured tropical and deep corals. *G-cubed*.
- Oxburgh R.**, **Pierson-Wickmann A. C.**, **Reisberg L.** and **Hemming S.** (sous presse) Climate-correlated variations in seawater  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ : Evidence from the Cariaco Basin, Venezuela, *Earth Planet. Sci. Lett.*
- Pik R.**, **Marty B.**, **Carignan J.**, **Yirgu G.**, **Ayalew T.** Timing of East African Rift development in Southern Ethiopia: Implication for mantle plumes activity and evolution of topography. *Geology*. accepté.
- Vigier N.**, **Decarreau A.**, **Millot R.**, **Carignan J.**, **Petit S.**, **France-Lanord C.** Quantifying Li isotope fractionation during smectite formation and implications for the Li cycle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, accepté, en révision.
- 2007**
- Blamart D.**, **Rollion-Bard C.**, **Meibom A.**, **Cuif J.P.**, **Juillet-Leclerc A.** and **Dauphin Y.** (2007). Boron isotopic composition correlates with ultra-structure in a deep-sea coral *Lophelia Pertusa*: implications for biomineralization and paleo-pH. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **G3**, **8**, 12, 1-11.
- Blard P. H.**, **Lavé J.**, **Pik R.**, **Wagnon P.**, **Bourlès D.** (2007). Persistence of full glacial conditions in the Central Pacific until 15 thousand years ago, *Nature*. **449**, 591-594.
- Dunai T. J.**, **Stuart F. M.**, **Pik R.**, **Burnard P.**, **Gayer E.** (2007). Production of  $^3\text{He}$  in crustal rocks by cosmogenic thermal neutrons. *Earth Planet. Sci. Lett.* **258**, 228-236.
- Galy V.**, **Bouchez J.**, **France-Lanord C.** (2007). Determination of total organic carbon content and  $\delta^{13}\text{C}$  in carbonate rich detrital sediments. *Geostan. Geanal. Res.* **31**, 199-208.
- Galy V.**, **France-Lanord C.**, **Beysac O.**, **Faure P.**, **Kudrass H.** and **Palhol F.** (2007). Extreme efficiency of terrestrial organic carbon burial in the Bengal Fan. *Nature*. **450**, 407-410.
- Garzanti E.**, **Vezzosi G.**, **Andò S.**, **Lavé J.**, **Attal M.**, **France-Lanord C.** and **DeCelles P.** (2007). Quantifying Provenance and Sediment Yield in the Marsyandi River Basin (Central Nepal), *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**, 500-515.

- Granet M., Chabaux F., Stille P., France-Lanord C., and Pelt E. (2007). Time-scales of sedimentary transfer and weathering processes from U-series nuclides: Clues from the Himalayan rivers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **261**, 389-406.
- Maurel O., Monié P., Pik R., Arnaud N., Brunel M., Jolivet M. (2007) The Meso-Cenozoic thermo-tectonic evolution of the Eastern Pyrenees: an  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  fission track and (U-Th)/He thermochronological study of the Canigou and Mont-Louis massifs. *Intern. J. Earth Sci.*, DOI : 10.1007/s00531-007-0179-x.
- Montagner J. P., Marty B., Stutzmann E., Sicilia D., Cara M., Pik R., Lévêque J. J., Roult G., Beucler E., Debayle E. (2007). Mantle upwellings and convective instabilities revealed by seismic tomography and helium isotope geochemistry beneath eastern Africa. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L21303.
- Oxburgh R., Pierson-Wickmann A. C., Reisberg L. and Hemming S. (2007). Climate-correlated variations in seawater  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ : Evidence from the Cariaco Basin, Venezuela. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **263**, 246-258.
- Rollion-Bard C., Mangin D., Champenois M. (2007) Development and applications of oxygen and carbon isotopic measurements of biogenic carbonates by ion microprobe. *Geostand. Geoanal. Res.*, **31**, 1, 39-50.
- Rollion-Bard C., Vigier N., Spezzaferri S. (2007). *In situ* measurements of calcium isotopes by ion microprobe in carbonates and application to foraminifera. *Chem. Geol.* **244**, 679-690.
- Vigier N., Rollion-Bard C., Spezzaferri S., Brunet F. (2007) *In situ* measurements of Li isotopes in foraminifera. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **G3**, **8**, 1, 1-9.
- 2006**
- Aucour A., France-Lanord C., Pedoja K., Pierson-Wickmann A., and Sheppard S. (2006) Fluxes and sources of particulate organic carbon in the Ganga-Brahmaputra river system. *Global Biogeochemical Cycle*, **20**, doi: 10.1029/2004GB002324.
- Bayon G., Vigier N., Burton K. W., Brenot A., Carignan J., Etoubleau J., Chu N. C. (2006) The control of weathering processes on riverine and seawater hafnium isotope ratios. *Geology*, **34**, 6, 433-436.
- Bernet M., Van der Beek P., Pik R., Huyghe P., Mugnier J. L., Labrin E., Szulc A. (2006) Miocene to recent exhumation of the central Himalaya determined from combined detrital zircon fission-track and U/Pb analysis of Siwalik sediments, western Nepal. *Basin Res.*, **18**, 4, 393-412.
- Blard P. H., Bourlès D., Lavé J., Pik R. (2006), Applications of ancient cosmic-ray exposures: theory, techniques and limitations. *Quatern. Geochron.*, **1**, 59-73.
- Blard P. H., Pik R., Lavé J., Bourlès D., Burnard P. G., Yokochi R., Marty B., Trusdell F. (2006) Cosmogenic  $^3\text{He}$  production rates revisited from evidences of grain size dependent release of matrix-sited helium. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **247**, 3-4, 222-234.
- Gajurel A. P., France-Lanord C., Huyghe P., Guilmette C., Gurung D. (2006) C and O isotope compositions of modern fresh-water mollusc shells and river waters from the Himalaya and Ganga plain. *Chem. Geol.*, **233**, 1-2, 156-183.
- Gannoun A., Burton K. W., Vigier N., Gislason S. R., Rogers N., Mokadem F., Sigfusson B. (2006) The influence of weathering process on riverine osmium isotopes in a basaltic terrain. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **243**, 3-4, 732-748.
- Gayer E., Lavé J., Pik R., France-Lanord C. (2006) Monsoonal forcing of Holocene glacier fluctuations in Ganesh Himal (Central Nepal) constrained by cosmogenic  $^3\text{He}$  exposure ages of garnets. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **252**, 3-4, 275-288.
- Kraml M., Pik R., Rahn M., Selbekk R., Carignan J., Keller J. (2006) A new multi-mineral age reference material for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , (U-Th)/He and fission track dating methods: the Limberg t3 tuff. *Geostand. Geoanal. Res.*, **30**, 2, 73-86.
- Rose-Koga E. F., Sheppard S. M. F., Chaussidon M., Carignan J. (2006) Boron isotopic composition of atmospheric precipitations and liquid-vapour fractionations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 7, 1603-1615.
- Singh S., Kumar A., France-Lanord C. (2006) Sr and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in waters and sediments of the Brahmaputra river system: Silicate weathering,  $\text{CO}_2$  consumption and Sr flux. *Chem. Geol.*, **234**, 3-4, 308-320.
- Vigier N., Burton K. W., Gislason S. R., Rogers N., Duchêne S., Thomas L., Hodge E., Schaefer B. (2006) The relationship between riverine U-series disequilibria and erosion rates in a basaltic terrain. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **249**, 3-4, 258-273.
- Wen H., Carignan J., Qiu Y., Liu S. (2006) Selenium speciation in kerogen from two Chinese selenium deposits: environmental implications. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 4, 1126-1132.
- 2005**
- Blard P. H., Lavé J., Pik R., Quidelleur X., Bourlès D., Kieffer G. (2005) Fossil cosmogenic  $^3\text{He}$  record from K-Ar dated basaltic flows of Mount Etna volcano (Sicily,  $38^\circ\text{N}$ ): evaluation of a new paleoaltimeter. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 3-4, 613-631.
- Burnard P., Harrison D. (2005) Argon isotope constraints on modification of oxygen isotopes in Iceland Basalts by superficial processes. *Chem. Geol.*, **316**, 1-2, 143-156.
- Singh S., Sarin M. M., France-Lanord C. (2005) Chemical erosion in the eastern Himalaya: major ion composition of the Brahmaputra and  $\delta^{13}\text{C}$  of dissolved inorganic carbon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 14, 3573-3588.
- Vigier N., Bourdon B., Lewin E., Dupré B., Turner S., Chakrapani G. J., van Calsteren P., Allègre C. J. (2005) Mobility of U-series nuclides during basalt weathering: An example from the Deccan Traps (India). *Chem. Geol.*, **219**, 1-4, 69-91.
- Yokochi R., Marty B., Pik R., Burnard P. (2005) High  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in peridotite xenoliths from SW Japan revisited: evidence for cosmogenic  $^3\text{He}$  released by vacuum crushing. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **G3**, **6**, 1, 1-12.
- 2004**
- Evans M. J., Derry L. A., France-Lanord C. (2004) Geothermal fluxes of alkalinity in the Narayani river system of central Nepal. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **G3**, **5**, 8, 1-21.
- Garzanti E., Vezzoli G., Ando S., France-Lanord C., Singh S. K., Foster G. (2004) Sand petrology and focused erosion in collision orogens: the Brahmaputra case. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **220**, 1-2, 157-174.
- Gayer E., Pik R., Lavé J., France-Lanord C., Bourlès D., Marty B. (2004) Cosmogenic  $^3\text{He}$  in Himalayan garnets indicating an altitude dependence of the  $^3\text{He}/^{10}\text{Be}$  production ratio. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **229**, 1-2, 91-104.
- Millot R., Guerrot C., Vigier N. (2004) Accurate and high-precision measurement of lithium isotopes in two reference materials by MC-ICP-MS. *Geostand. Geoanal. Res.*, **28**, 1, 153-159.
- Tachikawa K., Roy-Barman M., Michard A., Thouron D., Yeghicheyan D., Jeandel C. (2004) Neodymium isotopes in the Mediterranean sea: comparison between seawater and sediment signals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 3095-3106.
- Nédélec A., Affaton P., France-Lanord C., Charrière A., Alvaro J. (2007) Sedimentology and chemostratigraphy of the Bwipé Neoproterozoic cap dolostones (Ghana, Volta Basin): a record of microbial activity in a peritidal environment. *C. R. Geosciences*, **339**, 223-239.

## PUBLICATIONS DE RANG A3

## LES LIVRES ET LES CHAPITRES DE LIVRES

Blamart D., Rollion-Bard C., Cuif J. P., Juillet-Leclerc A., Lutringer A., van Weering T. C. E., Henriot J. P. (2005) C and O isotopes in a deep-sea coral (*Lophelia pertusa*) related to skeletal microstructure. In: *Freiwald A, Roberts JM, (Ed.) (Eds), Cold-water corals and ecosystems, Springer-Verlag*. 1005-1020.

Watanabe T., Juillet-Leclerc A., Cuif J.-P., Rollion-Bard C., Dauphin Y. & Reynaud S. (2006) Recent advances in coral biomineralization with implications for paleoclimatology: a brief overview. In: *Global Climate Change and response of Carbon Cycle in the Equatorial Pacific and Indian Oceans and adjacent land masses. EOS*, 73, 245-262.



## BILAN DU THÈME : ACTIVITÉS ANTHROPIQUES ET VALORISATION

Chercheurs CNRS : 7  
Chercheur IRD : 1  
Enseignant-chercheurs : 3  
Doctorants : 8  
Post-doctorants : 1

Nombre de publications de rang A : 32 (20A1, 2A2, 10A3)  
Nombre de publications de rang B : 12  
Nombre de chapitres de livres : 1  
Nombre de thèses soutenues : 4

### INTRODUCTION

Ce thème avait pour but de valoriser la recherche dans les domaines des ressources naturelles non-renouvelables et de la protection de l'environnement. Certaines approches ont été valorisées auprès de partenaires industriels (expertise et développement) ainsi qu'auprès de pays émergents (formation).

Deux volets principaux ont été abordés:

1) ressources et dispersion/stabilisation des polluants et 2) les gemmes. Dans le premier volet, nous avons travaillé à la fois sur les métaux dans l'environnement, sur la ressource en eau ainsi que sur le confinement des déchets ultimes, que sont les résidus d'incinération et de combustion

nucléaire. Un de nos programmes concernait l'analyse de très faibles variations isotopiques de l'hélium atmosphérique et le traçage du cycle court du carbone. Seuls les aspects techniques nécessaires à la conduite de ce projet ont été réalisés. Nos études sur les gemmes se sont consacrées à la caractérisation des pierres précieuses et semi-précieuses (corindons et émeraudes) en vue d'applications historiques et d'actions d'expertise gemmologique. Nous avons aussi travaillé à la compréhension des processus de formation des différents gisements de pierres gemmes.

### BILAN DES TRAVAUX

#### RESSOURCES ET DISPERSION/STABILISATION DES POLLUANTS

*Chercheurs: Peter Burnard, Jean Carignan, Etienne Deloule, Christian France-Lanord, Guy Libourel, Bernard Marty, Alain Ploquin, Nathalie Vigier.*

*Etudiants: Sandrine Baron, Emile Bolou-Bi Bolou, Agnès Brenot, Mathieu Bureau, Christophe Cloquet, Nicolas Estrade, Sophie Giannesini, Aurélie Verney-Carron.*

*Post-doctorant: H. Wen*

*Collaborations principales: société HAGANIS (Metz), T. Sterckeman (ENSAIA), F. Jorand (LCPME), J. Sonke (LMTG, Toulouse), O. Donard (LCABIE, Pau), J. Sterpenich (G2R, Nancy), S. Gin et P. Jollivet (CEA, Marcoule), J. Lancelot (CEREGE Nimes), Frédéric Villieras (LEM), S. Buschaert (ANDRA), E. Dambrine (INRA), Marc Benoit (INRA), L. François (FNRS-Liège), G. Bayon (IFREMER-Brest), R. Millot (BRGM-Orléans).*



## MÉTAUX-ATMOSPHÈRE

L'objectif général était de déterminer l'impact environnemental de la pollution par les métaux du aux activités anthropiques, et ce, à différentes échelles.

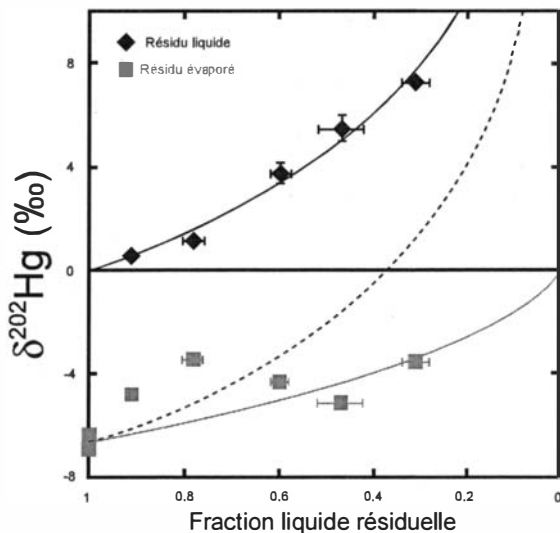
Les travaux ont été (sont) effectués essentiellement dans le cadre de 3 thèses:

1- historique et dispersion d'une pollution médiévale sur le plateau du Mont Lozère (Sandrine Baron, 2002-2005). Nous avons: i- tracé les gisements sources approvisionnant les fonderies médiévales, ii- par l'étude d'une tourbière, découvert une activité métallurgique importante d'âge gallo-romain dans le sud de la France, iii- documenté un mode de dispersion essentiellement «physique» de la pollution médiévale dans les sols. Seul le Zn semble être

lessivé de façon significative.

2- dispersion atmosphérique des métaux en milieu urbain et péri-urbain: approches géochimique et isotopique (Christophe Cloquet 2002-2005). Nous avons: i- caractérisé minéralogiquement, chimiquement et isotopiquement, les différents effluents de l'UVE (unité de valorisation énergétique - incinérateur d'ordures ménagères) de Metz et établi des bilans d'entrée et sortie des métaux, ii- documenté la dispersion des retombées atmosphériques des métaux en milieu urbain et péri-urbain avant et 2 ans après la mise en route de l'UVE et constaté aucune influence significative (avec les traceurs utilisés), iii- développé de nouveaux outils isotopiques (Cd, Zn) et documenté les processus de volatilisation et condensation des métaux au sein de l'UVE, iv- démontré la possibilité de tracer la pollution dans les sols par l'utilisation des isotopes du Cd.

3- géochimie isotopique du Se et du Hg et traçage de la pollution environnementale (Nicolas Estrade 2006-2009). Les travaux préliminaires de la thèse de N. Estrade ont porté sur les fractionnements isotopiques du Hg dans le système liquide-vapeur. Nous avons démontré des fractionnements significatifs entre les deux phases. Dans un système sous vide, le facteur de fractionnement du rapport  $^{202}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$  entre  $\text{Hg}_{\text{liq}}$  et  $\text{Hg}_{\text{vap}}$  à 22°C est de l'ordre de 7‰ (FigAAV1 ci-contre) et diminue progressivement vers 0‰ avec une augmentation de température jusqu'à 100°C. La variation thermodépendante du fractionnement isotopique est interprétée comme le changement d'un système à dominante cinétique à faible température vers un système à dominante d'équilibre à plus haute température.



FigAAV1. La variation de composition isotopique du Hg liquide et Hg évaporé en fonction de la fraction de liquide résiduelle indique un fractionnement liquide-vapeur de 6,7‰ à 22°C (Estrade et al. soumis à GCA).

### Les sources de financement

#### Fonctionnement :

- 1- Ministère de la Culture: Projet Collectif de Recherche (PCR) «Plomb Ancien du Mont-Lozère»
- 2- Contrat avec la société HAGANIS (gestion de l'UVE de Metz): 2001-2004: 50 K€/an; 2006-2007: 23 K€/an.

#### Co-financement de thèses :

- 1- ADEME/Région Languedoc-Rousillon, 2- ADEME/HAGANIS, 3- ADEME/BRGM

## HE ATMOSPHÉRIQUE

Nous avons proposé de développer l'analyse isotopique de l'He atmosphérique par spectrométrie de masse dynamique, en développant avec un constructeur un nouvel appareil. En effet, l'He est un élément inerte et conservatif relâché dans l'atmosphère conjointement avec les combustibles fossiles. Nous avons émis l'hypothèse que la composition isotopique de l'He atmosphérique permettra de mieux évaluer les fonctions forçantes du CO<sub>2</sub>

atmosphérique.

Cette thématique était directement liée au montage de la plateforme analytique des gaz rares. Cette dernière est maintenant en place et opérationnelle mais le projet spécifique de la mesure de composition isotopique de l'He atmosphérique n'a pas été financé suite à notre demande ANR. Ce projet de recherche sera certainement rapporté au prochain plan quadriennal du CRPG.

## Les sources de financement

Fonctionnement et équipement:

CNES-CNRS-Région Lorraine (environ 15 K€ pour le montage du spectromètre de masse SFT - Split Flight Tube)

GV Instrument et CRPG (environ 20 K€ pour le montage de la ligne de purification de He)

### LA ZONE ATELIER MOSELLE (Z.A.M.)

Le projet de la Zone Atelier du bassin de la Moselle (Z.A.M.) regroupe plusieurs laboratoires CNRS et universitaires de la région de Nancy et Metz. Il a pour but de contribuer à la maîtrise de la qualité et de l'approvisionnement en eau pour les agglomérations d'Epinal, de Nancy et de Metz.

Les travaux ont été (sont) effectués essentiellement dans le cadre de 3 thèses (Agnès Brenot, Emile Bolou-Bi Bolou et Mathieu Bureau) et ont traité des aspects suivants:

**1- caractérisation chimique et isotopique des différents «entrants» dans le système.** Nous avons travaillé essentiellement sur la composition en éléments dissous de la rivière Moselle et de ses principaux affluents et particulièrement sur la teneur et composition isotopique en S et O des sulfates (Agnès Brenot 2002-2005). Nous avons pu discriminer les sources naturelles des sources anthropiques et faire un bilan des flux d'exportation de  $\text{SO}_4$  en tenant compte de la géologie du bassin et des pratiques agricoles.

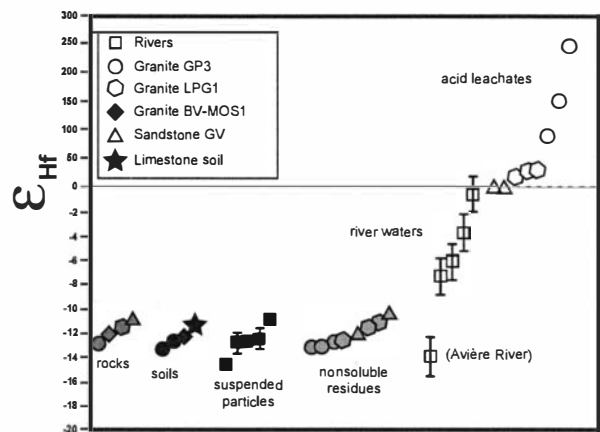
**2- composition de l'eau en fonction des conditions climatiques.** Nous avons travaillé essentiellement sur la composition en  $\delta\text{D}$  de l'eau issue de différents compartiments (précipitations, sources, sols -drains et bougies poreuses, affluents, rivières majeures - Madon et Moselle) échantillonnée à différentes saisons et régimes hydriques (Agnès Brenot 2002-2005). Nous avons établi une saisonnalité du signal  $\delta\text{D}$  et estimé des temps de séjours pour les différentes masses d'eau (Mathieu Bureau 2004-2007).

**3- développement de traceurs isotopiques et application en hydrochimie.**

i- Nous avons démontré un contraste isotopique du Mg entre les eaux drainant des lithologies silicatées et exclusivement carbonatées/évaporitiques, ainsi qu'un fractionnement isotopique significatif du Mg lors de l'altération des silicates et de la bio-accumulation par les plantes (Agnès Brenot et Emile Bolou-Bi Bolou 2005-2008).

ii- Nous avons démontré que les lithologies carbonatées/évaporitiques peuvent être contributeurs d'importantes quantités de Li dissous et que la composition isotopique du Li dissous peut dépendre en partie de la nature des lithologies silicatées. Ce dernier point met en cause l'hypothèse selon laquelle la composition isotopique du Li dissous dans les eaux de rivières refléterait exclusivement le taux d'altération des roches silicatées.

iii- Nous avons démontré que la dissolution incongruente des fractions silicatées des bassins versants engendre une composition isotopique «radiogénique» de l'Hf dissous (FigAAV2 ci-dessus), possiblement contrôlé par la dissolution préférentielle d'apatite, et que l'apport en eau des rivières aux océans peut contribuer à la composition isotopique particulière de l'Hf des océans par rapport aux compositions isotopiques du Nd.



FigAAV2. Compositions isotopiques de Hf des différents constituants du bassin de la Moselle amont (Vosges) montrant une dissolution incongruente des minéraux. Le caractère «radiogénique» de Hf dissous suggère une dissolution préférentielle de l'apatite et possiblement du sphène (Bayon et al. 2006, Geology).

**4- Etablissement d'un modèle hydro-biogéologique.**

Nous avons travaillé essentiellement sur la modélisation des interactions eau-végétation-sols-roches sur de petits bassins de la Moselle amont, à lithologies granitique et gréseuse (Mathieu Bureau 2004-2007). Le modèle regroupe :

i- un module calculant les bilans en carbone, eau et azote de l'écosystème

ii- un module hydrologique simple à l'échelle du bassin versant permettant de réaliser des bilans hydriques entre le sol, la nappe et la rivière,

iii- un module simulant les interactions entre l'eau et la roche à l'échelle du bassin versant, prenant en compte six éléments majeurs: Na, K, Mg, Ca, Si, Al

Le modèle global doit, à terme, pouvoir fonctionner à l'échelle de petits et moyens bassins

versants. Les tests de sensibilités révèlent que les principaux facteurs qui influent sur la réponse du modèle sont la lithologie et le climat, notamment les précipitations annuelles. On a également pu vérifier l'influence de l'hydrologie, avec une

différence de comportement très importante entre les sites sur grès où l'eau s'infiltré et à un temps de résidence de plusieurs années et les sites sur granite où une formation glacière imperméable dans les sols force l'eau à ruisseler.

### Les sources de financement

#### Fonctionnement :

CNRS et Région Lorraine (environ 2000 €/an pour le fonctionnement des thèses)

CNRS (collaboration France-Belgique 2005-2006: 5100 €)

Equipement

Etat, Région Lorraine, CNRS: mise à niveau des spectromètres de masse (TIMS 60 K€, MC-ICP-MS 40 K€)

#### Co-financement de thèses :

1- CNRS/Région Lorraine (2 thèses)

2- Ministère

### STOCKAGE ET COMPORTEMENT À LONG TERME

Deux volets ont ici été étudiés :

1- le comportement des matrices de stockage de déchets face à l'altération et

2- l'hydrologie isotopique d'un site potentiel de stockage de déchets nucléaires, le site de Bure. Ces travaux ont été effectués, entre autre, dans le cadre de 2 thèses (Aurélien Verney-Carron et Sophie Giannesini)

#### Matrice de stockage

1- Expérience d'altération de colis de verre et processus diffusionnels simples. L'objectif était, ici, de comprendre la formation de la pellicule d'altération suite à l'altération d'un verre et de dimensionner les mécanismes de diffusion mis en jeu. Grâce à des expériences de lixiviation sur un verre analogue de stockage de déchets nucléaires, nous avons pu montrer le rôle important de la précipitation de phyllosilicates ainsi que leur rôle dans l'effet protecteur des gels. Master Sophie Poix (2005).

Grâce à des mesures SIMS sur des verres archéologiques, nous avons pu montrer le rôle essentiel de la composition du verre sur la diffusion de H<sub>2</sub>O au delà de l'interface verre altéré - verre sain et que l'échange ionique entre l'hydrogène et les cations modificateurs de réseau jouait le rôle essentiel lors de l'hydratation des verres. Sterpenich et Libourel (2006).

2- Structure locale des gels d'altération par couplage SIMS-RMN et utilisation de traceurs isotopiques. L'originalité de ce projet résidait dans le traçage isotopique de la solution altérante en <sup>29</sup>Si, <sup>17</sup>O et D de façon à produire des gels enrichis et permettant l'exploitation de ces différents isotopes comme sondes locales et sélectives de la structure de ces gels. Malgré le classement de

cette thèse en haute priorité par le CEA et son financement assuré par cet organisme, aucun candidat n'a franchi la barre des sélections du CEA.

3- Etude d'analogues naturels (Aurélien Verney-Carron 2005-2008). La connaissance du comportement à long terme des déchets nucléaires dans la perspective d'un stockage en formation géologique profonde passe nécessairement par l'extrapolation de résultats expérimentaux et par l'utilisation de modèles prédictifs. Dans ce cadre, nous étudions des verres archéologiques fracturés et altérés en milieu marin sur une grande échelle de temps, 1800 ans, car ils constituent une source potentielle de validation de ces modèles et de la compréhension des mécanismes sur lesquels ils reposent. Les premiers résultats montrent la pertinence de l'analogie entre les deux types de verres, notamment au niveau de leur morphologie. Ils se présentent tous deux sous forme de blocs fracturés du fait d'un refroidissement rapide à l'issue de leur élaboration.

L'objectif de ce travail est donc d'établir un modèle de la quantité de verre altéré (QVA) qui va dépendre de la vitesse d'altération (V), fonction de la surface réactive (S) et du temps (t).

#### Hydrologie du site de Bure

Nous avons engagé une thèse ANDRA tournée vers le traçage hydrogéochimique du Callovo-Oxfordien et des formations proches sur le site du laboratoire souterrain de Bure (Sophie Giannesini 2003-2006). Dans ce cadre, notre

engagement a été plus particulièrement l'analyse isotopique H et O de l'eau de porosité dans ces formations à très faible porosité. Un protocole spécifique a été développé pour ce type d'analyse couplant plusieurs approches d'analyses

isotopiques (équilibre isotopique avec du CO<sub>2</sub>, déshydratation et dilution-centrifugation) et une estimation des statuts physiques de l'eau réalisée en collaboration avec le LEM (F. Villieras). Cette approche permet maintenant une analyse fiable de l'eau de porosité sur carottes. Les résultats obtenus sur le Callovo-Oxfordien et les formations

adjacentes montrent l'origine purement météorique de l'eau du Callovo-Oxfordien et un contraste marqué avec les eaux présentes dans les calcaires oxfordiens sus-jacents. Ce projet se poursuit dans le cadre de l'étude de la zone d'endommagement du laboratoire souterrain.

#### Les sources de financement

Fonctionnement et Co-financement de thèses : CEA (15 K€), ANDRA, GDR FORPRO (24,4 K€)

### LES GEMMES

**Chercheurs :** G. Giuliani, D. Ohnenstetter, A. Cheilletz

**Etudiants:** Saholy Rakotosamizany

**Collaborateurs:** J. Dubessy (CREGU-UMRG2R); V. Garnier (ex-CRPG/CNRS), A.E. Fallick (SUERC, Glasgow, GB), M.A.F. Rakotondrazafy (Université d'Antananarivo), D. Schwarz (Institut Gubelin), Ph. De Donato et O. Barrès (LEM), J. Pironon (G2R - CREGU)

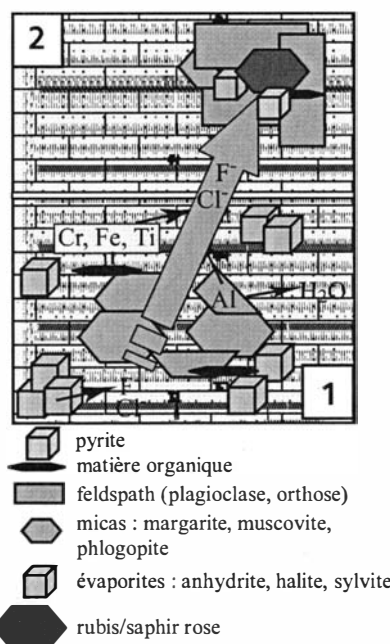
### LES CORINDONS

Les travaux initiés par Virginie Garnier et continués en partie dans le cadre de la thèse de S. Rakotosamizany (2007-2009) comportaient trois aspects principaux.

1) Traceurs isotopiques et géochimiques pour la caractérisation des rubis et saphirs mondiaux. A l'instar de ce qui avait déjà été réalisé sur les émeraudes, la mesure des rapports isotopiques <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O des rubis et des saphirs a permis d'établir une banque de données mondiale et de caractériser l'origine géologique des corindons gemmes. Cette méthode isotopique est transposable aux pierres précieuses taillées et historiques.

2) Genèse des gisements de rubis associés aux marbres d'Asie centrale et du Sud-Est. La poursuite des recherches sur la compréhension des processus d'interactions fluide-roche par l'utilisation de traceurs géochimiques, minéralogiques et isotopiques a permis d'établir un modèle métallogénique révolutionnaire pour la formation des gisements de rubis associés aux marbres d'Asie : les sels fondus résultant de la fusion d'évaporites intercalées dans des calcaires mobilisent lors du métamorphisme himalayen à T~650°C, l'aluminium et le chrome présents en traces dans les calcaires pour former le rubis (FigAAV3 ci-contre).

3) Genèse des gisements de rubis et saphirs associés aux basaltes alcalins de Madagascar (S. Rakotosamizany 2007-2009).



FigAAV 3. Modèle de genèse des rubis associés aux marbres de l'Asie. 1: stade pré-métamorphique.

2: stade métamorphique. (Giuliani et al. 2007, Short course series, GAC - MAC).

#### Les sources de financement

Fonctionnement et financement de thèse :

1) Programme de coopération internationale IRD et Université d'Antananarivo (2004-2008) Caractérisation géologique et gemmologique des gisements de rubis et saphirs de Madagascar (40 keuros)

2) Projet de Gouvernance des Ressources Minérales, Ministère de l'Energie et des Mines de la République de Madagascar et le CRPG/CNRS avec la participation de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo (2005-2008). Les minéralisations à corindons gemmes de Madagascar : (15 keuros)

## LES EMERAUDES

Les travaux concernant les émeraudes ont porté sur l'identification de traceurs atomiques et moléculaires pour la caractérisation de minéraux à anneaux silicatés de type béryl. Ce projet constitue la continuité des travaux réalisés au CRPG sur les béryls brésiliens (B. Charoy) et les gisements d'émeraude de Colombie et du Brésil (A. Cheilletz, G. Giuliani et J.L. Zimmermann). Il s'attachait plus particulièrement à l'étude fine des fluides (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, pseudo-carbonate) piégés dans les canaux du béryl et les minéraux à structure silicatée (cordiérite). La quantification précise des fluides piégés est rendue possible par l'utilisation de sondes moléculaires (micro-spectroscopie

infrarouge) couplées à des mesures par microsonde Raman et ATVC. La distinction des différents types de gisement est appréciée par détermination des spéciations isotopiques du CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O au moyen de la micro-spectroscopie infrarouge (de Donato et al., 2004) qui possède l'avantage énorme d'être une méthode non destructive. Les résultats peuvent être validés par microsonde ionique (méthode *in-situ* destructive) et spectrométrie de masse (méthode destructive). Le traçage des gisements d'émeraude dans le monde à l'aide des isotopes de l'oxygène a par ailleurs été poursuivi (Zwann et al., 2004).

## LES PUBLICATIONS RELATIVES AU THÈME ACTIVITÉS ANTHROPIQUES ET VALORISATION

Les publications du CRPG sont présentées suivant la méthode d'évaluation par quartiles utilisée par la section 18 du Comité National du CNRS.

- Le premier quartile (A1) correspond aux revues ayant un impact factor supérieur ou égal à 1,6
- Le deuxième quartile (A2) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 1 et 1,6
- Le troisième quartile (A3) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 0,6 et 1
- Le quatrième quartile (B) correspond aux revues ayant un impact factor inférieur à 0,6

### PUBLICATIONS DE RANG A1

- 2007**
- Cloquet C., Carignan J., Lehmann M.F., Vanhaecke F. (sous presse). Variation in the isotopic composition of zinc in the natural environment and the use of zinc isotopes in biogeosciences. *Anal. Bioanal. Chem.*
- Brenot, A., Carignan, J., France-Lanord, C., Benoit, M. (2007). Geological and land use controls on  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of river dissolved sulfate : the Moselle river basin, France. *Chem. Geol.* **244**, 25-41.
- Carignan J. and Wen H. (2007) Scaling NIST SRM 3149 for Se isotope analysis and isotopic variations of natural samples. *Chem. Geol.*, **242**, 347-350.
- Giuliani G., Fallick A., Rakotondrazafy M., Ohnenstetter D., et al. (2007) Oxygen isotope systematics of gem corundum deposits in Madagascar: relevance for their geological origin. *Mineralium Depos.*, **42**, 251-270.
- Wen H. and Carignan J. (2007). Reviews on atmospheric selenium: emissions, speciation and fate. *Atmos. Environ.*, **41**, 7151-7165.
- 2006**
- Baron S., Carignan J., Laurent S., Ploquin A. (2006) Medieval lead making on Mont-Lozère Massif (Cévennes-France): tracing ore sources using Pb isotopes. *Ap. Geochem.*, **21**, 214-252.
- Baron S., Carignan J., Ploquin A. (2006) Dispersion of heavy metals (metalloids) in soils from 800-year-pollution (Mont-Lozère, France. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 5319-5326.
- Bayon G., Vigier N., Burton K. W., Brenot A., Carignan J., Etoubleau J., Chu N. C. (2006) The control of weathering processes on riverine and seawater hafnium isotope ratios. *Geology*, **34**, 6, 433-436.
- Cloquet C., Carignan J., Libourel G. (2006) Atmospheric pollutant dispersion around an urban area using trace metal concentrations and Pb isotopic compositions in epiphytic lichens. *Atmos. Environ.*, **40**, 3, 574-587.
- Cloquet C., Carignan J., Libourel G. (2006) Isotopic composition of Zn and Pb atmospheric depositions in an urban/periurban area of northeastern France. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 21, 6594-6600.
- Cloquet C., Carignan J., Libourel G., Sterckeman T., Perdrix E. (2006) Tracing source pollution in soils using cadmium and lead isotopes. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 2525-2530.
- Rose-Koga E. F., Sheppard S. M. F., Chaussidon M., Carignan J. (2006) Boron isotopic composition of atmospheric precipitations and liquid-vapour fractionations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 7, 1603-1615.
- Sterckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Proix N., Schvartz C., Carignan J. (2006) Trace element distributions in soils developed in loess deposits from northern France. *Eur. J. Soil Sci.*, **57**, 392-410.
- Wen H., Carignan J., Qiu Y., Liu S. (2006) Selenium speciation in kerogen from two Chinese selenium deposits: environmental implications. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 4, 1126-1132.
- 2005**
- Baron S., Lavoie E., Ploquin A., Carignan J., Pulido M., De Beaulieu J. L. (2005) Record of metal workshops in peat deposits: history and environmental impact on the Mont Lozère Massif, France. *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 14, 5131-5140.
- Carignan J., Libourel G., Cloquet C., Le Forestier L. (2005) Lead isotopic composition of fly ash and flue gas residues from municipal solid waste combustors in France: implications for atmospheric lead source tracing. *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 2018-2024.

- Cloquet C., Rouxel O., Carignan J., Libourel G. (2005) Natural Cadmium isotopic variations in eight geological reference materials (NIST 2711, BCR 176, GSS 1, GXR-1, GXR-2, Nod-P-1, Nod-A-1) and anthropogenic samples, measured by MC-ICP-MS. *Geostan. Geoanalyt. Res.*, **29**, 1, 95-106.
- Giuliani G., Fallick A. E., Garnier V., France-Lanord C., Ohnenstetter D. (2005) Oxygen isotope composition as a tracer for the origins of rubies and sapphires. *Geology*, **33**, 4, 249-252.

- Sterpenich J., Libourel G. (2006) Water diffusion in silicate glasses under natural weathering conditions: evidence from buried medieval stained glasses. *J. Non-Cryst. Solids*, **352**, 3-4, 5446-5451.

- Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D. et al. (sous presse) Marble-hosted ruby deposits from central and southeast Asia: towards a new genetic model. *Ore Geology Reviews*.
- Rakotondrzafy M., Giuliani G., Fallick A. E., Ohnenstetter D., Andriamamonjy A., Rakotosamizanany S., Ralantoarison Th., Razanatsheho M., Offant Y., Garnier V., Maluski H., Dunaigre Ch., Schwarz D., Mercier A., Ratrimo V., Ralison B. (sous presse): Gem corundum deposits in Madagascar: a review. *Ore Geology Reviews*.
- Turner D., Groat L. A., Hart C. J. R., Mortensen J. K., Linnen R. L., Giuliani G., Wengzynowski W. (2007). Mineralogical and geochemical study of the true blue aquamarine showing, Southern Yukon. *Can. Mineral.* **43**, 203-227.
- Wen H., Carignan J., Hu R., Fan H., Chan B., Yang G. (2007). Large Selenium isotopic variations in the Yutangba Se deposit, Hubei Province and its implication for Se enrichment. *Chinese Sci. Bull.*, **52**, 2443-2447.
- Garnier V., Maluski H., Giuliani G., Ohnenstetter D., Schwarz D. (2006) Ar-Ar and U-Pb ages of marble-hosted ruby deposits from central and southeast Asia. *Can. J. Earth Sci.*, **43**, 509-532.

- Giuliani G., Ohnenstetter D., Rakotondrzafy M. et al. (2007). Les gisements de corindons gemmes de Madagascar. *Revue de Gemmologie, AFG*, **159**, 14-28.
- Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Schwarz D., Kausar A.B. (2006) Les gisements de rubis associés aux marbres de l'Asie Centrale et du Sud-Est. *Le Règne Minéral*, **67**, 17-48.
- Ralantoarison T., Andriamamonjy A., Giuliani G., Rakotondrzafy A.F.M., Ohnenstetter D., Schwarz D., Fallick A., Razanatsheho M., Rakotosamizanany S., Moine B., Baillot P. (2006). Les saphirs multicolores de Sahambano et Zazafotsy, région granulitique d'Ihosy, Madagascar. *Revue de gemmologie, AFG*, **158**, 4-13.
- Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Kausar A. B., Hoang Quang V., Pham Trong T., Pham Van L. (2005) Les gisements de rubis du Pakistan et du Viêt-Nam. *Revue de Gemmologie*, **151**, 6-12.
- Giuliani G., Fallick A. E., Garnier V., France-Lanord C., Ohnenstetter D., Schwarz D. (2005) Les isotopes de l'oxygène, un traceur de l'origine géologique des rubis et saphirs. *Revue de Gemmologie*, **152**, 9-11.

- Giuliani G., Ohnenstetter D., Garnier V., Fallick A., Rakotondrzafy M., Schwarz D. (2007). The geology and genesis of gem corundum deposits. *Short course GAC-MAC*.

## 2004

- Carignan J., Cardinal D., Eisenhauer A., Galy A., Rehkämper M., Wombacher F., Vigier N. (2004) A reflection on Mg, Cd, Ca, Li and Si isotopic measurements and related materials. *Geostand. Geoanal. Res.*, **28**, 1, 139-148.
- De Donato P., Cheilletz A., Barres O., Yvon J. (2004) Infrared spectroscopy of OD vibrators in minerals at natural dilution: hydroxyl groups in talc and kaolinite, and structural water in beryl and emerald. *Ap. Spectros.*, **58**, 5, 521-527.

## PUBLICATIONS DE RANG A2

- Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Fallick A. E., Phan Trong T., Hong Quang V., Pham Van L., Schwarz D. (2005) Basalt petrology, zircon ages and sapphire genesis from Dak Nong, southern Vietnam. *Min. Mag.*, **69**, 1, 21-38.

## PUBLICATIONS DE RANG A3

- Chabaux F., Riotte J., Schmitt A. D., Carignan J., Herckes P., Pierret M. C., Wortham H. (2005) Variations of U and Sr isotope ratios in Alsace and Luxembourg rain waters: origin and hydrogeochemical implications. *C. R. Géoscience*, **337**, 1447-1456.
- Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Maluski H., Deloué E., Phan Trong T., Hoang Quang V. (2005) Age and significance of ruby-bearing marble from the red river shear zone, Northern Vietnam. *Can. Mineral.*, **43**, 4, 1315-1329.
- Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G. (2004) L'aspidolite fluorée : rôle des évaporites dans la genèse du rubis des mabres de Nangimali (Azad-Kashmir, Pakistan). *C. R. Géoscience*, **336**, 1245-1253.
- Marshall D. D., Groat L. A., Falck H., Giuliani G., Neufeld H. (2004) The Lened emerald prospect, Northwest territories, Canada: insights from fluid inclusions and stable isotopes, with implications for Northern Cordilleran emerald. *Can. Mineral.*, **42**, 5, 1523-1540.
- Zwaan J. C., Cheilletz A., Taylor B. E. (2004) Tracing the emerald origin by oxygen isotope data: the case of Sandawana, Zimbabwe. *C. R. Géoscience*, **336**, 41-48.

## LES PUBLICATIONS DE RANG B

- Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Schwarz D. (2004) Les gisements de corindon : classification et genèse. *Le Règne Minéral*, **55**, 7-35.
- Giuliani G., Garnier V., Ohnenstetter D. (2004) Du sel gemme pour les gemmes. *Pour la science*, **316**, 10-11.
- Lemarchand F., Giuliani G., Ohnenstetter D. (2004) Le sel des rubis. *La Recherche*, **379**, 81-87.
- Pham Van L., Vinh H. Q., Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Lhomme T., Shwarz D., Fallick A., Dubessy J., Trinh P. T. (2004) Gem corundum deposits in Vietnam. *Journal of Gemmology*, **29**, 129-147.
- Pham Van L., Hoang Quang V., Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Lhomme T., Shwarz D., Fallick A., Dubessy J., Phan Trong T. (2004) Gem corundum deposits in Vietnam. *Journal of Gemmology*, **29**, 129-147.
- Pham Van L., Giuliani G., Garnier V., Ohnenstetter D. (2004) Gemstones in Vietnam. A review. *Australian Gemmologist*, **22**, 162-168.
- Pham Van L., Hoang Quang Vinh, Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D. (2004) Marble-hosted ruby from Vietnam. *Canadian Gemmologist*, **25**, 83-95.

## LES CHAPITRES DE LIVRES

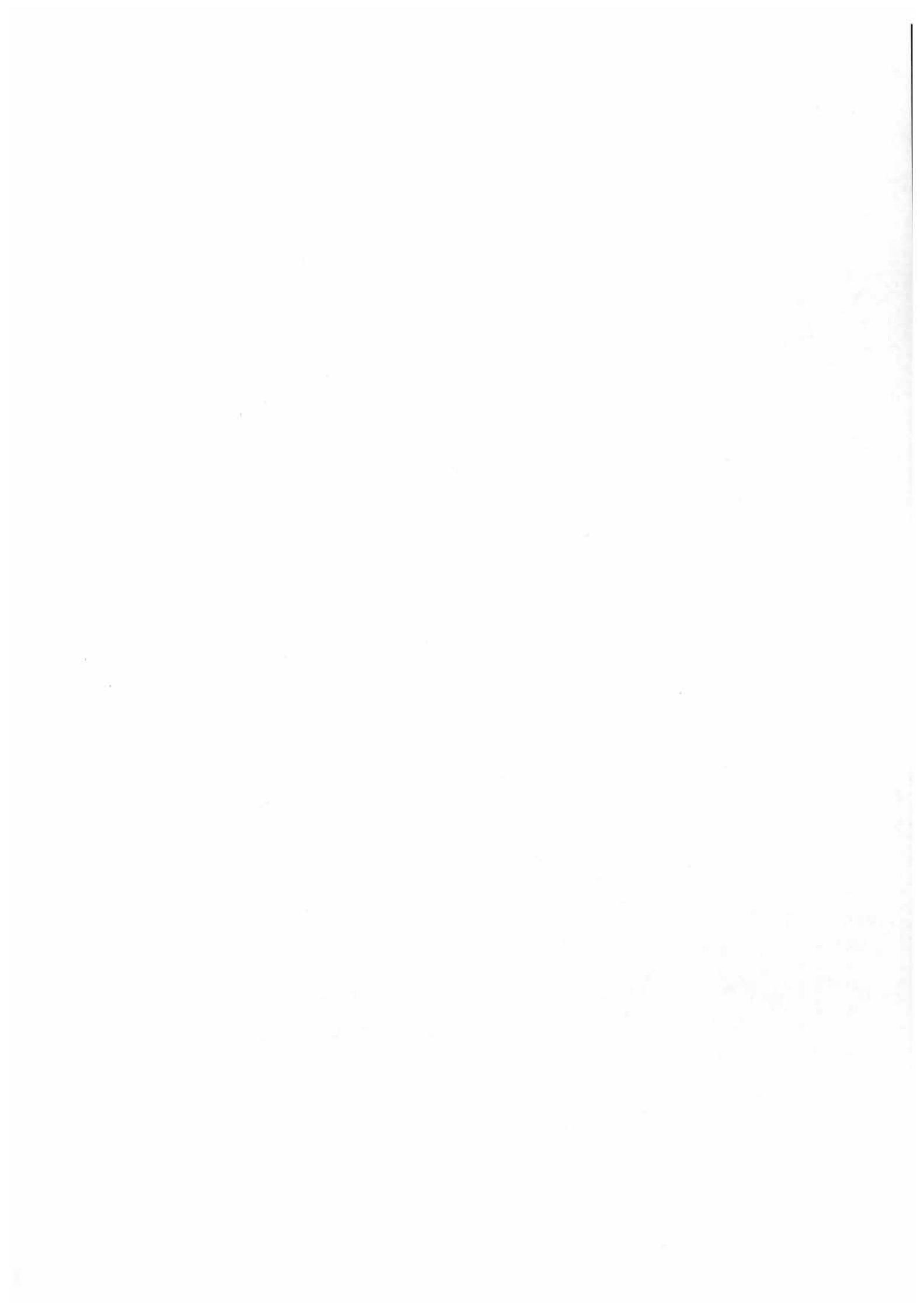
- Giuliani G., Ohnenstetter D., Garnier V., Fallick A., Rakotondrzafy M., Schwarz D. (2007). The geology and genesis of gem corundum deposits. *Short course GAC-MAC*.





# ORGANISATION INTERNE DU CRPG





# ORGANISATION INTERNE DU LABORATOIRE

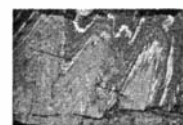
La même structure d'équipe est proposée car elle a remplie, jusqu'à présent, sa tâche de gestion des moyens et, d'une moindre manière, d'animation de la recherche. Les organigrammes suivants présentent la structure opérationnelle du CRPG. Nous pouvons y distinguer tout d'abord les équipes de recherche puis l'organisation des ITA-IATOS à travers les services, la structure administrative, les entités au service de la recherche et les laboratoires communs de la fédération de recherche EST hébergés au CRPG.

## LES ÉQUIPES DE RECHERCHE LES CHERCHEURS, ENSEIGNANTS-CHERCHEURS ET INGÉNIEURS DE RECHERCHE

L'ICÔNE INDIQUE LE THÈME DE RECHERCHE PRINCIPAL DU CHERCHEUR  
(\* ) AGENT APPARAISSANT POUR LA PREMIÈRE FOIS DANS UN RAPPORT D'ACTIVITÉ DU CRPG

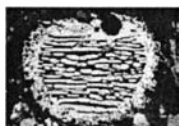
### L'ÉQUIPE GÉOCHIMIE

RESPONSABLE : ETIENNE DELOULE Directeur de recherche CNRS



**JÉRÔME ALÉON**  
Chargé de recherche CNRS  
Départ, mutation en juillet 2005

(\* ) **PETER BURNARD**  
Ingénieur de Recherche



**MARC CHAUSSIDON**  
Directeur de recherche CNRS

**CHRISTIAN FRANCE-LANORD**  
Directeur de recherche CNRS  
Directeur FR E.S.T.



**BÉATRICE LUAIS**  
Chargée de recherche CNRS

(\* ) **FRANÇOIS MARINI**  
Maître de Conférence ENSG - INPL



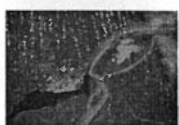
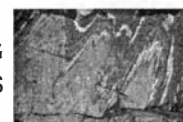
**BERNARD MARTY**  
Professeur ENSG - INPL  
Directeur du CRPG depuis 09/2002

(\* ) **FABIEN PALHOL**  
Maître de Conférence ENSG-INPL



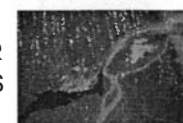
**RAPHAËL PIK**  
Chargé de recherche CNRS

**LAURIE REISBERG**  
Directeur de recherche CNRS



**CLAIRE ROLLION-BARD**  
Ingénieur de recherche CNRS

**NATHALIE VIGIER**  
Chargée de recherche CNRS

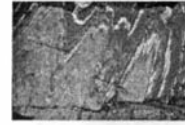


**Recrutement  
au concours  
2007**

**GUILLAUME CARO**  
Chargé de recherche CNRS

## L'ÉQUIPE GÉODYNAMIQUE ET MODÉLISATION

RESPONSABLE : MARY FORD Professeur ENSG - INPL



**SYLVAIN BOURLANGE (\*)**  
Maître de Conférence ENSG - INPL



**ALAIN CHEILLETZ**  
Professeur ENSG - INPL



**DAVID JOUSSELIN**  
Maître de Conférence ENSG - INPL



**JEAN-LAURENT MALLET**  
Professeur ENSG - INPL  
Retraite Novembre 2006



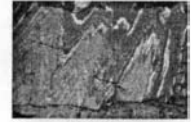
**JEAN-JACQUES ROYER**  
Ingénieur de recherche CNRS



**Recrutement  
au concours  
2007**

**PAULINE COLLON-DROUAILLET**  
Maître de Conférence ENSG - INPL

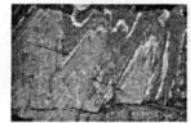
**(\*) GUILLAUME CAUMON**  
Maître de Conférence ENSG - INPL



**PIERRE JACQUEMIN**  
Ingénieur de recherche CNRS



**CHRISTIAN LE CARLIER DE  
VESLUD**  
Ingénieur de recherche CNRS  
Départ, mutation septembre 2007



**CHRISTIAN MARIGNAC**  
Professeur EMN - INPL  
Départ, mutation janvier 2008

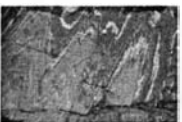


**JÉRÔME LAVÉ**  
Chargé de recherche CNRS

**Mutation du  
LGCA en  
09/2007**

## L'ÉQUIPE PÉTROLOGIE

RESPONSABLE : GASTON GIULIANI Directeur de Recherche IRD



**PIERRE BARBEY**  
Professeur UHP - Nancy1



**STÉPHANIE DUCHÊNE**  
Maître de Conférence UHP - Nancy1



**GUY LIBOUREL**  
Professeur ENSG - INPL



**MARYSE OHNENSTETTER**  
Directeur de Recherche CNRS



**MIKE TOPLIS**  
Chargé de recherche CNRS  
Départ, mutation Septembre 2004

**FRANÇOISE CHALOT-PRAT**  
Maître de Conférence UHP - Nancy1



**(\*) FRANÇOIS FAURE**  
Maître de Conférence UHP - Nancy1



**DANIEL OHNENSTETTER**  
Chargé de recherche CNRS

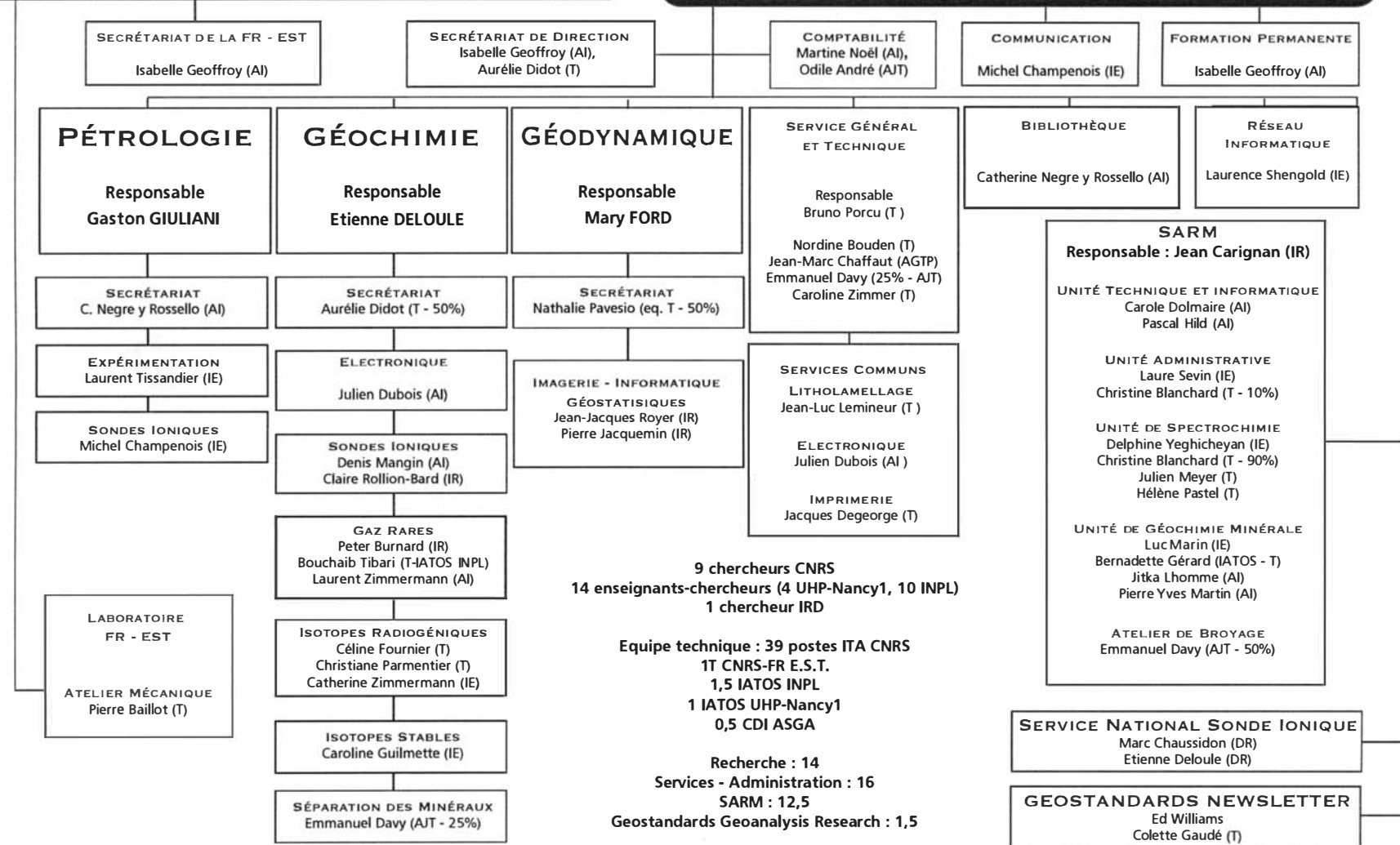


**ALAIN PLOQUIN**  
Chargé de recherche CNRS  
Retraite Décembre 2005



**FÉDÉRATION DE RECHERCHE EST (EAU-SOL-TERRE).  
DIRECTEUR CHRISTIAN FRANCE-LANORD**

**C R P G - DIRECTEUR BERNARD MARTY**



## LE CONSEIL DE LABORATOIRE

Le CRPG a renouvelé son Conseil de Laboratoire en Juin 2004. Sur la durée du dernier quadriennal il s'est réuni 14 fois. Le Conseil est constitué par :

### Le Directeur

### Le Collège ITA

Élus	Nommés
Michel CHAMPENOIS	Peter BURNARD
Christian LE CARLIER DE VESLUD	Jean CARIGNAN
Luc MARIN	Bruno PORCU
Delphine YEGHICHEYAN	Catherine ZIMMERMANN

### Le Collège Chercheurs

Élus	Nommés
Guillaume CAUMON	Sylvain BOURLANGE
Etienne DELOULE	Marc CHAUSSIDON
Stéphanie DUCHÉNE	Mary FORD
Gaston GIULIANI	Guy LIBOUREL
Raphaël PIK	Nathalie VIGIER

### Le Collège Étudiants

Élu  
Valier GALY

### Les invités permanents

Christian FRANCE-LANORD, Directeur de la FR E.S.T.  
Jean-Paul TISOT puis Amaury LEGAIT Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG)  
Pierre BARBEY, correspondant secteur Géosciences de l'UHP-Nancy1

## LE COMITÉ HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

### Membres nommés par les organisations syndicales

Titulaires :	Suppléants :
- Etienne DELOULE	- Emmanuel DAVY
- Denis MANGIN	- Pascal HILD
- Céline FOURNIER	- Maryse OHNENSTETTER
- Laurent TISSANDIER	- Laurie REISBERG
	- Caroline ZIMMER

### Membres administration

- Bernard MARTY
- Jean CARIGNAN
- Jean-Marc CHAFFAUT
- Bruno PORCU
- Catherine ZIMMERMANN

### Membre de droit

- Catherine TRECHOT (Médecin du Travail)

### Membres invités

- Pierre BAILLOT (FR E.S.T./CRPG)
- Stéphanie BRUN (DR Centre-Est)
- Delphine YEGHICHEYAN (CRPG/SARM)

# IMPLICATIONS DANS LES INSTANCES





# AU PLAN INTERNATIONAL

## Editeurs Associés pour des Revues Scientifiques Internationales

### Chemical Geology

*Christian France-Lanord (1998-2006)*

### Geochemica Cosmochimica Acta

*Bernard Marty (depuis 2000)*

### Geological Society of American Bulletin

*Christian France-Lanord (2000 - 2004)*

### Geostandards and Geoanalytical Research

*Jean Carignan (depuis 1997)*

### International Journal of Earth Sciences

*Pierre Barbey (1994 - 2006)*

### Terra Nova

*Christian France-Lanord (depuis 2001)*

### Mineralium Deposita

*Christian Marignac (depuis 2005)*

*Alain Cheilletz*

## Comités Scientifiques

### Councilor of the Meteoritical Society

*Marc Chaussidon (depuis 2003)*

### Conseil de l'European Association of Geochemistry

*Christian France-Lanord (depuis 2004)*

### Programme de Recherche International IRD - Univ. d'Antananarivo sur les gisements de corindons gemmes.

*Gaston Giuliani (2004 - 2008)*

## Membre du jury de prix internationaux

### Prix Clarke de la Geochemical Society

*Laurie Reisberg (2003 - 2006)*

### Leonard Medal de la Meteoritical Society

*Marc Chaussidon (2003 - 2006)*

### Nier Prize de la Meteoritical Society

*Marc Chaussidon (2003 - 2006)*

## NASA

### Projets NASA

### Membre de l'équipe scientifique de la mission Genesis pour l'analyse de l'azote du vent solaire

*Bernard Marty*

### Membre du Preliminary Examination Team pour la mis- sion Stardust de retour d'échantillons cométaires

*Bernard Marty*

### Membre du 'Cosmochemistry Panel' NASA

*Marc Chaussidon (depuis 2006)*



**Experts  
internationaux**

**Cellule de recrutement de l'Université de Lausanne  
Projets de recherche FCAR Canada 2004 et  
SNSF Suisse 2006**

*Pierre Barbey*

**Programme de gouvernance des Ressources Minérales (PRGM) du Ministère de l'Énergie et des Mines de Madagascar**

*Gaston Giuliani*

**Autres**

**Association Internationale de Minéralogie**

*Maryse Ohnenstetter (Secrétaire depuis mars 2002)*

**Membre of the Board of Directors, Geochemical Society**

*Laurie Reisberg (depuis 2004)*

**Joint Publications Comitee of the Geochemical Society and the Meteoritical Society**

*Bernard Marty*

**Programme Européen «CRONUS-EU»**

*Raphaël Pik (Team leader, 2004 - 2008)*

**CODATA, International**

*Jean-Jacques Royer (Trésorier)*

# AU PLAN NATIONAL

## CNRS

### Comité National

*Marc Chaussidon* (Section 18, élu, Président de la section)

*Christian France-Lanord* (Section 20, nommé)

*Daniel Ohnenstetter* (Section 18, élu)

*Daniel Ohnenstetter* (Commission 41, secrétaire)

### Conseil Scientifique du département SDU

*Etienne Deloule* (élu, secrétaire scientifique 2000-2005)

### Conseil Scientifique du département SDU

*Etienne Deloule* (élu, depuis 2006)

### Chargé de mission CNRS/MPPU/INSU

#### Section Sciences de la Terre

*Guy Libourel*

### Comité de l'instrumentation mi-lourd

«analyses, mesures, expérimentation»

*Jean Carignan*

## INSU (Institut National des Sciences de l'Univers)

### Conseils Scientifiques

#### INSU

*Etienne Deloule*

### Programme National Reliefs de la Terre

*Christian France-Lanord* (Président)

*Jérôme Lavé*

### Programme CNRS - ECLIPSE

*Christian France-Lanord* (depuis 1999)

### Programme National de Planétologie

*Bernard Marty* (Président, 2000-2006)

### Programme Fluide Faille Flux

*Etienne Deloule*

### Commission des Spécialistes des Sciences de la Terre

*Etienne Deloule*

*Alain Cheilletz*

## Enseignement Supérieur et Recherche

### Comité National des Universités

*Alain Cheilletz* (Section 35, élu, Président)

*Stéphanie Duchêne* (Section 35, élue)

### Comité d'évaluation pour les primes

d'encadrement de recherche

*Mary Ford* (2006)

### Groupe 'Système solaire et Plasmas spatiaux' CNES

*Marc Chaussidon* (2001-2005)

## **Autres**

### **CODATA, France**

*Jean-Jacques Royer* (Vice-président)

### **Comité National Français de Géologie**

*Pierre Barbey* (depuis 2002, membre du bureau de son CA  
mandat 2005-2008)

### **Comité de la Carte Géologique de France**

*Pierre Barbey* (depuis 2002)

### **Société Française des Isotopes Stables**

*Fabien Palhol* (membre élu au CA, 2002-2005)

### **IRD**

**Commission d'attribution des bourses de recherche et  
des postes d'accueil (Dép. de Soutien à la Formation)**

*Gaston Giuliani* (2003-2006)

## AU PLAN LOCAL

### Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL)

#### Commissions de Spécialistes

*Pierre Barbey* (35-36-37)  
*Christian France-Lanord* (35-36 jusqu'en 2006)  
*Bernard Marty* (élu, 34-35-36)  
*François Marini* (34-35-36)

#### Conseil d'Administration

*Alain Cheilletz* (élu depuis 2003)  
*Christian Maignac* (élu jusqu'en 2007)  
*François Marini* (élu jusqu'en 2007)  
*Fabien Palhol* (consultant)

#### Conseil Scientifique

*Bernard Marty* (élu)  
*Christian France-Lanord*

#### Pôle Géosciences

*Christian France-Lanord* (responsable)

### Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG-INPL)

#### Commissions de Spécialistes

*Sylvain Bourlange* (35)  
*Marc Chaussidon* (35-36, nommé depuis 2002)  
*Stéphanie Duchêne* (34-35-36, suppléante depuis 2001)  
*Mary Ford* (35-36, présidente depuis 2007)  
*David Jousselin* (35, élu)  
*Raphaël Pik* (34-35-36, élu depuis 2000)

#### Conseil d'Administration

*Guillaume Caumon* (élu depuis 2005)  
*Marc Chaussidon* (élu, 2001- 2005)  
*Alain Cheilletz* (depuis 2007)  
*Etienne Deloule* (depuis 2006)  
*David Jousselin* (élu)

#### Direction des relations internationales

*Guy Libourel*

### Université Henri Poincaré Nancy 1 (UHP)

#### Commissions de Spécialistes

*Pierre Barbey* (35-36, Président jusqu'en 2004,  
membre élu depuis 2005)  
*Françoise Chalot-Prat* (35-36, élue depuis 2001)

**Université  
Henri Poincaré  
Nancy 1  
(UHP)  
- suite -**

*Stéphanie Duchêne* (35-36, suppléante depuis 2001)  
*Béatrice Luais* (35-36, nommée, 2004-2007)  
**DEA TERRE (Nancy-Strasbourg)**  
*Christian France-Lanord* (2000 - 2005)

**Département Sciences de la Terre**  
*Pierre Barbey* (responsable 2000-2006)

**Conseil du département Sciences de la Terre**  
*Françoise Chalot-Prat* (élue depuis 1990)  
*Stéphanie Duchêne* (élue depuis 2003)

**Conseil de l'UFR STMP**  
*Pierre Barbey* (élu jusqu'en 2005)  
*Françoise Chalot-Prat* (élue jusqu'en 2005)

**Service Commun de Fluorescence X**  
*Pierre Barbey* (responsable 2001-2005)

**Filière 'Formation des Professeurs de SVT'**  
*Françoise Chalot-Prat* (responsable depuis 1995)

**Conseil Scientifique**  
*Pierre Barbey* (élu jusqu'en 2004)

**Délégation  
Centre-Est  
du CNRS**

**Correspondant Ressources Humaines et Formation**  
*Christian Le Carlier de Veslud* (2006-septembre 2007)  
*Isabelle Geoffroy* (depuis septembre 2007)  
*Delphine Yeghicheyan* (2003-2006)

**Correspondant Communication**  
*Michel Champenois* (depuis 2004)

**Commission Régionale d'Action Sociale (CORAS)**  
*Denis Mangin* (représentant syndical)

**Conseil Hygiène et Sécurité**  
*Etienne Deloule*

**Fédération  
de Recherche  
E.S.T.  
(FR 633)**

**Direction**  
*Christian France-Lanord* (depuis 2002)  
**Comité de Direction**  
*Jean Carignan* (nommé depuis 2001)

**Zone Atelier  
Moselle  
(ZAM)**

**Conseil Scientifique**

*Jean Carignan* (nommé depuis 2002)

*Jean-Jacques Royer*

**Responsable d'axe scientifique**

*Jean Carignan* (depuis 2002)

**Autres  
Institutions**

**Commissions de Spécialistes**

*Françoise Chalot-Prat* (Besançon, 35-36, depuis 2001)

*Marc Chaussidon* (ULP Strasbourg, 35-36, depuis 2002)

*Marc Chaussidon* (MNHN Paris, 35-36, depuis 2002)

*Mary Ford* (Lille, 35-36, depuis 2006)

*Gaston Giuliani* (Limoges, 35-36, suppléant depuis 2001)

*Gaston Giuliani* (MNHN Paris, 35-36, suppléant  
depuis 2006)

*Jérôme Lavé* (Univ. Lyon, 35-36-37, depuis 2003)

*Jérôme Lavé* (IPGP, 35-36-37, depuis 2004)

*Raphaël Pik* (IPGP, 35-36, 2003-2007)

**Conseils Scientifiques**

*Marc Chaussidon* (IPGP depuis 2005,  
ENS Lyon depuis 2007)

**Conseil d'Administration Ecole des Mines Nancy  
(EMN)**

*Christian Maignac* (élu)

**Commission Observatoire de l'OSUG**

*Jérôme Lavé* (2001 - 2007)

**Conseil Scientifique et Pédagogique de  
l'IUFM Lorraine**

*Pierre Barbey* (2001-2004)

**Réseau Verrier Lorrain (REVELOR)**

**UHP Nancy 1 - INPL - Industriels**

*Guy Libourel*





**LA PROSPECTIVE 2009 - 2012**





# PROSPECTIVE

Ce nouveau projet quadriennal du CRPG s'inscrit largement dans la continuité du précédent. Les principaux changements portent sur les thématiques suivant les évolutions des problématiques scientifiques et les nouveaux chercheurs arrivés au centre. Le CRPG est une Unité Propre de Recherche du CNRS et nous sollicitons son renouvellement dans cette forme. Cette structure se justifie par l'importance des services nationaux qu'abrite le CRPG mais n'implique pas un fonctionnement indépendant de la vie universitaire. Au contraire, le CRPG y est largement impliqué grâce aux enseignants chercheurs de l'INPL et de l'UHP et aux doctorants de l'école doctorale RP2E qui poursuivent leurs recherches dans le centre. Nous sollicitons donc également notre reconnaissance par l'EPCS Nancy-Université. Le CRPG dispose de conventions avec l'INPL et l'UHP et une nouvelle convention devra être établie avec Nancy-Université.

Au plan local, le CRPG est l'une des composantes de la Fédération Eau-Sol-Terre (FR-633). Nous inscrivons résolument notre politique scientifique dans le cadre de réflexion et de concertation de la FR-EST en particulier en ce qui concerne les relations avec les établissements d'enseignement, la définition des priorités de profils recherche des postes enseignant-chercheur, les réponses aux appels d'offres CPER, universitaires et régionaux ou encore la politique de demande d'allocations doctorales. Nous participons activement aux projets scientifiques animés par la FR et aux efforts de mutualisation de moyens analytiques et techniques de la FR-EST. À travers la FR-EST, le CRPG participe à l'Institut Carnot ICEEL.

Au niveau interne, l'organisation matricielle du CRPG adoptée depuis les années 90 sous l'impulsion de Jean Cases, a fait ses preuves. Nous conservons donc une organisation fondée d'une part sur trois équipes et un service et d'autre part sur quatre thèmes. Les équipes : Pétrologie, Géochimie et Géodynamique et le service SARM, sont déterminés par disciplines et ont en charge les ressources humaines et les moyens techniques du centre. Les thèmes ont pour mission d'organiser l'animation scientifique et ils déterminent la stratégie scientifique du centre.

## LES THÈMES

Nous proposons l'organisation thématique suivante :

Cosmochimie, Planètes et Terre primitive  
Magmas et Fluides profonds  
Surface de notre Planète

A ces thèmes, s'ajoute un axe transverse : Activités de valorisation.

Les participations des chercheurs aux thèmes figurent sur l'organigramme thématique figurant sur la page suivante.

Nous avons fait évoluer les thèmes dans cette nouvelle maquette en fonction des évolutions des centres d'intérêts et surtout grâce aux nouveaux chercheurs arrivés au CRPG sur ces dernières années. Le thème «Cosmochimie, Planètes et Terre primitive» garde un contour assez proche de celui qu'il avait sur le précédent quadriennal avec un renforcement des objectifs sur la Terre primitive. Le thème «Géodynamique» disparaît de notre maquette car il avait l'inconvénient de maintenir une confusion entre thème et équipe. Il se retrouve en partie sur le nouveau thème «Magmas et Fluides profonds» qui marque un renouveau des recherches autour du magmatisme au CRPG. Il intègre en continuité les recherches sur les transferts fluides et les minéralisations. Le thème «Surface de notre Planète» regroupe l'ensemble des recherches sur la Terre externe. Il regroupe un spectre plus large que l'ancien

thème Reliefs, Erosion, Climat permettant une intégration des recherches axées sur les relations tectonique-sédimentation d'un côté et environnement anthropisé de l'autre. Enfin, si le CRPG est un laboratoire de recherche largement ancré sur la recherche fondamentale, il mène aussi des activités de recherches partenariales de haut niveau. L'axe transversal «Activités de valorisation» regroupe ces recherches. Il repose sur des projets de recherche menés en forte interaction entre des demandes industrielles et les compétences du CRPG. Certaines sont relativement limitées dans le temps, mais d'autres reposent sur des actions de long terme telles que celles associées au consortium Gocad. Ces recherches partenariales constituent le socle de notre participation à l'Institut Carnot Energie Environnement en Lorraine (ICEEL).

Les thèmes sont détaillés en détail au chapitre suivant.

<p><b>COSMOCHIMIE, PLANÈTES ET TERRE PRIMITIVE</b> Resp. Guy Libourel</p> <p>Guillaume Caro</p> <p>Marc Chaussidon</p> <p>François Faure</p> <p>Guy Libourel Béatrice Luais François Marini Bernard Marty</p>	<p><b>MAGMAS ET FLUIDES PROFONDS</b> Resp. François Faure</p> <p>Pierre Barbey Sylvain Bourlange Pete Burnard</p> <p>Guillaume Caumon Françoise Chalot-Prat</p> <p>Alain Cheilletz</p> <p>Etienne Deloule Stéphanie Duchène François Faure</p> <p>Gaston Giuliani</p> <p>David Jousselin</p> <p>Béatrice Luais</p> <p>Bernard Marty Daniel Ohnenstetter Maryse Ohnenstetter</p> <p>Laurie Reisberg</p> <p>Jean-Jacques Royer</p>	<p><b>SURFACE DE NOTRE PLANÈTE</b> Resp. Raphaël Pik</p> <p>Jean Carignan Guillaume Caro Guillaume Caumon</p> <p>Pauline Collon-Drouaillet</p> <p>Stéphanie Duchène</p> <p>Mary Ford Christian France-Lanord</p> <p>Pierre Jacquemin</p> <p>Jérôme Lavé Guy Libourel</p> <p>Bernard Marty</p> <p>Fabien Palhol Raphaël Pik Laurie Reisberg Claire Rollion-Bard</p> <p>Nathalie Vigier</p>
<p><b>ACTIVITÉS DE VALORISATION</b></p> <p><i>Jean Carignan, Guillaume Caumon, Pauline Collon-Drouaillet, Mary Ford, Pierre Jacquemin, Guy Libourel, Laurie Reisberg, Jean-Jacques Royer.</i></p>		

## LES ÉQUIPES DE RECHERCHE

Les équipes ont pour rôle d'organiser la vie pratique du centre pour les moyens humains et matériels. Elles doivent assurer le fonctionnement des moyens analytiques et favoriser l'accès de tous aux différents moyens analytiques et techniques répartis dans les laboratoires. Leurs effectifs et l'importance des moyens techniques qu'elles déploient sont assez hétérogènes et de ce fait, elles ont chacune un fonctionnement différent dans la vie du CRPG. Outre leur rôle déterminant dans la vie pratique du centre, elles assurent aussi la cohésion des différentes disciplines et peuvent mener de ce point de vue une animation scientifique transverse aux thèmes. L'organigramme prévisionnel du CRPG 2009, de la page suivante, donne une représentation des équipes du CRPG.

**L'équipe Géochimie** a un poids important au CRPG tant en moyens humains que par le parc analytique qu'elle gère. Elle aura la lourde charge de mener des projets d'équipement très importants à l'échelle régionale et nationale sur le prochain quadriennal notamment avec l'installation d'une nouvelle sonde ionique.

**L'équipe Géodynamique** rassemble les chercheurs qui développent les moyens de

modélisation numérique et les approches de géologie structurale. Elle a en particulier pour challenge de renforcer l'intégration d'approches de modélisation dans les recherches au CRPG. Cette équipe abrite également le groupe Gocad qui concentre une partie importante de son activité autour du développement fondamental de ce modèleur 3D. Elle est en fort renouvellement avec quatre nouveaux arrivants et deux départs.

**FÉDÉRATION DE RECHERCHE EST (EAU-SOL-TERRE).**  
**DIRECTEUR FRÉDÉRIC VILLIÉRAS**

**C R P G - DIRECTEUR C. FRANCE-LANORD**

SECRETARIAT DE LA FR - EST  
 Isabelle Geoffroy (AI)

SECRETARIAT DE DIRECTION  
 Isabelle Geoffroy (AI),  
 Aurélie Didot (T)

COMPTABILITÉ  
 Martine Noël (AI),  
 Odile André (AJT)

COMMUNICATION  
 Michel Champenois (IE)

FORMATION PERMANENTE  
 Isabelle Geoffroy (AI)

**PÉTROLOGIE**

8 chercheurs et/ou  
 enseignants

Responsable : Gaston Giuliani

Pierre Barbey  
 Françoise Chalot-Prat  
 Stéphanie Duchêne  
 François Faure  
 Guy Libourel  
 Daniel Ohnenstetter  
 Maryse Ohnenstetter

SECRETARIAT  
 C. Negre y Rossello (AI)

EXPÉRIMENTATION  
 Laure Chirurgien (AI)  
 Laurent Tissandier (IE)

SONDES IONIQUES  
 Michel Champenois (IE)

LABORATOIRE  
 FR - EST  
 ATELIER MÉCANIQUE  
 Pierre Baillot (T)

**GÉOCHIMIE**

11 chercheurs et/ou  
 enseignants

Responsable : Laurie Reisberg

Guillaume Caro  
 Marc Chaussidon  
 Etienne Deloule  
 Christian France-Lanord  
 Béatrice Luais  
 François Marini  
 Bernard Marty  
 Fabien Palhol  
 Raphaël Pik  
 Nathalie Vigier

SECRETARIAT  
 Aurélie Didot (T)

ELECTRONIQUE  
 Julien Dubois (AI)

SONDES IONIQUES  
 Denis Mangin (AI)  
 Claire Rollier-Bard (IR)

GAZ RARES  
 Peter Burnard (IR)  
 Bouchaib Tibari (T-IATOS INPL)  
 Laurent Zimmermann (AI)

ISOTOPES RADIOGÉNIQUES  
 Céline Fournier (T)  
 Christiane Parmentier (T)  
 Catherine Zimmermann (IE)

ISOTOPES STABLES  
 Caroline Guilmette (IE)

SÉPARATION DES MINÉRAUX  
 Emmanuel Davy (AJT - 25%)

**GÉODYNAMIQUE**

7 chercheurs et/ou  
 enseignants

Responsable : David Jousselin

Sylvain Bourlange  
 Guillaume Caumon  
 Alain Cheilletz  
 Pauline Collon-Drouaillet  
 Mary Ford  
 Jérôme Lavé

SECRETARIAT  
 Nathalie Pavesio (eq. T - 50%)

IMAGERIE - INFORMATIQUE  
 GÉOSTATISTIQUES  
 Jean-Jacques Royer (IR)  
 Pierre Jacquemin (IR)

**SERVICE GÉNÉRAL  
 ET TECHNIQUE**

Responsable  
 Bruno Porcu (T)

Jean-Marc Chaffaut (AGTP)  
 Emmanuel Davy (25% - AJT)  
 Caroline Zimmer (T)

SERVICES COMMUNS  
 LITHOLAMELLAGE  
 Jean-Luc Lemineur (T)

ELECTRONIQUE  
 Julien Dubois (AI)

IMPRIMERIE  
 Jacques Degeorge (T)

**BIBLIOTHÈQUE**

Catherine Negre y Rossello (AI)

**RÉSEAU  
 INFORMATIQUE**

Laurence Shengold (IE)

**SARM**  
 Responsable : Jean Carignan (IR)

UNITÉ TECHNIQUE ET INFORMATIQUE  
 Carole Dolmaire (AI)  
 Pascal Hild (AI)

UNITÉ ADMINISTRATIVE  
 Laure Sevin (IE)

Christine Blanchard (T - 10%)

UNITÉ DE SPECTROCHIMIE  
 Delphine Yeghicheyan (IE)

Christine Blanchard (T - 90%)

Julien Meyer (T)

Hélène Pastel (T)

UNITÉ DE GÉOCHIMIE MINÉRALE  
 Luc Marin (IE)

Bernadette Gérard (IATOS - T)

Tioga Gulon (T)

Pierre Yves Martin (AI)

UNITÉ DE GÉOCHIMIE ISOTOPIQUE  
 Christophe Cloquet (CDD CNRS)

ATELIER DE BROYAGE  
 Emmanuel Davy (AJT - 50%)

SERVICE NATIONAL SONDE IONIQUE  
 Marc Chaussidon (DR)  
 Etienne Deloule (DR)

GEOSTANDARDS NEWSLETTER  
 Ed Williams  
 Colette Gaudé (T)

CONSORTIUM GOCAD  
 Guillaume Caumon (MC)

**ORGANIGRAMME**  
**C R P G**  
**2009 -2012**

**L'équipe Pétrologie** regroupe les moyens d'observation microscopique et d'expérimentation qui sont centraux dans de nombreux projets du CRPG sur l'ensemble des thématiques. L'équipe manque néanmoins de moyens humains et l'une des priorités du centre sera de renforcer son potentiel.

**Le SARM** constitue une quatrième équipe du CRPG avec cependant des objectifs assez

distincts de service national d'analyse. Le SARM poursuit son activité en recentrant ses prestations vers les laboratoires associés à l'INSU et aux projets scientifiques mis en œuvre par ses laboratoires. Deux nouveaux objectifs seront l'ouverture d'une division isotopique sur les traceurs radiogéniques (courant 2008) et la diffusion de la base de données du SARM vers la communauté nationale.

Ces équipes ou services sont soutenues par les moyens communs administratifs et techniques du CRPG: secrétariat, comptabilité, communication, bibliothèque, service général, maintenance électronique, réseau, litholamellage. Le litholamellage est mutualisé dans un service commun de la FR et Jean-Luc Lemineur (T au CRPG) travaille au service de litholamellage mis en œuvre par le G2R. Nous accueillons Pierre Baillet de la FR-EST qui anime l'atelier commun de mécanique. Dans le même esprit de mutualisation, nous souhaitons regrouper au CRPG les moyens de broyage de roche du G2R et du SARM. Un poste est demandé à cet effet au niveau de la FR-EST.

## RESSOURCES HUMAINES

Le CRPG compte 26 chercheurs et enseignants-chercheurs pour 42 ITA. Le rapport ITA/chercheur apparaît assez élevé mais doit être corrigé des services nationaux. Il est de 1 si l'on considère uniquement la partie recherche du centre et se justifie en particulier par l'importance du parc instrumental. Globalement la situation des ressources humaines permanentes du CRPG est équilibrée, même si des difficultés existent. Les renouvellements ont été satisfaisants et nous avons pu créer certains postes à partir de nouveaux projets de recherche. Un point important concerne la situation du secrétariat général qui est actuellement partagé avec la FR-EST. Un poste a été demandé par la FR pour résoudre ce problème. Le CRPG accueille environ vingt-cinq doctorants, mais nous tenons à souligner le faible nombre d'allocations doctorales MENSUR. En moyenne le CRPG dispose d'une allocation et demie par an ce qui est très faible par rapport à nos objectifs en recherche fondamentale.

Dans l'équipe Géochimie, l'intégration de François Marini (MC à l'ENSG) concrétise sa collaboration au cours des dernières années avec Marc Chaussidon sur les microsphères cosmiques. Guillaume Caro, jeune recruté en CR2 arrive fin 2007 pour ouvrir de nouvelles voies de recherches sur la Terre primitive et en environnement à l'aide de la géochimie isotopique du K. Néanmoins le départ de Jérôme Aléon laisse un manque en jeune chercheur autour de la sonde ionique et en cosmochimie. Nous affichons également un profil de recrutement au niveau chercheur en géochimie en paléo-environnement - géomorphologie et un poste sur le traçage isotopique dans l'environnement actuel. Les moyens ITA de l'équipe Géochimie sont assez équilibrés. Il conviendra de reconsidérer les moyens mis autour du Service national de Sondes Ioniques lorsque la nouvelle sonde 1280 sera opérationnelle. L'acquisition d'une nouvelle MC-ICP-MS nécessitera

également un renforcement du potentiel technique autour de ces instruments.

L'équipe Géodynamique a été profondément renouvelée durant le quadriennal avec les arrivées de trois MC à l'ENSG : Sylvain Bourlange, Guillaume Caumon et Pauline Collon et d'un CR1: Jérôme Lavé qui a opéré une mutation depuis le LGCA de Grenoble. Pauline Collon et Jérôme Lavé apportent de nouvelles compétences au CRPG et vont transformer les approches menées dans la thématique Surface notamment en modélisation. Un recrutement en MC à l'ENSG 2008 avec un profil recherche «Processus de formation des surfaces continentales» devrait poursuivre le renforcement du potentiel de cette équipe et de la thématique Surface. Le départ vers Rennes mi-2007 de Christian Le Carlier de Veslud (IR) pour rapprochement de conjoint laisse un besoin marqué autour de l'utilisation de Gocad par les chercheurs CRPG. Le remplacement de ce poste au niveau IE a été demandé avec une ouverture de l'utilisation de Gocad par des équipes de l'INSU au CRPG. Enfin, Christian Marignac (Pr Mines) quittera le CRPG pour le G2R car les projets dans lesquels il est engagé ont maintenant l'essentiel de leurs centre de gravité au G2R.

L'équipe Pétrologie a été renforcée en 2005 par les recrutements de François Faure (MC-UHP), de Laurent Tissandier (IE) et d'un AI fin 2007. Malgré cela, la pyramide des âges des chercheurs de cette équipe reste préoccupante. De plus, Pierre Barbey et Guy Libourel sont largement mobilisés par leurs responsabilités nationales au MENSUR et à l'INSU respectivement. Si ces fonctions témoignent d'un bon rayonnement du CRPG, elles diminuent notre potentiel humain de cette équipe. Il reste donc impératif de la renforcer par des recrutements chercheur et/ou enseignant-chercheur. Un profil autour de la thématique Magma et fluides profonds est proposé. De même un profil autour de la pétrologie appliquée aux matériaux

anthropiques ou naturels, proposé sur le précédent quadriennal, reste d'actualité.

Au SARM, le renouvellement de personnel a été très important au cours du dernier quadriennal avec six départs et quatre arrivées. La plupart des renouvellements étant assurés avec un délai de deux ans, ces changements entraînent des perturbations profondes dans le rythme du service et sont difficiles à accommoder même avec l'aide importante des emplois en vacance. L'arrivée de Christophe Cloquet pour mettre en place une nouvelle division isotopique devra à terme être suivie

par son recrutement définitif et par un complément au niveau T ou AI. Pour les autres divisions, les départs en retraite qui interviendront au cours du prochain quadriennal doivent être anticipés car nous ne disposons pas de souplesse de fonctionnement pour assurer des intérim sur ces postes. Un recrutement AJT pour permettre la mutualisation des moyens de broyage est demandé par la FR-EST et géré par le SARM. Ce poste est assuré depuis plusieurs années par des vacances mais ne peut plus continuer sur ce mode de financement.

Les profils présentés ci-dessous détaillent nos orientations de recrutement chercheurs-enseignants chercheurs pour le prochain quadriennal. Ces priorités émanent des besoins thématiques comme des nécessités de renforcement des compétences des équipes. Elles reprennent également les priorités énoncées lors du précédent exercice.

### GÉOCHIMIE ET PALÉO-CLIMATOLOGIE CONTINENTALE

L'activité de recherche du CRPG autour des processus qui concernent la surface de notre planète s'est vue confortée au cours du quadriennal précédent dans plusieurs aspects et notamment en ce qui concerne l'érosion et ses contrôles. Nous identifions comme priorité pour conforter et équilibrer la recherche du thème «Surface de Notre Planète» un recrutement dans le domaine de la paléo-climatologie continentale récente à

très récente (DMG à actuel) qui permettra de mettre en valeur les développements géochimiques les plus récents (paléo-températures  $\Delta 47$ , chronologie cosmogénique haute précision) en les appliquant à des problématiques scientifiques environnementales de plus en plus importantes et critiques à l'interface entre enregistrement paléoclimatique et perturbations récentes de cet équilibre naturel pré-anthropique.

### MAGMATOLOGIE EXPÉRIMENTALE HAUTE TEMPÉRATURE

Le développement de l'outil «texture» au CRPG a permis d'apporter des contraintes fortes sur la cinétique des processus magmatiques basiques et ultra-basiques: basaltes, komatiites, chondres. Cet outil est donc utilisé et développé dans deux des trois thèmes du CRPG, à savoir: «Magmas et Fluides Profonds» et «Cosmochimie, Planètes et Terre Primitive».

En revanche, son corollaire dans le domaine des roches acides et/ou alcaline n'est pas, à ce jour, exploité bien que son champ d'application soit également extrêmement vaste, allant par

exemple des grands épanchements ignimbritiques au stade ultime de la différenciation des laves martiennes. Le recrutement d'un chercheur expérimentaliste spécialiste de croissance cristalline, de viscosité, du contrôle des pressions partielles de gaz et de l'action d'éléments qualifiés de fondant (sodium, phosphore, fluor...) permettrait d'étendre le domaine d'expertise du CRPG dans le développement de l'outil «texture» comme marqueur des processus magmatiques terrestre et extra-terrestre.

### DÉVELOPPEMENT DES ANALYSTES ISOTOPIQUES SUR LES SONDES IONIQUES

La mise en place d'une nouvelle sonde ionique au CRPG est un argument fort pour recruter un jeune chercheur (CR) sur un projet de recherche faisant appel au développement des mesures sur les microsondes ioniques, notamment la future sonde à très haute résolution. À ce stade, ce profil n'est pas orienté sur une thématique particulière

du CRPG, mais devra naturellement s'inscrire dans ces thématiques. Il devrait se trouver à l'interface entre différentes disciplines telles que, la minéralogie, la pétrographie et la géochimie. Il devra en outre pouvoir participer aux développements technologiques des instruments.

### TRAÇAGE ISOTOPIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT

Dans le domaine de l'environnement, l'enjeu scientifique et sociétal actuel est à la fois de détecter une contribution anthropique, de documenter le cheminement, les temps de transport dans les différents milieux (air-eau-sol), les transformations

chimiques de ces polluants et enfin d'en identifier les sources. La signature isotopique des éléments comme les métaux est un développement très récent qui n'est effectué que dans peu de laboratoires au monde. Elle est très adaptée pour

répondre à des questions concrètes posées par les communautés et les industriels eux-mêmes, et portant sur l'origine et le devenir de pollutions. Nous souhaitons recruter au niveau PR ou DR un spécialiste du traçage isotopique des processus

environnementaux naturels et anthropiques, des cycles géochimiques des éléments intervenant dans, ou permettant de, tracer les processus bio-géochimiques ou les transferts d'éléments polluants.

### MINÉRAUX - MATÉRIAUX - VERRE

Dans la démarche de renforcement de l'équipe de pétrologie, un profil en pétrologie appliquée aux matériaux anthropiques ou naturels est affiché. Ce profil, déjà affiché lors du précédent quadriennal n'a pu être réalisé est reste largement d'actualité. Un recrutement MC dans ce domaine

permettrait d'ouvrir un enseignement de pointe sur des thématiques essentielles tant sur les domaines classiques de la géologie que pour les sciences de l'environnement et du développement durable.

### MODÉLISATION NUMÉRIQUE APPLIQUÉE AUX PROCESSUS GÉOLOGIQUES

Les recherches sur la géodynamique externe menées au CRPG sont fortement basées sur le développement de traceurs et chronomètres géochimiques, ainsi que sur la représentation 3D des objets géologiques, en vue de quantifier les processus qui ont gouverné l'évolution de notre planète. Nous souhaitons rééquilibrer notre recherche vers une meilleure prise en compte de la modélisation des processus chimiques et

physiques en parallèle à leur quantification. Nous affichons comme priorité le recrutement d'un spécialiste de la modélisation physique et numérique capable d'évoluer et de fortement interagir avec les chercheurs plus focalisés sur la description et la quantification des processus morphologiques et géochimiques de surface ou sur les couplages tectonique-érosion-sédimentation.

## VIE DU CRPG

Le fonctionnement du CRPG repose sur un bureau de direction et un conseil de laboratoire. Le bureau de direction intégrera les animateurs de thèmes pour préparer les choix de politique scientifique (choix des sujets de thèse, soutien aux projets de recherche...) et/ou les animateurs d'équipe pour la gestion du personnel et pour les aspects plus pratiques et techniques de vie du centre. Le bureau de direction se réunit sur un rythme hebdomadaire et le conseil de laboratoire sur un rythme trimestriel.

Un intranet sera mis en place pour assurer une diffusion pérenne des informations au sein du laboratoire (CR de conseils de laboratoire, appels d'offres, avis divers de congrès etc...).

L'animation scientifique se poursuivra sur le modèle des séminaires externes et internes hebdomadaires organisés par le laboratoire. Parallèlement les thèmes seront encouragés à

mettre en place une animation plus informelle autour de présentation-discussion de travaux en cours sur le modèle organisé par le thème REC au cours des quatre années précédentes. Ces réunions pourront également être orientées vers des discussions prospectives pour l'élaboration des projets de recherche.

Le bâtiment a été largement transformé durant le quadriennal avec la mise en service des nouveaux étages, la rénovation du deuxième étage Sud et la construction d'un nouvel escalier de secours au Nord. Le prochain chantier sera la construction d'un local de stockage de produits chimiques qui devrait être mis en service en 2008. Nous poursuivrons la rénovation des locaux par le remplacement progressif des fenêtres et la remise en état des locaux : 4<sup>ème</sup> étage, 1<sup>er</sup> étage SARM en particulier.

## DEMANDE BUDGÉTAIRE

Le CRPG est un laboratoire de recherche largement ancré sur la recherche fondamentale et cette orientation se poursuit dans la prospective de ce prochain quadriennal. Notre engagement dans la recherche partenariale peut apporter certaines souplesses budgétaires mais sans excès. De plus, le CRPG met en œuvre des moyens analytiques lourds particulièrement coûteux en entretien et dont certains sont utilisés en moyens nationaux. Si le CRPG ne s'estime pas lésé en

termes de soutien de base, celui-ci est plutôt marqué par une érosion progressive au cours du précédent quadriennal. Cette érosion va de pair avec une évolution des soutiens de programmation vers des projets très fortement dotés (ANR) mais rares et donc chaotiques et une diminution des projets intermédiaires type actions de l'INSU.

Les sources de soutien alternatives sont pour la plupart finalisées ou, dans une certaine mesure, régionales et ne permettent que difficilement de

suivre des voies de recherche fondamentale ambitieuses. Il nous apparaît donc important pour maintenir les objectifs scientifiques du CRPG de maintenir raisonnablement son niveau du soutien de base. Nous rappelons également que le CRPG est hébergé dans des locaux propres du CNRS. Si celui-ci assure des opérations importantes de mise à niveau du bâtiment, nous finançons également une part significative de travaux sur le soutien de base.

Deux lignes distinctes du soutien de bases sont demandées pour les services nationaux INSU (SARM et Sondes Ioniques). Ces lignes sont essentielles pour assurer le fonctionnement de ces services. Il sera nécessaire de mener une évaluation des besoins du service Sondes Ioniques au cours du quadriennal pour prendre en compte la mise en service de la nouvelle sonde ionique.

## EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Pour les équipements les plus importants, le CRPG a inscrit son projet dans le cadre du nouveau Contrat de Projet Etat-Région initié en 2007. Le projet «Plateforme Géochimique» porté par la FR-EST dans le cadre du pôle «Sciences et Génie de l'Environnement» comprend notamment trois équipements qui seront mis en œuvre par le CRPG. Il est, à ce stade, difficile de donner un calendrier précis des opérations, mais la pièce centrale de ce projet qui est l'acquisition d'une nouvelle Sonde Ionique sera réalisé en 2009 ou 2010

### LA SONDE IONIQUE À TRÈS HAUTE RÉOLUTION DE MASSE

Cette nouvelle sonde permettra de développer des micro-analyses in situ (faisceau  $< 10 \mu\text{m}$ ) à très grande précision (abondances  $< 100 \text{ ppm}$ ). Ceci sera réalisé grâce à de très hautes résolutions de masse (de 6000 à 20 000) pour pouvoir mesurer très précisément les compositions isotopiques des éléments de masse intermédiaire et lourde à l'échelle de quelques microns. Cet instrument sera associé à la sonde ionique 1270 actuelle

pour offrir une plateforme très complète de micro-analyse isotopique pour les applications en cosmochimie, géochronologie et géochimie environnementale. Elle permettra de doubler le potentiel français actuel dans ce type d'analyse. La demande intègre une mise à niveau de la sonde 1270 qui est indispensable après plus de dix ans de fonctionnement. Cette mise à niveau sera planifiée sur la fin du CPER.

### LES ISOTOPES STABLES

Ce spectromètre de masse, isotopes stables, à cinq collecteurs permettant l'analyse des isotopologues du  $\text{CO}_2$  pour couvrir les masses 44 à 48. La demande porte sur un spectromètre sans système d'introduction. Celui-ci sera équipé à partir des couplages dual-inlet, analyseurs

élémentaires ou gaz chromatographie déjà existants au CRPG. Il doit permettre de développer l'analyse du  $\Delta 47$  du  $\text{CO}_2$  qui trace les conditions de température de formation des molécules carbonatées pour des applications environnementales et paléo-environnementales.

### MC-ICP-MS

MC-ICP-MS à multi-collecteur pour les traçages isotopiques des processus environnementaux et géologiques. Cet équipement doit servir en particulier au développement de nouveaux traceurs environnementaux sur les éléments des masses intermédiaires (K, Mg, Ca...) et lourdes

(Pb, Hg, Cd, Ni, Zn, Ge, Fe...). Cet équipement est destiné à la fois à l'utilisation par les équipes de recherche de la FR et en service national dans le cadre de la nouvelle division isotopique du Service national d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM).







# LES THÈMES DU CRPG 2009-2012



# COSMOCHIMIE, PLANÈTES ET TERRE PRIMITIVE

Animateurs : Guy Libourel et Marc Chaussidon

Ce thème aura pour objectif scientifique d'étudier i) les premiers temps de la formation du système solaire, tout particulièrement les processus à l'oeuvre au sein du disque d'accrétion protoplanétaire et leur chronologie, ii) la nature des processus de formation, de différenciation et d'évolution planétaire, ainsi que iii) l'évolution précoce de la Terre à l'hadéen et à l'archéen. En s'inscrivant dans une certaine continuité scientifique, ce quadriennal sera néanmoins marqué par notre plus grande implication dans les missions spatiales (Phobos-Grunt, Saturne-Kronos), par l'arrivée d'une nouvelle sonde ionique et par l'accueil à Nancy en juillet 2009 du 72<sup>nd</sup> annual meeting of the Meteoritical Society.

**Chercheurs et enseignant-chercheurs impliqués:** Marc Chaussidon, Guillaume Caro, François Faure, Guy Libourel, Béatrice Luais, François Marini, Bernard Marty.

**Etudiants en thèse (100%) :** Johanna Marin (thèse débutée en octobre 2006), Johan Villeneuve (thèse débutée en octobre 2006), Romain Mathieu (thèse débutée en octobre 2005), Magali Pujol (thèse débutée en octobre 2005).

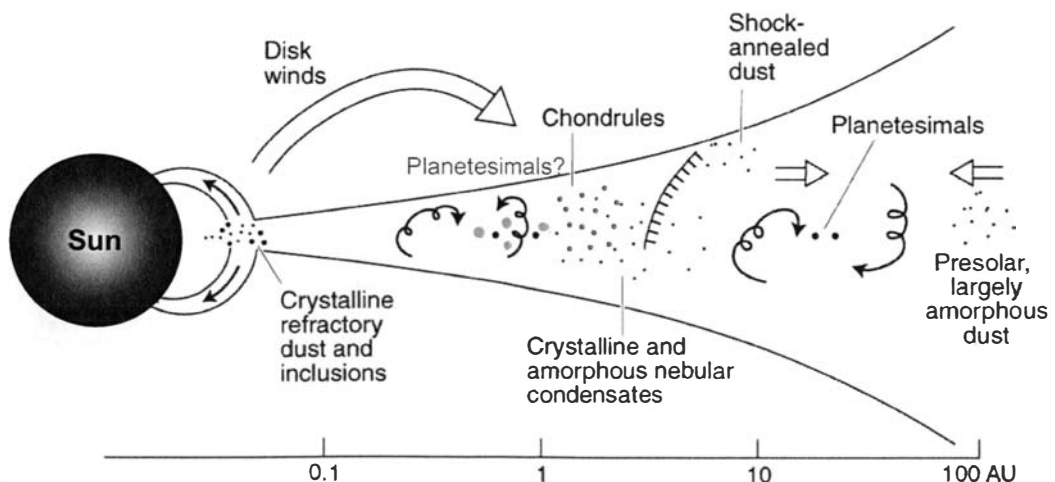
**Post-doctorants:** Yves Marrocchi, Andreas Morlok (Allemagne)

## COSMOCHIMIE

L'étude de la formation des systèmes stellaires, des phases primordiales des disques circumstellaires et des systèmes planétaires a connu un regain d'intérêt sans précédent dans les dernières années en raison de la richesse des informations fournies par les observations spectrales des grands télescopes et des missions spatiales. De l'ensemble de ces informations émergent des modèles dans la communauté d'astrophysique toujours plus précis, notamment sur la structure, la formation et l'évolution des disques protoplanétaires (D'Alessio *et al.* 2005).

A partir de l'étude de certains échantillons extraterrestres (météorites et missions spatiales) et du développement d'expériences de simulation, nous proposons pour cet exercice de participer à cet effort en focalisant nos études sur les premiers instants de la formation du système solaire («la période du disque»), c'est à dire la nature physique, chimique, minéralogique et la chronologie des processus qui ont produit les premiers solides (CAI et chondres) et les premières planètes. Répondre à ces questions implique également 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.

Schéma du demi disque protoplanétaire du système solaire



## PROCESSUS DE CONDENSATION ET FORMATION DES PREMIERS SOLIDES STELLAIRES ET INTERSTELLAIRES

Ce sont les enveloppes circumstellaires des étoiles en fin de vie et les nébuleuses protostellaires en formation qui, au sein de notre galaxie, sont les zones les plus propices à la condensation : c'est à dire à la formation de solides à partir du gaz, principalement car ces zones correspondent à des environnements pression-température restreints. Impossible à observer à l'heure actuelle, ces processus sont pourtant fondamentaux pour comprendre le cycle de la matière puisque, on le sait, la poussière joue un rôle primordial dans la physique et la chimie de la galaxie. Il est donc essentiel de comprendre les conditions dans lesquelles cette condensation opère (température, composition du gaz, pression, condition hors-équilibre ou à l'équilibre), ainsi que la nature des phases condensées (minéralogie des grains, composition, taille, cristallinité). L'étude des météorites d'une part, notamment de la minéralogie des inclusions réfractaires, et les observations spectrales des étoiles évoluées ou du milieu interstellaire d'autre part, laissent à penser que certains objets aient pu se former soit par des processus de condensation à l'équilibre à haute température dans la nébuleuse protosolaire soit par des processus de condensation hors équilibre basse température.

Même si l'observation et la modélisation des milieux stellaires *s.l.* progressent à grand pas dans la communauté astronomie-astrophysique, il nous semble particulièrement important de favoriser une approche expérimentale pour mieux comprendre ces processus de condensation. C'est le sens de

notre démarche de ces dernières années (Thèses L. Tissandier et A. Toppani) où nous nous sommes attachés à développer un appareillage : «Nébulotron», permettant de simuler des processus de condensation en conditions stellaires ou interstellaires, c'est à dire à basse pression  $<10^{-3}$  bar, températures variables, à l'équilibre et hors équilibre, d'un gaz de composition solaire (Si, Mg, Ca, Al, O). Notre réussite dans ce domaine (Tissandier *et al.* 2002; Toppani *et al.* 2005, 2006) nous conduit pour ce prochain exercice à persévérer dans cette approche d'astrominéralogie expérimentale. Nous souhaitons notamment approfondir des questions plus fondamentales sur les processus de condensation eux-mêmes: nucléation, croissance, cristallinité, taille des grains, composition chimique, collage des grains, fractionnement du gaz, etc... afin de mieux comparer nos synthèses aux objets réels (météorites et spectres ISO, Herschel). Pour se faire nous étudions la possibilité avec les collègues grenoblois (J.L. Hazemann, UPR 2940, Institut Néel) de mettre en ligne une partie de notre nébulotron (laser + chambre + pompe à vide turbomoléculaire) sur le synchrotron de l'ESRF (Thèse Marie Curie Actions RTNs). L'idée serait de faire de la reconnaissance minéralogique (diffraction X) *in situ* des phases entrain de condenser dans le gaz réfractaire chaud. En s'affranchissant ainsi des processus de nucléation hétérogène liés au support en platine des condensats de la précédente expérience, nous aurions là une expérience quasi-analogue des processus de condensation stellaire.

## CONDITION DE FORMATION DES CHONDRES ET NATURE DES PRÉCURSEURS

Composés d'olivine, de pyroxène, de métal, de sulfure et de verre, les chondres avec leurs textures ignées représentent, avec près de 80% de la roche, le constituant le plus abondant des météorites primitives. Ces corps chondritiques constituant à leur tour la majeure partie de la ceinture d'astéroïde, les chondres offrent une occasion unique d'accéder à l'histoire primitive du système solaire jeune (Hewins *et al.* 2005). Outre les informations chronologiques dont ils sont porteurs (voir infra), leur étude peut en effet permettre de préciser les conditions initiales régnant dans le disque protoplanétaire solaire au moment de leur formation (pressions partielles, température, temps, opacité, etc). Résultats qui, à leur tour, permettront d'affiner les modèles astrophysiques de formation stellaire, et notamment d'évolution des disques protoplanétaires. Malgré leur diversité, tous les modèles envisagent, peu ou prou, une formation des chondres à partir de solides finement divisés issus pour l'essentiel de condensats nébulaires

qui auraient été fondus par ondes de choc dans le disque ; les rares grains reliques observables dans certains chondres résultant de l'incorporation de morceaux de chondres ou d'inclusions réfractaires.

Nos résultats récents reviennent sur ces modèles conventionnels et proposent que les chondres correspondent à des objets plus complexes (Libourel *et al.* 2006; Libourel et Krot, 2007), constitués d'un composant lithique de composition dunitique (olivine  $\pm$  métal) hérité de corps astéroïdaux différenciés primitifs et d'un composant igné en équilibre avec le gaz nébulaire (verre + pyroxène  $\pm$  silice). Pour cet exercice, nous souhaitons, grâce à une approche expérimentale et analytique, progresser dans notre compréhension de ces objets en travaillant d'une part sur la nature des précurseurs (différenciés?) à partir desquels ils se sont formés et d'autre part sur l'environnement nébulaire dans lequel ils se sont formés.

## Précurseurs des chondres

Si, comme nous le pensons, les olivines présentes dans les chondres magnésiens ont cristallisé dans un manteau planétaire et non à partir des chondres eux-mêmes ou d'une phase gazeuse nébulaire, ces corps, s'ils existent, ont dû être caractérisés par des signatures isotopiques homogénéisées à haute température, comme c'est le cas des planètes terrestres. Nous souhaitons donc essayer d'identifier de telles homogénéités par une étude systématique isotopique (O, D, gaz rares) et chimique (REE, traces) des olivines dans les différents types de chondrites (CV, CR, CM, OC). À terme, cette étude devrait permettre de mieux caractériser la distribution des signatures isotopiques dans les chondres, de tester l'hypothèse que les phases haute température gardent une mémoire des entités dont elles sont issues (voir infra radioactivités éteintes), confortant (ou infirmant) nos modèles sur la formation des chondres, et si nous avons de la chance, caractériser des embryons ou des protoplanètes maintenant disparues. Notons enfin que cette approche sur la recherche des

précurseurs des chondres *s.l.* pourrait être complétée par l'analyse des fractionnements isotopiques du calcium qui semblent également de bons traceurs pour quantifier l'incorporation de matériel type CAI dans les chondres.

De façon à mieux appréhender ce problème des précurseurs dans les chondres, une étude des inclusions vitreuses des olivines des chondres sera également entreprise (ANR MIME, 2008-2010). Elle aura pour objectif de préciser les conditions de formation de ces inclusions dans les chondres et d'établir la signification de leurs compositions, qui sont le plus souvent différentes de celles mesurées à partir de la mésostase du chondre. L'approche sera à la fois expérimentale et analytique et portera sur les inclusions vitreuses des olivines magnésiennes de Type I et ferreuses de Type II. Des inclusions synthétiques seront reproduites au laboratoire en effectuant divers types d'expériences de cristallisation dynamique en suivant un protocole similaire à celui décrit par Faure et Schiano (2005).

## Environnement nébulaire

Selon ce nouveau modèle, les chondres magnésiens seraient le résultat de l'interaction de fragments lithiques (voir ci-dessus) avec le gaz et les poussières de la nébuleuse. La formation des chondres doit donc être vue comme un processus se produisant en système ouvert pour lequel les interactions avec le gaz nébulaire sont prépondérantes et dans lequel du temps est nécessaire pour résorber les olivines réfractaires.

Nous avons récemment montré (Chaussidon *et al.* soumis) que l'analyse systématique des isotopes de l'oxygène des différentes phases présentes dans les chondres (olivine, pyroxène, mesostase) permettait, outre de confirmer l'hypothèse d'une formation des chondres en système ouvert, d'identifier la composition isotopique du gaz nébulaire avec lequel ils ont interagi durant leur formation. Pour cet exercice, nous élargirons cette approche originale à l'ensemble des principaux types de chondrites (CV, CR, CM, OC, EH, EL) de façon à tester l'homogénéité ou non du gaz nébulaire. De plus, dans l'optique de simuler au laboratoire les interactions chondres-gaz nébulaire, nous continuerons à développer nos expériences de solubilité élémentaire (alcalins, silicium, etc) dans les liquides silicatés à partir de la phase gazeuse (Georges *et al.* 2000; Tissandier *et al.* 2002;

Mathieu *et al.*, soumis). Nous avons en effet à disposition un nouveau protocole expérimental permettant d'établir, de contrôler et de mesurer les activités et les pressions partielles de sodium dans des bains silicatés (Thèse Romain Mathieu). Appliquée aux chondres, cette approche devrait nous permettre de quantifier directement les pressions partielles :  $P_{Na(g)}$ ,  $P_{K(g)}$ ,  $P_{SiO_2(g)}$  régnant dans la nébuleuse protosolaire lors de la formation des chondres.

De façon à évaluer les cinétiques de formation des chondres dans le milieu nébulaire, nous proposons d'effectuer des expériences de cristallisation et de dissolution des minéraux cardinaux des chondres (olivines, pyroxènes) à partir de ou dans des liquides silicatés de composition fixée. L'aspect novateur résidera dans le fait que ces expériences seront réalisées à haute température et sous atmosphère contrôlée dans une platine chauffante et que les cinétiques de cristallisation/dissolution seront mesurées *in situ* grâce à une caméra CCD à haute résolution placée sur un microscope équipée d'objectifs à grande distance focale. Ce plan d'expérience permettra à terme d'établir les lois cinétiques de dissolution et de cristallisation des principales phases minérales des chondres et le timing de formation des textures actuelles des chondres.

## ORIGINE DES RADIOACTIVITÉS ÉTEINTES

Les radioactivités éteintes (i.e. les éléments radioactifs ayant des demi-vies courtes de l'ordre de quelques millions d'années) revêtent une

importance toute particulière en cosmochimie. Celles qui ont été identifiées jusqu'à présent dans les météorites sont :

le  ${}^7\text{Be}$  ( $T_{1/2} = 53$  jours),  
 le  ${}^{10}\text{Be}$  ( $T_{1/2} = 1,5$  Ma),  
 le  ${}^{26}\text{Al}$  ( $T_{1/2} = 0,73$  Ma),  
 le  ${}^{36}\text{Cl}$  ( $T_{1/2} = 0,3$  Ma),  
 le  ${}^{41}\text{Ca}$  ( $T_{1/2} = 0,1$  Ma),  
 le  ${}^{53}\text{Mn}$  ( $T_{1/2} = 3,7$  Ma)  
 et le  ${}^{60}\text{Fe}$  ( $T_{1/2} = 1,5$  Ma).

La présence de ces éléments radioactifs dans le disque d'accrétion solaire, comme en atteste la présence d'excès de leurs isotopes fils dans les composants primitifs des météorites, implique qu'ils aient été produits dans un laps de temps de quelques centaines de milliers à quelques millions d'années par rapport à la formation du système solaire. Depuis la découverte de l' ${}^{26}\text{Al}$  (Lee *et al.*, 1976) dans une inclusion réfractaire (CAI) de la météorite Allende, deux sources nucléosynthétiques ont été discutées pour l'origine des radioactivités éteintes : d'une part la production par des étoiles en fin de vie (supernova, géantes rouges, ...) dont l'étape finale aurait précédé la formation du système solaire ou d'autre part, une production à l'intérieur du système solaire par des processus d'irradiation autour du Soleil jeune (Goswami & Vanhala, 2000 ; Busso *et al.*, 2003 ; Goswami *et al.*, 2005 ; Chaussidon & Gounelle, 2006).

Ces deux scénarios ont des aficionados et des détracteurs et ils ont tous les deux reçus récemment des confirmations observationnelles sur le plan astrophysique. L'observation de régions HII dans Orion a montré que des étoiles pouvaient se former à la limite de la cavité HII (l'effondrement d'une partie du nuage moléculaire peut être déclenché par le choc dû à l'interaction entre le vent de l'étoile massive qui sculpte la cavité HII et le nuage moléculaire qui l'entoure) et ensuite évoluaient (évaporative gaseous globule EGG, proplyd, ...) et se trouvaient inévitablement, à l'échelle de quelques millions d'années, exposées dans la cavité HII aux produits éjectés par l'étoile massive en fin de vie (Hester & Desh, 2004). À l'inverse, l'observation de l'activité X d'étoiles jeunes de masses solaires dans Orion par le satellite Chandra a démontré que ces étoiles passaient par un stade d'intense activité X impliquant qu'elles pouvaient être la source d'un flux de protons environ  $10^5$  fois plus intense que le flux du Soleil actuel, et ce pendant quelques millions d'années (Feigelson *et al.*, 2002 ; Preibisch & Feigelson 2005 et les autres articles dans ce numéro d'*Ap. J* consacré au projet Chandra). De telles fluences permettent de prédire la production d'éléments radioactifs à courte période dans la partie interne du disque exposée à l'étoile jeune (Lee *et al.*, 1998 ; Gounelle *et al.*, 2001, 2006).

Les études récentes des radioactivités éteintes dans les météorites mettent aussi en lumière ce problème. D'une part la découverte de la présence du  ${}^{10}\text{Be}$  (McKeegan *et al.*, 2000) et du  ${}^7\text{Be}$  (Chaussidon *et al.*, 2006) dans les CAIs

d'Allende est généralement considérée comme une preuve de la présence de produits d'irradiation nucléosynthétisés autour du Soleil jeune. D'autre part, la présence de  ${}^{60}\text{Fe}$  dans certains sulfures et chondres de Semarkona (Mostéfaoui *et al.*, 2004 ; Tachibana & Huss, 2003) démontre la présence de produits de supernova, le  ${}^{60}\text{Fe}$  étant un noyau riche en neutrons et donc produit avec très peu d'efficacité par les processus d'irradiation (Lee *et al.*, 1998). Les calculs montrent en outre que toutes les autres radioactivités éteintes ( ${}^{26}\text{Al}$ ,  ${}^{36}\text{Cl}$ ,  ${}^{41}\text{Ca}$  et  ${}^{53}\text{Mn}$ ) pourraient être produites dans les quantités observées dans les météorites par les processus d'irradiation dont l'intensité est calibrée par le  ${}^7\text{Be}$  et le  ${}^{10}\text{Be}$  (Gounelle *et al.*, 2006).

Une autre complexité des scénarios d'injection est le timing précis de l'injection et les processus de mélange dans le disque d'accrétion, une homogénéisation des radioactivités éteintes étant généralement considérée, mais pas toujours (Gounelle & Russel, 2005), comme le pré-requis à toute utilisation en termes de chronologie relative des abondances des radioactivités éteintes (e.g. Goswami & Vanhala, 2000). Certaines des données les plus récentes sur l'abondance initiale de l' ${}^{26}\text{Al}$  (Bizzarro *et al.*, 2004 ; Thrane *et al.*, 2006) montrent une très grande homogénéité de sa distribution avec un rapport initial  ${}^{26}\text{Al}/{}^{27}\text{Al}$  de  $5,85 \pm 0,05 \times 10^{-5}$ . Cependant des valeurs supracanoniques allant jusqu'à  $7 \times 10^{-5}$  ont été trouvées dans les CAIs (Young *et al.*, 2005). L'absence d' ${}^{26}\text{Al}$  dans certaines hibonites de Murchison et d'Allende est considérée par certains comme une preuve de la formation de ces grains d'hibonite très tôt dans l'histoire du système solaire, avant que l' ${}^{26}\text{Al}$  n'ait été injecté (Sahijpal *et al.*, 2000). Dans le même ordre d'idées, il a été proposé très récemment, à partir de l'observation d'un déficit de  ${}^{60}\text{Ni}$  dans certaines météorites de fer, dans l'angrite SAH 99555 et dans des chondres et CAIs d'Allende, que le  ${}^{60}\text{Fe}$  avait été introduit dans le système solaire environ 600 000 ans après la formation des CAIs (Bizzarro *et al.*, 2007). Il existe donc actuellement une certaine confusion (c'est le moins que l'on puisse dire !) sur l'origine des radioactivités éteintes et sur leur distribution dans le système solaire.

Ce projet vise donc à faire des progrès quant à notre compréhension de l'origine et de la distribution des radioactivités éteintes dans le système solaire jeune. Trois radioactivités éteintes seront étudiées en priorité : le  ${}^{10}\text{Be}$  (produit par irradiation), le  ${}^{60}\text{Fe}$  (produit de supernova) et l' ${}^{26}\text{Al}$  (deux origines possibles mais élément essentiel pour la chronologie relative et source de chaleur potentielle pour la différenciation précoce des planétésimaux). La thèse de Johan Villeneuve traitera en partie de l'étude du  ${}^{26}\text{Al}$  et du  ${}^{60}\text{Fe}$  dans les chondres. À cela s'ajouteront des travaux, en collaboration avec Gopalan Srinivasan, sur les radioactivités éteintes à très courte période du  ${}^7\text{Be}$  et du  ${}^{41}\text{K}$ .

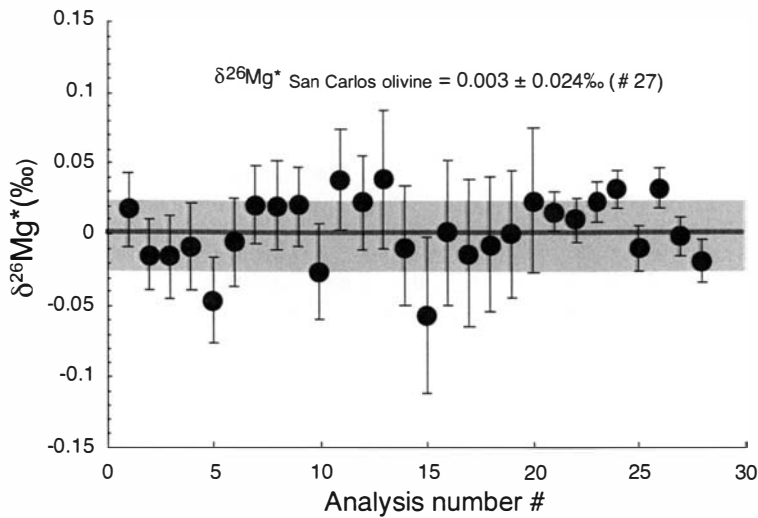


Fig.CPTP1 : Reproductibilité des mesures d'excès de  $^{26}\text{Mg}$  (écarts à la droite de discrimination de masse) dans une olivine terrestre standard (Chaussidon *et al.*, LPSC2006). Les mesures sont réalisées avec la sonde ionique ims 1270 en multicollektion avec 3 cages de Faraday pour la mesure des trois isotopes du Mg ( $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$  et  $^{26}\text{Mg}$ ).

et que à ce niveau l'existence d'anomalies isotopiques nucléosynthétiques du Ni (à la masse 62 entre autres) peuvent ajouter une incertitude analytique (Quitté *et al.*, 2006). Le deuxième objectif est (ii) de chercher à établir dans le même objet les abondances des trois radioactivités éteintes ( $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  et  $^{10}\text{Be}$ ), et ceci par des isochrones *in situ* indiscutables. Ces résultats permettront de confirmer, ou non, l'injection tardive du  $^{60}\text{Fe}$  et de comparer l'évolution des rapports  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ,  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  et  $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$  durant les premiers Ma du système solaire. Pour cela nous développerons une modélisation de l'effet de la diffusion post-cristallisation sur ces systèmes isotopiques pour faire la part de ce qui reflète vraiment des variations d'abondance dans le disque d'accrétion.

## ORIGINE DES SOURCES DES ÉLÉMENTS VOLATILS DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

L'une des grandes problématiques en cosmochimie est de comprendre les variations isotopiques, souvent extrêmes, de certains éléments légers comme H, O, et N par exemple (Clayton, 2003). Le but n'est pas purement intellectuel, mais bien d'utiliser ces traceurs isotopiques exceptionnels pour comprendre comment le système solaire s'est formé. Ces variations isotopiques, sans commune mesure avec celles enregistrées dans des échantillons terrestres, résultent soit de mélanges entre différents réservoirs ayant eu des histoires nucléosynthétiques différentes, soit de processus nucléaires dans le système solaire jeune, soit de fractionnements isotopiques exacerbés lors de réactions ion-molécule à très basse température dans le nuage moléculaire ou le système solaire naissant, soit enfin à plusieurs de ces processus.

Les variations isotopiques indépendantes de la masse de l'oxygène pourraient résulter, entre autres, des processus d'irradiation du gaz par le soleil jeune. Choisir entre ces différentes possibilités est très difficile, *a priori*, et requiert d'accumuler les données sur les compositions isotopiques des principaux réservoirs du système solaire, en commençant par le Soleil lui-même, puis les planètes, les météorites, les planètes géantes sensées représenter la nébuleuse protosolaire, et enfin les comètes. Nos efforts récents concernent l'analyse du vent solaire et de la matière cométaire, qui viennent compléter les données acquises sur les échantillons lunaires, les météorites et Jupiter. Les résultats sont surprenants et soulèvent des questions fondamentales que nous proposons d'explorer durant le prochain contrat quadriennal.

### Composition cométaire

Les comètes sont des objets peu connus qui, du fait de leur très basse température de formation, ont pu échantillonner des quantités importantes d'éléments volatils du

système solaire lointain. Leur contribution est fréquemment évoquée comme source de volatils des atmosphères des planètes internes. Leur composition, interstellaire ou solaire, requiert

Le premier objectif est (i) de chercher à établir la présence du  $^{60}\text{Fe}$ , et son niveau d'abondance, dans les chondres et les météorites différenciées (angrites et eucrites). Pour cela nous chercherons à obtenir des isochrones internes plus précises que celles déjà publiées sur les chondres par exemple (e. g. Tachibana & Huss, 2003). Nous pouvons maintenant atteindre une meilleure précision dans la mesure des rapports isotopiques du magnésium en utilisant le système de multi-collektion avec des cages de Faraday (Fig.CPTP1 page suivante). Cette approche devrait aussi permettre de faire progresser le débat quant à l'abondance du  $^{60}\text{Fe}$  initialement découvert par Birck et Lugmair (1988) ( $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} < 1,6 \times 10^{-6}$ ). L'approche en roche totale (Bizzarro *et al.*, 2007) souffre du fait que les anomalies de  $^{60}\text{Ni}$  à détecter sont très faibles (de l'ordre de 0,01‰)



l'analyse pétrologique et cosmochimique fine en laboratoire ; la mission Stardust avait pour but l'échantillonnage de grains cométaires lors du passage dans la queue de la comète Wild2/P. Les premiers résultats montrent que la matière cométaire échantillonnée est typique du système solaire, les variations isotopiques d'éléments clés étant très comparables à celles des chondrites et IDPs, validant au passage la thèse d'une origine cométaire pour nombre d'IDPs (Brownlee *et al.*, 2006). L'analyse des gaz rares au CRPG et à l'Université du Minnesota à Minneapolis a montré la présence d'hélium et de néon extraterrestres dans des fragments de bulle d'impact de grains cométaires dans des proportions tellement importantes qu'il faille envisager leur implantation

lors d'irradiation extrême par le Soleil jeune. De plus, le néon isotopique n'est pas celui attendu du Soleil, mais se rapproche plus de celui trouvé dans la matière organique des météorites.

Le rôle des comètes dans la formation des atmosphères, notamment celle des planètes terrestres, est souvent invoqué, mais une vérification quantitative de ces effets nécessite une meilleure connaissance de la composition des comètes. Pour ces raisons, nous avons demandé, et obtenu, des échantillons plus conséquents de grains cométaires, et nous souhaitons analyser isotopiquement les gaz rares lourds dont le xénon, et l'azote, élément pour lequel se pose un problème cosmochimique.

### **Composition du vent solaire**

Nous avons analysé la composition isotopique de l'azote dans le vent solaire échantillonné durant 27 mois par la sonde Genesis et implanté dans des cibles dorées. Ces analyses mettent en évidence un pôle solaire ayant un rapport  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  similaire à celui des planètes terrestres et des météorites, et très différent de celui de l'atmosphère de Jupiter, cette dernière étant appauvrie de 40 % par rapport à la Terre. Ce résultat surprenant pose la question suivante: Comment concilier des valeurs très différentes entre Jupiter, censé représenter la nébuleuse solaire, et le vent solaire, censé représenter la zone convective du Soleil ? De plus, l'azote des sols lunaires est enrichi d'un ordre de grandeur par rapport au vent solaire, après normalisation à un gaz rare solaire, et la composition isotopique de N dans les sols lunaires présente un pôle enrichi en  $^{15}\text{N}$  et un autre appauvri en  $^{15}\text{N}$  par rapport à notre nouvelle valeur du rapport  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  dans le vent solaire moderne. Quels sont les vecteurs de ces composants exotiques d'azote ? Y a-t-il eu une évolution séculaire de la composition isotopique

de N dans le vent solaire, comme cela a été proposé voici trois décennies (Kerridge, 1975)? Cette possibilité avait été écartée par (Geiss and Boschler, 1982) qui n'avaient pu identifier des processus solaires réalistes. Cependant, les différentes hypothèses de ces auteurs devront être reconsidérées maintenant que l'on pense que le vent solaire moderne est effectivement «normal» plutôt que similaire à l'azote Jovien censé représenter la nébuleuse protosolaire. Lors de cet exercice, nous allons explorer les causes possibles de variation isotopique de N par l'analyse d'autres cibles de Genesis, une re-évaluation des données N-gaz rares des échantillons lunaires d'Apollo et de météorites lunaires (en cours d'analyse), et de la matière organique macromoléculaire des météorites (analyse isotopique de N extrait par pyridinisation (Marrocchi *et al.*, 2005)) Résoudre ce paradoxe aura des implications fortes pour l'origine des fractionnements isotopiques dans le système solaire (par exemple, O (Clayton, 2002)).

## **PLANÈTES**

Trois actions principales sont rassemblées dans ce thème. Deux d'entre elles sont liées à de futures missions spatiales et sont donc à ce titre très prospectives. L'étude de la différenciation métal-silicate à travers celle des variations isotopiques du Fe et du Ge est quant à elle une continuation et un développement de travaux déjà menés au cours du quadriennal précédent.

### **DIFFÉRENCIATION MÉTAL-SILICATE**

La variation des conditions physico-chimiques ( $f\text{O}_2$ , température, composition) lors de la différenciation des planétésimaux se traduit par des fractionnements élémentaires et isotopiques des éléments sidérophiles entre phase métal et phase silicatée. Nous l'avons mis en évidence par l'étude couplée expérimentation - isotopes du fer en fonction de la fugacité d'oxygène. Par contre, le fractionnement isotopique du Ge,

élément moyennement sidérophile, dans les météorites de Fer des groupes magmatiques représentant le noyau des planètes, sont similaires ( $\delta^{74}\text{Ge}=1,77\pm 0,22\%$ ), malgré l'évidence de conditions de  $f\text{O}_2$  distinctes. Le comportement du germanium par des processus redox durant la ségrégation métal-silicate sera étudié par une approche analogique de météorites primitives et différenciées et par une étude couplée

expérimentale et isotopique. (1) Le fractionnement isotopique du germanium des météorites primitives (chondrites carbonées et ordinaires) déterminera s'il y a variabilité isotopique des corps primitifs, avec conséquences sur les processus dans la nébuleuse solaire. L'analyse de grains de métal dans les chondrites, après tri manuel, sera également envisagée, et permettra de remonter à des compositions isotopiques du germanium de phases métalliques pouvant représenter des condensations directes à partir de la nébuleuse. La faisabilité d'analyses isotopiques *in situ* (soit par laser couplé MC-ICPMS, ou sonde ionique) pourra également être envisagée et demandera

un développement analytique. La comparaison des compositions de ces chondrites avec les météorites de fer et achondrites permettra de comprendre les processus de différenciation des planètes. (2) Une simulation expérimentale de la ségrégation métal-silicate mettra en œuvre le partage préférentiel du germanium d'une phase silicatée vers une phase métal en fonction de la  $fO_2$  et du paramètre temps. La quantification du fractionnement isotopique lié aux processus redox, diffusion et potentiellement évaporation sera évaluée et comparée aux données isotopiques des météorites.

## MISSION DE RETOUR D'ÉCHANTILLONS DE PHOBOS

La mission russe Phobos-Grunt a pour objectif d'étudier un des deux satellites de Mars (Phobos) et de ramener sur Terre des échantillons de son régolithe. Après un lancement prévu en 2009 et un voyage de presque une année assuré grâce à un moteur à propulsion ionique, la sonde se mettra en orbite autour de Mars pour cartographier la surface de Phobos et déterminer la zone d'atterrissage. La sonde une fois posée prélèvera avec un bras articulé un total de quelques centaines de grammes de sol du régolithe de Phobos et une capsule de retour sera tirée de l'atterrisseur pour ramener les échantillons sur Terre. La faible vitesse d'échappement à la surface de Phobos (environ 11 m/sec) facilite ce type de mission de retour par rapport à un retour d'échantillon de Mars.

Phobos n'a jusqu'à présent été étudié que par la mission russe Phobos 2 (1988-1989). C'est un objet quasi-sphérique (27x 21 x 18 km) qui se trouve à environ 6000 km de Mars et dont l'orbite (Phobos se rapproche de Mars) suggère qu'il a été capté par Mars et qu'il a donc une origine différente de celle du satellite terrestre, la Lune. La composition de Phobos n'est pas connue mais son albédo est faible indiquant une composition peut être semblable à celle des astéroïdes de type C. Les astéroïdes de type C sont considérés par certains comme les corps parents des chondrites carbonées (e. g. Allende) qui sont les chondrites parmi les plus primitives que l'on connaisse et qui sont riches en volatils. Le retour de plusieurs centaines de grammes d'échantillons de Phobos sur Terre constituerait une opportunité assez extraordinaire pour les géologues permettant d'étudier ces échantillons avec toute la panoplie des techniques modernes appliquées aux météorites (analyses minéralogiques, chimiques, isotopiques). Cette mission serait la première à ramener sur Terre une grosse quantité d'échantillons extraterrestre

après les missions Apollo des années 70, les deux dernières missions de retour d'échantillons de vent solaire (GENESIS) et d'échantillons cométaires (STARDUST) ayant ramené moins d'1mg de matière. De nombreuses questions scientifiques pourront être abordées grâce à l'étude des échantillons de Phobos comme par exemple (i) la caractérisation de la composition de Phobos et donc la détermination de son origine avec comme idée directrice de déterminer si Phobos ne pourrait, en fait, pas être un objet formé au delà de l'orbite de Jupiter (ce qui le rapprocherait d'un noyau cométaire), (ii) la comparaison de sa composition avec celle des chondrites carbonées connues, (iii) la datation de ses composants et la caractérisation de son «histoire géologique» pour essayer de dater sa formation et sa capture par Mars, (iv) l'étude de l'histoire d'irradiation et de bombardement enregistrée par son régolithe pour à la fois reconstruire l'histoire de Phobos mais aussi comparer cet enregistrement avec celui de la Lune qui est plus proche du Soleil, ...

Le CNES souhaite soutenir une participation française à la mission Phobos-Grunt en soutenant à la fois la participation des laboratoires spatiaux français aux instruments embarqués (notamment le module d'analyse des gaz) mais aussi en soutenant l'étude des échantillons ramenés sur Terre. Des protocoles spécifiques et des collaborations devront être développées pour cela dans l'esprit de ce qui avait été engagé pour l'étude des échantillons martiens et de ce qui a été réalisé pour les échantillons cométaires de la mission STARDUST. Le CRPG, dans la logique des travaux développés ces dernières années en cosmochimie, essaiera d'être moteur dans ce processus, un de ses membres ayant été proposé comme l'interlocuteur de la communauté française avec les russes pour l'étude des futurs échantillons.

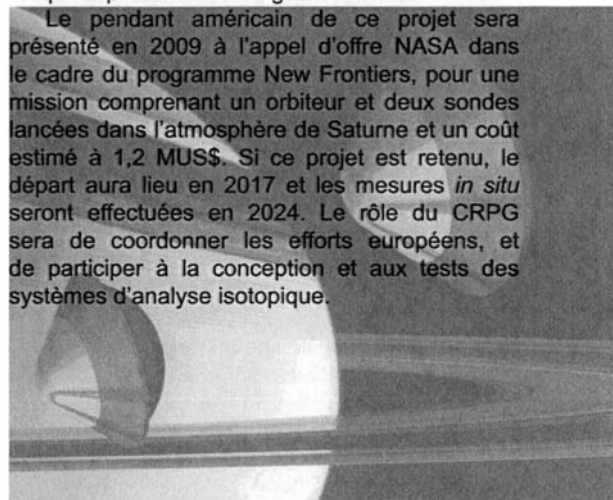
## L'EXPLORATION DES PLANÈTES GÉANTES

Les planètes géantes constituent des archives gazeuses exceptionnelles des compositions initiales des réservoirs ayant évolué vers le système solaire actuel. Ainsi, la composition de Jupiter, analysée par infra-rouge (Fouchet *et al.*, 2000) puis *in situ* par la sonde Galileo (Owen *et al.*, 1999), met en évidence un enrichissement des espèces volatiles plus lourdes que l'hydrogène, l'hélium et le néon, qui est interprété comme résultant de la contribution de planétésimaux glacés dont les comètes représentent sans doute les analogues modernes. Ces analyses ont également montré un appauvrissement de 400 pour mille en  $^{15}\text{N}$  dans l'atmosphère de Jupiter par rapport à l'azote terrestre. Les compositions des planètes internes dont la Lune et des météorites seraient le résultat d'addition de composés azotés enrichis en  $^{15}\text{N}$  lors de réactions ion-molécule dans les nuages moléculaires. Nous avons vu le problème de cette interprétation à la lumière des résultats de Genesis, qui tendent à montrer que l'azote du Soleil est similaire à celui de la Terre. Saturne, la planète géante la plus proche de Jupiter en distance et en masse, a une composition atmosphérique différente, qui ne peut s'expliquer par un modèle simple de capture du gaz primitif, et montre au contraire la complexité des sources et processus de formation planétaire.

Les données sur Saturne sont peu nombreuses et très rudimentaires et, afin d'acquérir des données fiables et précises de la composition des stables et gaz rares de l'atmosphère de

Saturne, un projet de mission d'analyse *in situ* de l'atmosphère de Saturne a été proposé à l'appel d'offre Cosmic Vision de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), dont le porteur est l'un d'entre nous. Ce projet appelé KRONOS rassemble un consortium comprenant 47 scientifiques de 9 pays européens et vise à s'intégrer dans un effort international ESA-NASA d'exploration de Saturne dans la ligne de celle de Jupiter voici une décade. Le programme consistera à envoyer un orbiteur et deux sondes destinées à rentrer dans l'atmosphère de Saturne pour y mesurer les compositions isotopiques de H, C, N, O et gaz rares, les teneurs en eau et autres molécules majeures, la dynamique atmosphérique et quelques paramètres géophysiques clés dont le champ de gravité. Nous serons particulièrement attentif à la mesure du rapport  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  de Saturne, afin de conforter, ou non, l'existence d'une valeur unique représentative du gaz nébulaire.

Le pendant américain de ce projet sera présenté en 2009 à l'appel d'offre NASA dans le cadre du programme New Frontiers, pour une mission comprenant un orbiteur et deux sondes lancées dans l'atmosphère de Saturne et un coût estimé à 1,2 MUS\$. Si ce projet est retenu, le départ aura lieu en 2017 et les mesures *in situ* seront effectuées en 2024. Le rôle du CRPG sera de coordonner les efforts européens, et de participer à la conception et aux tests des systèmes d'analyse isotopique.



## TERRE PRIMITIVE

L'Hadéen (période avant 4 milliards d'années) et l'Archéen (avant 2,5 milliards d'années) constituent deux périodes clefs de l'histoire de la Terre pendant lesquelles de très grands changements se sont produits. L'étude de la Terre hadéenne et archéenne est rendue difficile par la rareté des échantillons très anciens et par les transformations importantes qu'ils ont souvent subies. Les traceurs isotopiques sont les outils essentiels qui permettent de s'affranchir en partie de ces transformations et de remonter aux compositions de la croûte, du manteau, de l'atmosphère et des océans à cette époque. Les variations des compositions isotopiques de ces différents réservoirs mettent en évidence les processus qui ont modelé l'évolution précoce de la Terre et permettent d'essayer de reconstituer les variations des conditions de l'environnement. Nous aborderons ces différents aspects grâce à plusieurs approches analytiques originales :

(i) l'analyse isotopique à l'échelle de la dizaine de micromètres avec la sonde ionique ims 1270 et nous l'espérons au cours de ce quadriennal avec la future sonde ionique à très grande résolution de masse,

(ii) l'analyse isotopique de haute précision avec le MC-ICPMS Isoprobe pour les isotopes du K, du Ca et du Ge

et enfin (iii) l'analyse isotopique des gaz rares dans les inclusions fluides des roches sédimentaires archéennes par spectrométrie statique multi-collection.

Pour des raisons de facilité de présentation, trois thématiques ont été définies dans la suite mais il est évident que des intersections importantes existent entre tous ces projets et que l'étude de la Terre primitive est aussi à considérer dans un contexte planétologique et cosmochimique plus global. Il existe un lien fort entre certains de nos thèmes de recherche en cosmochimie (composition isotopique du Soleil et de la nébuleuse protosolaire, origine et différenciation des premières planètes, origine des volatils et

des atmosphères, origine de la matière carbonée dans le système solaire, ...) et l'étude de la formation et de l'évolution précoce de la Terre. Il est sans doute encore plus important de bien mettre en parallèle les informations obtenues sur la Terre primitive avec celles qui peuvent être obtenues sur la Lune et Mars qui sont passées par un stade d'océan magmatique semblable à celui de la Terre, mais qui ont ensuite subi une évolution très différente. Nous sommes particulièrement conscients de ces aspects : nous travaillons depuis plusieurs années sur les échantillons ramenés de la Lune par les missions Apollo et sur les météorites SNC «martiennes» et nous avons veillé à tisser des liens forts avec la communauté française de planétologie à travers l'organisation d'écoles thématiques conjointes ou à travers l'enseignement en master (modules conjoints Nantes-Nancy, modules de planétologie). L'évolution de la Terre ne peut plus être considérée en dehors d'un contexte de «géologie extraterrestre».

## LA PREMIÈRE CROÛTE TERRESTRE ET SON DÉVELOPPEMENT À L'ARCHÉEN ET AU PROTÉROZOÏQUE

Grâce au développement, il y a une vingtaine d'années, de la datation de zircons par le système U/Pb avec la sonde ionique SHRIMP de l'Australian National University de Canberra, nous sommes sûrs maintenant qu'une croûte s'est formée très tôt à la surface de la Terre (Froude *et al.*, 1983 ; Compston & Pidgeon, 1986). Ces zircons sont les seuls échantillons de roche datant de plus de 4 milliards d'années que nous ayons entre nos mains, ou plus précisément que nous soyons capables de reconnaître car c'est le seul type de minéral pour lequel, actuellement, une datation à l'échelle du micromètre est possible.

### De «nouveaux» échantillons hadéens et archéens

L'importance de trouver de «nouveaux» échantillons hadéens et archéens peut facilement être comprise en regardant rapidement ce que les zircons à eux seuls ont apporté à notre connaissance de l'évolution primitive de la Terre. Les compositions chimiques et isotopiques de ces zircons (mesurées par sonde ionique) fournissent en effet d'autres renseignements, que simplement leur âge, sur l'histoire précoce de la Terre. La concentration en Ti du zircon est fonction, entre autres, de sa température de cristallisation : les zircons hadéens semblent avoir des concentrations en Ti semblables aux zircons granitiques actuels cristallisés dans des magmas à des températures de l'ordre de 700°C, ce qui suggère que vers 4,35 Ga la structure thermique de la croûte terrestre là où elle existait était déjà assez semblable à l'actuel (Watson et Harrison, 2005). Un autre indice important est la composition isotopique de l'oxygène dans ces zircons. Un enrichissement en  $^{18}\text{O}$  a été observé dans un grand nombre de ces zircons (Wilde *et al.*, 2001 ; Mojzsis *et al.*, 2001 ; Cavosie *et al.*, 2005) ce qui suggère une source enrichie en  $^{18}\text{O}$  par rapport au manteau. La seule manière connue pour faire cet enrichissement est l'interaction à basse température (quelques centaines de degrés au plus) entre l'eau de mer et le manteau que ce soit par hydrothermalisme ou à travers le cycle sédimentaire. Les enrichissements en  $^{18}\text{O}$  des zircons hadéens sont donc un argument en faveur de l'existence d'eau liquide sur Terre à cette

L'idée de ce projet est d'une part

(i) de développer avec la sonde ims 1280 la datation  $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$  et la datation  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ca}$  à l'échelle micrométrique, ce qui pourrait permettre d'identifier dans nos collections toute une série de «nouveaux» échantillons hadéens et archéens, autres que des zircons, échantillons jusqu'à présent impossibles à reconnaître et

(ii) d'appliquer le système  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ca}$  au traçage de la croissance et de l'érosion de la croûte continentale archéenne grâce à des mesures isotopiques en haute précision par TIMS.

époque. Enfin, très récemment des études par MC-ICP-MS de plus d'une centaine de ces zircons hadéens (formation de Jack Hills en Australie) préalablement datés par sonde ionique avec le système U/Pb (Harrison *et al.*, 2005), ont révélé qu'ils avaient des compositions isotopiques de l'Hf (variations de quelques dixièmes de pour mille du rapport  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ) variables qui montraient des enrichissements et des appauvrissements par rapport au manteau terrestre actuel. Ces variations du rapport  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  impliquent l'extraction du manteau hadéen de croûte différenciée très très tôt dans l'histoire de la Terre, peut-être dès 4,5 Ga, alors que l'océan magmatique initial était en train de se solidifier. Ces résultats vont dans le même sens que la découverte d'excès de  $^{142}\text{Nd}$  (provenant de la décroissance active du  $^{146}\text{Sm}$  qui a une demi-vie de 103 Ma) dans les roches archéennes d'Isua au Groenland (Caro *et al.*, 2003, 2006 ; Boyet *et al.*, 2003) qui indiquent aussi une différenciation précoce vers 4,46 Ga. Ils sont également en accord avec la composition isotopique du xénon mantélique indiquant un taux de dégazage, et donc de production magmatique et un taux de convection un ordre de grandeur plus important à l'Hadéen qu'à l'Archéen (Yokochi and Marty, 2005). Les variations isotopiques de l'Hf dans les zircons hadéens et du Nd dans les roches archéennes sont compatibles avec la cristallisation en profondeur de la base d'un océan magmatique (Caro *et al.*, 2005).

Dans ce projet, nous essayerons de développer la datation  $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$  et la datation  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ca}$  par sonde ionique à l'échelle micrométrique. Les tests réalisés jusqu'à présent indiquent que cet objectif est réalisable dans certaines phases minérales (cf projet sonde ionique à très grande résolution). Nous chercherons, grâce à ces techniques de datation, si d'autres minéraux « plus classiques » que les zircons ne sont pas présents dans les roches archéennes et n'ont pas préservé leur âge  $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$  et/ou  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ca}$  de formation.

Un autre aspect de ce projet sera d'essayer de déconvoluer les signatures géochimiques « primaires » de celles héritées de fluides métasomatiques dans le cas des zircons hadéens de Jack Hills (Australie). Ceci est nécessaire pour pouvoir reconstituer l'évolution de la première croûte terrestre car les zircons, bien que résistants à l'altération, n'en subissent pas moins des modifications chimiques importantes, notamment lors de la circulation de fluides hydrothermaux. Nous proposons pour cela d'utiliser le système isotopique  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ca}$ . Les processus d'altération génèrent en effet de forts enrichissements en calcium dans les zircons, aboutissant *in fine* à leur remplacement par de la zirconolite. En raison de son rapport K/Ca

très élevé, le rapport  $^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca}$  de la croûte continentale évolue vers des signatures de plus en plus radiogéniques. La signature isotopique en calcium des zircons altérés contient donc une information chronologique, qui peut être utilisée pour retracer leur histoire post-cristallisation. Ces mesures isotopiques *in situ* pourront être couplées à des mesures d'éléments traces qui permettront d'évaluer l'impact des processus d'altération sur les systèmes isotopiques Rb-Sr, Lu-Hf et Sm-Nd dans les zircons Archéens.

Une autre application de ces techniques de datations *in situ* pourra être bien sûr l'étude des inclusions silicatées dans les diamants et les informations qu'elles pourraient apporter sur l'évolution de la lithosphère archéenne. De même, l'étude des inclusions dans les zircons de Jack Hills (quartz+mica+feldspath potassique) deviendra possible. Ces travaux pourront être couplés à des travaux qui reprendraient (avec la précision des meilleures techniques TIMS actuelles) une étude de fond de l'évolution isotopique du Sr des grands réservoirs terrestres pendant le premier milliard d'années de l'histoire de la Terre. Les barytines, certains carbonates ou même certains cherts pourraient avoir préservé leurs signatures isotopiques originelles en Sr.

### **Contraintes apportées par le système $^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ca}$ sur l'évolution de la croûte continentale**

Le système  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ca}$  fut relativement peu employé dans le passé, en raison de difficultés analytiques importantes dans la mesure précise des rapports isotopiques du calcium. La technologie actuelle permet en partie d'éliminer ces difficultés et les résultats récemment obtenus montrent que les rapports isotopiques du calcium peuvent être mesurés avec une précision de 30ppm environ, soit une amélioration d'un facteur 3 à 5 par rapport aux travaux précédents. Les propriétés du système  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ca}$  en font, à ce degré de précision, un très bon traceur de l'évolution de la croûte continentale. En effet, les roches granitiques dans la croûte supérieure sont de facto les seules lithologies dont le rapport  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ca}$  est suffisamment élevé ( $\sim 1$ ) pour permettre le développement d'excès détectables de  $^{40}\text{Ca}$  radiogénique. A contrario, les roches du manteau et les lithologies basaltiques présentent des rapports si faibles (K/Ca  $\sim 0,01-0,03$ ) que la croissance du  $^{40}\text{Ca}$  reste indétectable,

même après 4,5 Ga. Enfin, du fait de sa courte période de désintégration (1,28 Ga), le système  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ca}$  est extrêmement sensible à la formation de la croûte continentale durant les deux premiers milliards d'années de l'histoire de la Terre. L'approche choisie dans cette étude consistera, en continuité avec les travaux menés par l'un d'entre nous (G. Caro) durant son stage post-doctoral au California Institute of Technology de Pasadena, à tenter de caractériser la composition isotopique du calcium des granitoïdes et des basaltes archéens du Groenland (3,6-3,8 Ga). Cette approche pourrait permettre d'identifier l'incorporation de croûte Hadéenne lors de la genèse des plus anciens cratons permettant ainsi de tester les différents modèles de croissance crustale. Parallèlement, nous tenterons d'évaluer précisément la constante de désintégration  $\beta^-$  du  $^{40}\text{K}$  en effectuant des mesures couplées Rb-Sr et K-Ca dans les météorites différenciées.

## **LES ENVIRONNEMENTS PRÉCAMBRIENS**

Si les changements climatiques qu'a connus la Terre dans les quelques dernières centaines de milliers d'années sont assez bien connus par l'étude des enregistrements sédimentaires et des carottes de glace, il n'en est évidemment pas de

même pour les périodes anciennes de l'Archéen. Pourtant la Terre a connu des changements drastiques des conditions de l'environnement comme le montrent, par exemple, la présence probable de glaciations globales au Protérozoïque

ou le changement de la composition de l'atmosphère avec l'augmentation de la concentration en oxygène vers 2,3 Ga indiquée par la disparition des anomalies indépendantes de la masse des compositions isotopiques du soufre des sédiments à cette époque (Farquhar *et al.*, 2000). Ces changements de composition atmosphérique ont très probablement eu des conséquences importantes sur les climats de la Terre. La physique du Soleil nous enseigne que le déroulement des réactions de fusion de l'hydrogène en son cœur depuis 4,5 Ga a entraîné une augmentation de sa luminosité d'environ 25%. Avec une luminosité plus faible de 25%, la Terre aurait dû être complètement gelée il y a 3,5 Ga, mais ce n'était pas le cas puisque l'enregistrement géologique contient des sédiments déposés à partir d'eau liquide à partir de 3,5 Ga. Ce paradoxe du «Soleil faible» est classiquement résolu en faisant appel à une composition atmosphérique à l'Archéen très différente de la composition actuelle car riche en gaz à effets de serre comme le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>

et la vapeur d'eau. De très grandes variations des températures de surface sont théoriquement possibles et les appauvrissements en <sup>18</sup>O des silex archéens par rapport à leurs équivalents modernes pourraient suggérer une température de surface il y a 3,5 Ga de l'ordre de 50 à 70°C plus élevée qu'aujourd'hui (Knauth et Lowe, 1978 ; Knauth 2005).

Les objectifs de ce projet sont :

(i) d'arriver à faire des progrès dans la détermination des températures de surface à l'Archéen à partir de l'étude isotopique des sédiments archéens (silex, carbonates, oxydes de fer),

(ii) d'essayer de reconstruire les variations du pH des océans à l'archéen à partir des variations des compositions isotopiques du Ca des carbonates marins et

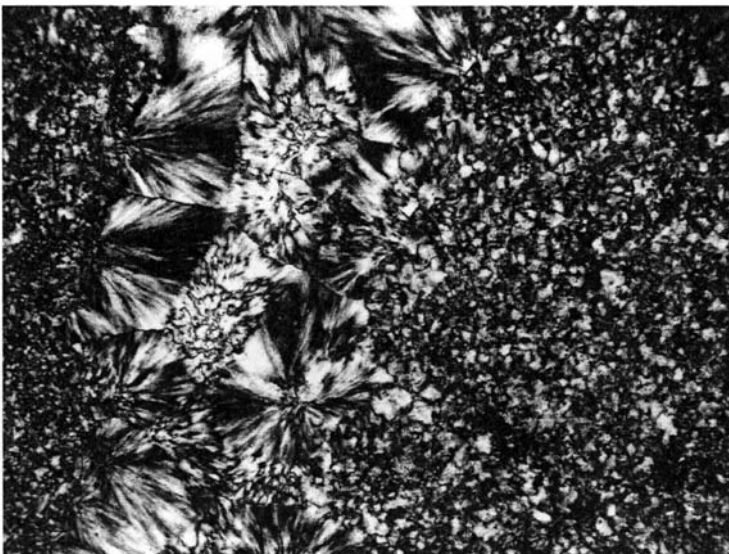
(iii) d'essayer de mesurer la composition chimique et isotopique (gaz rares) des océans archéens à partir de l'analyse des fluides piégés en inclusions dans les sédiments siliceux archéens.

### **La température des océans archéens**

Certains de nos travaux récents (Robert et Chaussidon, 2006) sur la composition isotopique du Si dans les silex archéens semblent indiquer aussi des températures élevées à l'Archéen. Notre approche consistera donc à essayer de mesurer les compositions isotopiques qui sont des indicateurs potentiels de variations de conditions environnementales (essentiellement O et Si, mais aussi peut-être H, B, ...) à petite échelle dans ces roches sédimentaires archéennes pour essayer d'identifier les perturbations secondaires (hydrothermalisme, altération) et

les zones non perturbées pour pouvoir ainsi remonter aux conditions de formations de ces roches. Nos travaux actuels (Thèse de Johanna Marin) sur les variations à petite échelle des compositions isotopiques de l'oxygène dans des silex de la formation Gunflint (2,1 Ga) permettent de démontrer que ces roches sont bien des roches sédimentaires et permettent d'identifier dans celles-ci le composant sédimentaire-diagénétique (qui donne accès aux conditions de l'environnement de formation), un composant détritique et un composant hydrothermal.

*Photo en lumière polarisée de différents types de quartz (microquartz, quartz radié, ...) présents dans un chert archéen.*



À l'évidence, une analyse en roche totale des compositions isotopiques de l'oxygène dans de tels échantillons n'est pas la manière correcte de conduire l'étude isotopique. Grâce à la future sonde ionique ims 1280, nous espérons pouvoir encore améliorer la précision des mesures isotopiques (O et Si par exemple) et pouvoir associer à la même échelle des études isotopiques et des études minéralogiques (MEB, Raman, cathodoluminescence, ...). La possibilité de traçage des composants hydrothermaux et détritiques sera également envisagée avec le Germanium. Le Germanium - qui est un analogue de la silice - a cependant un comportement différent lors de ces deux processus. Notamment l'adsorption préférentielle du Germanium par des oxydes/hydroxydes de fer formés par hydrothermalisme se traduit par un fractionnement du rapport Ge/Si (Ge/Si élevé) comparé aux processus sédimentaires. La détermination du

rapport Ge/Si ainsi que les mesures isotopiques du Ge par MC-ICPMS de cherts de différents âges depuis l'Archéen seront couplés à la mesure des isotopes du Silicium par sonde ionique. Nous pourrions en déduire la potentialité des isotopes du Ge comme traceur des conditions de formations des cherts et de l'évolution de la composition des océans depuis l'archéen. En plus des mesures des compositions des isotopes stables, nous essayerons de développer la datation *in situ* des silex archéens (méthode U/Pb) pour essayer de dater les échantillons indépendamment des âges stratigraphiques et pour quantifier les perturbations (et leur chronologie) à l'échelle du micromètre, des analyses de  $\delta^{18}\text{O}$  ou de  $\delta^{30}\text{Si}$ .

L'ensemble de ces observations représenteront des données nouvelles qui seront utilisées pour mieux contraindre les modèles théoriques de l'atmosphère précambrienne afin de réconcilier la faible luminosité solaire et une température élevée

à la surface de la Terre (modélisations conduites par Frank Selsis et François Forget). Le but de cette modélisation climatique (1D et 3D) sera de réévaluer l'effet de serre du  $\text{CH}_4$  avec un modèle de structure de la stratosphère en tenant compte des transitions dans le domaine visible et proche IR. L'effet du  $\text{CH}_4$  est complexe car les particules solides des brumes formées via sa destruction photochimique ont tendance à limiter l'effet de serre et à absorber les UVs solaires. D'autre part, la photolyse de  $\text{H}_2\text{O}$  et la perte de H dans l'espace est actuellement limitée par la teneur en  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CH}_4$  dans la stratosphère. Ce n'est plus le cas si les concentrations en  $\text{CH}_4$  sont élevées. Un tel échappement de H dans l'espace aurait des conséquences sur le rapport D/H des océans, rapport que nous espérons pouvoir aussi mesurer dans les sédiments archéens en choisissant bien avec la sonde ionique les minéraux à analyser.

### Le pH des océans archéens

La composition isotopique des carbonates marins présente d'importantes fluctuations au cours du Cénozoïque. Celles-ci peuvent être interprétées comme reflétant l'évolution isotopique de l'océan, ou alternativement, comme la conséquence de variations de pH ou de température sur les fractionnements isotopiques du calcium (Fig. CPTP2 ci-dessous).

Des expériences récentes indiquent, en effet, que l'amplitude de ce fractionnement pourrait être contrôlée par la pression partielle de  $\text{CO}_2$  atmosphérique (Lemarchand *et al.*, 2004). Ce résultat est important car il permet d'envisager l'utilisation des isotopes du calcium comme « pH-mètre » océanique. L'objectif à terme de ce projet est d'évaluer les grandes évolutions du cycle du  $\text{CO}_2$  depuis l'archéen. Dans un premier temps, nous étudierons des carbonates précipités dans des environnements à pH extrêmes de type lacs salins. Ces mesures permettront de vérifier en milieu naturel l'existence d'une relation entre pH et  $\Delta\text{Ca}$ . Par la suite, nous étudierons une série de sédiments archéens bien caractérisée chimiquement et pétrographiquement, et sélectionnée dans la collection du Precambrian Paleobiology Research Group (UCLA). Ces mesures seront effectuées par spectrométrie de masse à thermo-ionisation sur les roches totales et la variabilité interne des échantillons pourra être étudiée *in-situ* par sonde ionique, afin d'évaluer l'importance des phénomènes secondaires (métamorphisme, recristallisation) sur la signature isotopique en calcium des carbonates archéens.

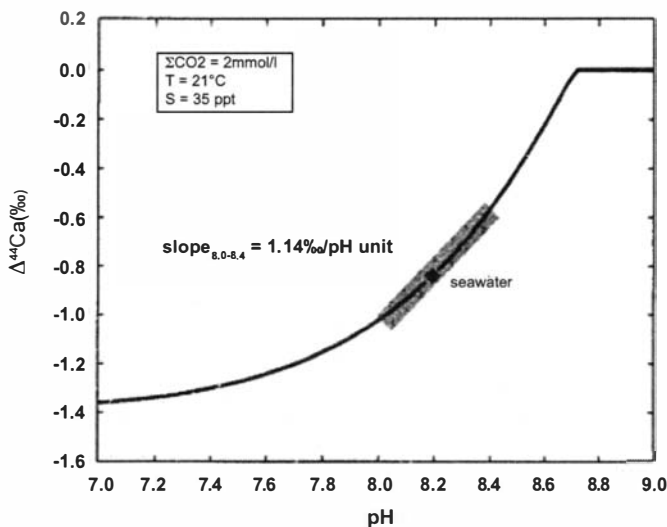


Fig. CPTP2 : Dépendance théorique des fractionnements isotopiques du calcium au pH, fondée sur les résultats de Lemarchand *et al.* (2004)

### La composition des océans archéens

Une façon de mesurer la température et la composition des océans archéens serait de pouvoir mesurer directement des fluides de cette époque. Cette possibilité est offerte par les inclusions fluides de sédiments archéens peu métamorphisés, à condition de s'assurer que de telles inclusions (1) sont primaires et (2) n'ont pas

échangé avec l'extérieur depuis cette époque. De tels échantillons sont bien évidemment rares, mais existent sans doute. L'équipe de P. Phillipot à l'IPGP a en effet caractérisé des inclusions fluides dans des quartz de remplissage de sédiments et de basaltes océaniques archéens échantillonnés à North Pole, Pilbara, Australie. Le quartz a du

crystalliser peu après la mise en place des basaltes de façon à conserver les structures vacuolaires primaires et les caractéristiques morphologiques des inclusions fluides suggèrent fortement que ces dernières sont primaires. La composition des fluides occlus, analysée par XRF et Raman, montre que les fluides sont un mélange entre un pôle de type eau de mer pauvre en métaux et un pôle de type hydrothermal (Foriel *et al.*, 2004). Grâce à une collaboration (co-encadrement de la thèse de M. Pujol, contrat ANR) avec l'équipe de Paris, nous disposons d'un échantillonnage couvrant divers états de mélange de fluides et permettant en principe de remonter aux compositions des termes purs. Notre approche est de mesurer les abondances des gaz rares dans les inclusions fluides par écrasement sous vide, les abondances relatives des gaz rares dissous dans l'eau étant une fonction de la température et de la salinité. De plus, les gaz rares comportent

des compositions isotopiques importantes pour caractériser les échanges manteau-surface au cours du temps. Peu de données existent sur les roches archéennes, empêchant la comparaison avec l'atmosphère actuelle. L'extraction par broyage sous vide permet de s'affranchir de l'effet d'âge (ajout d'isotopes produits naturellement depuis la formation des roches). Nos premiers essais, en ce qui concerne le xénon, montrent une composition isotopique dans les inclusions fluides très différente de l'atmosphère actuelle, avec un pôle mantellique (excès de  $^{129}\text{Xe}$  et  $^{136}\text{Xe}$  dans le même rapport que les MORB actuels) déjà mis en évidence dans des cherts de la même région (Pinti *et al.*, 2001) et de forts excès en  $^{128}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$  et  $^{132}\text{Xe}$  dont certains dus à des effets nucléaires sur des éléments lourds (Ba, Te). Ces premiers résultats ouvrent la porte à la détermination des paléo-abondances de certains éléments traces, ainsi qu'à une approche géochronologique.

### LES ULTRA-MICROSPHÉRULES COSMIQUES ET LES EXTINCTIONS

L'étude des apports extraterrestres au cours de l'histoire de la Terre a connu des développements très importants ces dernières années. C'est notamment le cas pour la découverte des micrométéorites, leur étude et la mise en évidence de l'importance des flux de matière correspondant au cours de l'histoire précoce de la Terre (les micrométéorites pourraient être une source essentielle de matière carbonée pour la Terre archéenne). C'est aussi, bien sûr, le cas pour la reconnaissance grandissante du rôle des impacts dans l'évolution géologique de la Terre, lors de l'accrétion de la Terre mais aussi lors du bombardement tardif dont la surface lunaire a gardé toutes les traces. La relation entre impacts et extinctions de masse est un autre domaine qui a été révolutionné ces dernières années à la suite de la découverte du cratère de Chicxulub dans la province de Yucatan à la limite K/T.

Notre projet s'intéresse à la limite Permien/Trias pour laquelle aucun impact majeur n'a été identifié mais qui correspond à une extinction biotique majeure (disparition de 75% des genres animaux en domaine marin), un événement catastrophique global dont le mécanisme reste controversé. Grâce au développement de techniques de séparation originales, nous avons pu au cours des dernières années identifier et séparer des ultra-

microsphérules (détail micrométrique, Fig. CPTP3 ci-dessous) dans les roches sédimentaires. Cette technique appliquée à la transition P/T a permis de découvrir une concentration apparemment exceptionnelle d'ultra-microsphérules dans un mince niveau marneux marquant la rupture entre les faciès permien et triasiques des séries marines théthysiennes de Hongrie (montagnes de Bukk). Ces ultra-microsphérules sont inférieures à 20 micromètres avec un mode à 3 micromètres. Leur composition minéralogique varie entre les pôles «oxydes de fer» et «phase vitreuse silicatée ferro-alumino-calcique». Notre échantillonnage porte sur une tranche décimétrique bien définie

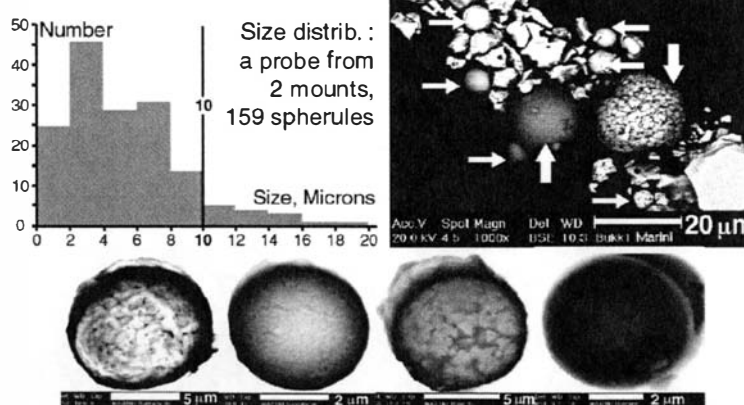


Fig. CPTP3 : Ultra-microsphérules de la limite Permien-Trias, dans les séries marines de Hongrie. En haut : mesures granulométriques. A droite : un exemple de concentré (les flèches pointent vers les ultramicrosphérules). La rangée du bas montre quelques exemples d'individus isolés, de composition variable, montés sur Indium. Toutes les vues sont prises en électrons rétrodiffusés (BSE). Un léger flou est inévitable en BSE sous de tels grossissements.



de part et d'autre du niveau porteur qui lui est centimétrique. C'est tout l'intérêt des ultra-microsphérules qui semblent être des marqueurs très puissants des apports extra-terrestres et qui permettent de localiser ces événements dans les séries sédimentaires avec une précision bien meilleure que les analyses d'iridium par exemple.

Nos travaux consisteront à (i) rechercher des traces des apports extra-terrestres sur tout le profil et à comparer des «indicateurs classiques» tels que les concentrations en iridium ou les compositions isotopiques de l'hélium avec les indications données par les ultra-microsphérules, (ii) quantifier les concentrations en ultra-microsphérules dans toute la série avant et après le niveau repère pour démontrer le

caractère exceptionnel de cette concentration, (iii) rechercher par analyse *in-situ* (sondes ioniques ims 1270 à Nancy et Nanosims 50 à Paris) des marqueurs isotopiques d'une origine extra-terrestre comme par exemple des compositions isotopiques de l'oxygène traçant l'évaporation dans la haute atmosphère et (iv) à rechercher, toujours par sonde ionique, des anomalies isotopiques traçant la présence de poussière interstellaire, le passage du système solaire dans un nuage de poussière interstellaire à la limite P/T étant une hypothèse qui pourrait être testée grâce à ce niveau d'ultra-microsphérules puisque leur présence localise avec une grande précision où des grains interstellaires micrométriques doivent être cherchés dans toute la série sédimentaire.

# MAGMAS ET FLUIDES PROFONDS

**Animateurs : François Faure et Etienne Deloule**

Ce thème a pour objectif de fédérer les actions conduites au CRPG autour des transferts de matière en liaison avec les processus magmatiques et les fluides profonds. Notre approche, géochimique et pétrologique, repose sur la quantification des flux entre les différentes enveloppes de la Terre et sur la détermination de leur cinétique. Nous nous limitons à quelques chantiers permettant d'aborder ces transferts sous quelques aspects spécifiques (fusion partielle, transferts magmatiques, hétérogénéités isotopiques, cristallisation et genèse d'anomalies géochimiques d'intérêt économique) et à différentes échelles (de celle de l'atome pour la diffusion de l'He à celle du minéral pour les textures et à l'échelle globale pour les flux de matière).

## TRAÇAGE ET CINÉTIQUE DES PROCESSUS MAGMATIQUES

*Chercheurs* : Pierre Barbey, Pete Burnard, Françoise Chalot-Prat, François Faure, David Jousselin, Béatrice Luais, Bernard Marty, Laurie Reisberg.

*Collaborations* : R. Clocchiatti (CEA Saclay), P. Schiano (Clermont), P. Bachèlery (La Réunion), G. Gleizes, Y. Denele et M. Toplis (Toulouse), D. Gasquet (Chambéry), F. Bussy (Lausanne), D. Graham (Oregon State Univ.), K. Farley (Cal. Tech.), M. Norman, (Tasmanie), D.H. Green (Canberra), M. Godard et D. Bosch (Montpellier)

*Doctorants* : A. Colin, B. Welsch.

*Financement* : ANR MIME «programme blanc» 2007, région (demande en cours), RSES ANU, SEDIT 2007, projet SEDIT soumis, Bourse ministère.

## TEXTURES ET TRAÇAGE DES PROCESSUS MAGMATIQUES

L'objectif est de comprendre les processus se produisant, à différentes échelles, à la transition liquide/solide. L'utilisation de l'outil «texture» s'est révélée à cet égard particulièrement efficace pour apporter des contraintes sur la cinétique des processus magmatiques. Notre approche est (i) d'aborder par l'expérimentation le problème de la signification des textures et de leur utilisation comme indicateur quantitatif (nucléation, croissance, morphologie cristalline, etc...) et (ii) de les utiliser comme traceur pétrogénétique sur des cibles naturelles (litage magmatique, distribution et évolution des liquides, etc...).

### ***Nucléation, croissance, morphologie cristalline et diagrammes de phases métastables***

L'interprétation des textures repose sur l'étude des morphologies minérales, de la distribution en taille des cristaux (CSD) et des relations de phases à l'équilibre et hors d'équilibre (diagramme de phases). Cependant, le développement d'un tel outil vers une quantification de plus en plus précise de la cinétique implique à la fois des études expérimentales et la confrontation de ces résultats avec les observations effectuées sur des systèmes naturels. D'un point de vue expérimental, plusieurs chantiers seront menés:

(i) quantifier le rôle crucial joué par la nucléation et, en particulier, son retard sur la cristallisation des roches magmatiques ;

(ii) déterminer la vitesse et les mécanismes de croissance des différentes faces cristallines des minéraux cardinaux des roches magmatiques ;

(iii) établir les champs de stabilité des différentes morphologies cristallines en fonction des vitesses de refroidissement et du degré de surfusion.

L'objectif est d'établir une relation entre ces différents paramètres qui traduisent tous l'état de déséquilibre chimique qui règne au moment de la cristallisation du magma. Cependant, une telle relation nécessite de disposer de diagrammes de phases métastables, travail expérimental complexe mais fondamental qui reste à accomplir.

### ***Distribution et évolution du liquide magmatique sous le Moho océanique***

Dans un contexte où les premières données géophysiques sur la limite manteau-croûte sous la dorsale Est-Pacifique changent radicalement notre compréhension du dynamisme des dorsales (Toomey *et al.*, 2007), l'observation de la zone de transition manteau-croûte dans les ophiolites est

une nécessité pour valider de nouveaux modèles de dorsale. L'étude de la zone de transition du Moho dans l'ophiolite d'Oman a déjà conduit à la reconnaissance de zones de circulation de liquide. Notre but sera d'y comprendre la formation de lentilles de gabbros lités. Un affleurement

exceptionnel dans le massif de Semail, encore non décrit, montre une évolution progressive entre des dunites non déformées et imprégnées de plagioclase et des gabbros au litage grossier, où la dunite encaissante est faiblement déformée. Une attention particulière sera portée sur l'évolution des textures, les variations de proportion modale,

de fabrication de forme des poches de plagioclase et de la fabrication de réseau de l'olivine du manteau encaissant ou des lits riches en olivine au sein des gabbros. Cela permettra de mieux comprendre les processus d'accumulation de magma à l'interface lithosphère-asthénosphère et leur rôle dans le dynamisme des dorsales rapides.

### **Litage magmatique et textures réactionnelles dans les granites**

Nous avons obtenus quelques résultats intéressants tant sur la cinétique des réactions ayant lieu à la transition solide/liquide dans la croûte continentale (Barbey, 2007) que sur la nature des processus impliqués lors de la mise en place des plutons granitiques (e.g. Pons *et al.*, 2007). Nous poursuivrons ces approches selon deux directions. Il s'agit, d'une part, d'utiliser les textures réactionnelles et la cinétique qu'elles reflètent comme marqueur de la durée de certains processus tels que la mise en place d'un dôme anatectique. En utilisant les textures particulières de la cordiérite nous voulons, sur l'exemple du Velay, tenter d'estimer les temps de formation du dôme. Il s'agit, d'autre part, de comprendre la genèse du litage magmatique dans les granites. A partir de la caractérisation des structures du litage magmatique ainsi que des microtextures

et de la zonation chimique des minéraux, nous avons déterminé quel rôle spécifique jouait la cristallisation fractionnée, les mouvements relatifs liquides-cristaux et la déformation dans la formation des plutons granitiques. Nous avons, par ailleurs, montré quel était le rôle des magmas basiques, d'une part sur la formation des litages magmatiques et, d'autre part, sur le fonctionnement d'une chambre magmatique acide. Une partie de ces résultats est encore en cours de publication. Notre objectif est maintenant d'appréhender les litages magmatiques dans une vue synthétique – en insistant plus sur le rôle de la déformation – en montrant comment ils reflètent des processus impliqués dans la genèse des plutons et dômes anatectiques (fusion partielle, cristallisation fractionnée, agrégation et mélange de magmas, déformation).

## **TRANSFERT ET HÉTÉROGÉNÉITÉS MANTELLIQUES**

Les mouvements de convection dans le manteau terrestre favorisent les transferts de matière du manteau inférieur vers le manteau supérieur et la surface. La quantification de ces processus de transferts peut être abordée par l'étude géochimique et isotopique comparée du magmatisme océanique intraplaque, l'expression en surface des points chauds et du magmatisme de ride. Les trois volets suivants seront abordés.

### ***Interaction ride-panache par l'étude de la région du «Galapagos Spreading Center» (GSC)***

Les données de bathymétrie, de géophysique, de pétrologie et de géochimie indiquent clairement une interaction entre ride et panache dans cette région. Cependant, les données isotopiques d'He mesurées tout au long des différents segments de la ride du GSC montrent des valeurs typiques

des MORB. Nous sommes en train d'analyser les isotopes de Ne et d'Ar dans les basaltes du GSC afin de vérifier si l'absence d'un signal isotopique du type panache est spécifique à l'He ou si cette absence concerne toutes les espèces volatiles.

### ***Études expérimentales de la répartition de l'He et de l'Ar***

Contre toute attente, des résultats récents (Parman *et al.*, 2005; Watson *et al.*, 2007) suggèrent que l'He est plus compatible que l'uranium lors de la fusion partielle du manteau, ce qui a des implications fortes pour l'interprétation des données  $^3\text{He}/^4\text{He}$  des basaltes. Nous effectuons de nouvelles expériences avec des olivines dopées en He-4, puis irradiées avec des protons afin de produire l'He-3 dans la matrice de l'olivine. L'extraction par paliers de température de l'He de ces olivines «dopées – irradiées» devrait séparer l'He dissous dans la matrice d'une façon homogène et correspondant à la vraie solubilité

de l'He dans l'olivine, de celui qui est piégé dans des inclusions/défauts. Nous entamons une autre étude expérimentale afin de déterminer les solubilités de l'He et de l'Ar dans les liquides carbonatés. Le fractionnement observé des gaz rares par rapport aux éléments en traces lithophiles (Pb, Sr, Nd...) a été parfois attribué à la fusion des carbonates. Cependant, les solubilités de l'Ar et de l'He dans des liquides carbonatés sont très mal connues. Nous sommes en train de mesurer les solubilités de ces éléments dans des carbonates fondus de Ca et de Mg à haute température (800-1100°C) sous flux de  $\text{CO}_2$ .

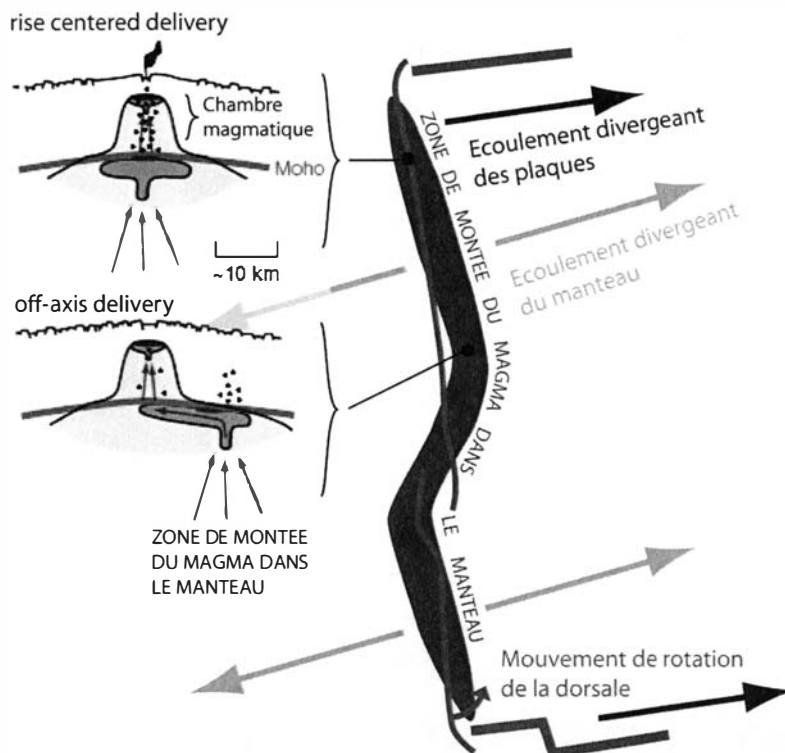
## Flux de matière noyau-manteau

La détermination de la composition du manteau inférieur peut être modifiée par des flux de matière (éléments sidérophiles) du noyau vers le manteau inférieur sous des conditions oxydantes (Jones et Drake, 1986). Cette problématique sera abordée par l'étude élémentaire et isotopique du germanium. Cet élément moyennement sidérophile peut être un traceur des mécanismes de transferts chimiques noyau-manteau pour les trois raisons suivantes: (i) Ge est un des éléments-clés des météorites de fer, représentatives du noyau, et dont la composition isotopique est bien déterminée; (ii) le rapport élémentaire Ge/Si est un traceur des hétérogénéités mantelliques et de la profondeur de fusion des basaltes océaniques

(De Argollo et Schilling, 1978a, b); et (iii) les fractionnements élémentaire et isotopique de Ge entre phase métal et silicate seraient contrôlés par la fugacité d'oxygène. Les basaltes océaniques d'origine profonde devraient enregistrer ces fractionnements à l'interface noyau-manteau. Une étude particulière sera focalisée sur Hawaï où ce transfert de matière a été mis en évidence par le système Re-Pt-Os (Brandon *et al.*, 1998, 1999), alors qu'il n'a pas été identifié par le système isotopique Hf-W (Shersten *et al.*, 2004). Des analyses isotopiques du Ge seront effectuées sur les basaltes océaniques d'origine plus superficiels ainsi sur les MORB, où ce signal isotopique en Ge du noyau devrait être absent.

## LE MAGMATISME SOUS LES DORSALES

La genèse de basaltes aux rides médio-océaniques à partir de péridotites mantelliques est l'un des processus de premier ordre de la différenciation chimique de la Terre. De récents résultats modifient notre compréhension de ce processus de genèse. A l'axe des dorsales, le manteau océanique apparaît fortement métasomatisé par des liquides de type MORB (Piccardo *et al.*, 2006), et les basaltes émis correspondent plus souvent à des liquides différenciés qu'à des liquides dits primitifs. En sus, à l'axe des dorsales rapides



actuelles, la géophysique montre que, sur près de 50% de la longueur d'un segment de dorsale, le magma arrive à plus de 5 km à l'écart de la dorsale (Toomey *et al.*, 2007). Ces variations de distance entre la zone d'arrivée du magma et l'apex de la ride pourraient conditionner non seulement la fréquence des éruptions mais aussi la composition des basaltes et gabbros (Fig.MFP1 ci-contre). Ces résultats posent plusieurs questions et ouvrent des perspectives originales de recherche:

(i) quelle est la composition du basalte en équilibre avec le manteau à des pressions inférieures à 1GPa ?

(ii) quelle est la nature des interactions entre le magma et la roche encaissante dans un contexte éloigné de la dorsale ?

(iii) quels sont les mécanismes et les effets du dégazage des liquides basaltiques lors de ces parcours plus ou moins rapides jusqu'à l'éruption?

Fig.MFP1. La première image d'une tranche de manteau, à 8 Km de

profondeur sous la dorsale Est-Pacifique (Toomey *et al.*, 2007) révèle que les zones riches en magma ne sont pas toujours exactement à l'aplomb de la dorsale, comme on le croit, mais peuvent s'en écarter de plus de 10 Km. Là où les zones riches en magma se trouvent sous la dorsale, les éruptions volcaniques sont plus fréquentes et les phénomènes hydrothermaux plus vigoureux. Quand le magma arrive sous le Moho à distance de l'axe, celui-ci peut se dégazer et se différencier avant de nourrir la chambre magmatique; les éruptions volcaniques sont alors peu nombreuses, et l'activité hydrothermale est réduite. Les variations de l'activité de la ride ne sont donc pas due à des variation du taux d'alimentation en magma, mais au trajet suivi par le magma.

### **Expérimentation sur la genèse des MORB à basse pression**

Selon les concepts actuels, les MORB correspondent plus rarement à des liquides «primitifs» qu'à des liquides «différenciés». Ces derniers pourraient être formés par percolation/réaction de liquides primitifs avec le manteau traversé à basse pression avant éruption, et/ou par fusion partielle du manteau par décompression adiabatique à faible profondeur (<1 GPa). Ces hypothèses sont testées dans un projet de pétrologie expérimentale (en cours depuis 2005) destiné à établir, pour des pressions

de 7.5kb, 5kb et 3.5kb, la composition des liquides en équilibre avec une lherzolite mantellique à 5 phases (plag/ol/opx/cpx/sp) et la gamme des températures correspondantes. Les données obtenues conduisent à la construction d'une grille de référence P-T-X permettant de repérer non seulement les compositions de liquides mais aussi des sources et résidus mantelliques provenant aussi bien des océans actuels qu'anciens. Ces 3 paramètres sont des contraintes majeures pour comprendre la dynamique mantellique.

### **Distribution et évolution du magma basaltique sous le Moho océanique**

L'étude de la zone de transition du Moho dans l'ophiolite d'Oman a conduit à la reconnaissance de zones de circulation de liquide. En nous basant sur cette reconnaissance, nous avons identifié deux sites du massif de Semail permettant d'étudier en détail la circulation, l'évolution et le stockage de magma dans le manteau superficiel. Dans la première région (Mahram), le manteau superficiel est riche en plagioclase et en lentilles de gabbro lité. Ce site est identifié comme étant sous-jacent à la paléo-ride d'Oman. La deuxième

région (Mansah) est interprétée comme étant éloignée de l'axe (Jousselin et Nicolas, 2000). Le manteau de Mansah est pauvre en plagioclase et en lentilles de gabbro, mais très riche en pyroxénite. Nous proposons donc d'étudier les compositions en éléments traces et les isotopes radiogéniques (Sr,Nd,Pb,Os) pour comparer la source des magmas d'une zone à l'autre et étudier les interactions possibles entre le magma et la roche encaissante.

### **Les mécanismes et effets du dégazage des magmas sous les dorsales**

Le dégazage des magmas lors de leur transport au travers de la croûte océanique donne lieu à une modification de leurs teneurs en éléments volatils. De ce fait, il n'est possible d'estimer, ni les concentrations, ni le comportement de ces éléments dans le manteau convectif à partir de leurs teneurs dans des MORB. Heureusement, la différence de solubilité entre les gaz rares (He, Ne, et Ar) et le CO<sub>2</sub> dans les liquides silicatés entraîne un fractionnement entre ces espèces volatiles, ce qui nous permet de tracer et de quantifier ce dégazage. La composition en volatils (He, Ar, Ne, N, CO<sub>2</sub>) de chaque vésicule d'un basalte donné enregistre l'état du dégazage lors de sa formation, ce qui entraîne une gamme de composition très variée à l'échelle d'un seul échantillon. Nous disposons de nouveaux équipements (laser Excimer) pour effectuer une analyse bulle par bulle. Une vingtaine de bulles par échantillon de verre sera analysée pour bien définir la tendance de dégazage pour chaque basalte. Une fois cette

tendance bien définie, la composition en éléments volatils du liquide parental sera calculée. Par ailleurs, les teneurs en Re, l'élément père du couple radiogénique Re-Os, risquent aussi d'être perturbées par le dégazage sous les dorsales. Il a été démontré (Lassiter, 2003) que la forte volatilité du Re explique la différence importante entre les teneurs en Re des MORB qui sont mis en place dans un contexte sous-marin, et celles des îles océaniques qui perdent du Re lors de leur éruption subaérienne. Pourtant l'éventuelle perte du Re lors du dégazage des MORB n'a jamais été étudiée. Nous projetons d'investiguer cette possibilité en analysant une série de MORB de la ride sud-est indienne dont les taux de dégazage sont déjà bien établis à partir des analyses des gaz rares (Burnard *et al.*, 2002, 2004). Les résultats serviront à clarifier le comportement du Re lors de la fusion partielle du manteau, ainsi que le flux éventuel du Re vers l'océan lors du dégazage des magmas basaltiques.

## **TRANSFERTS MANTEAU-CROÛTE ET FLUX DANS LA LITHOSPHERE**

Ce sous-thème concerne l'étude des transferts de fluides et de magmas au sein de la lithosphère mais aussi entre lithosphère et manteau supérieur, en contexte de convergence. Les questions majeures identifiées dans les différents projets sont :

(i) quels sont les transferts de fluides intervenant dans une zone de subduction océanique actuelle et leurs interactions avec la structuration, la fracturation et la sismogénèse de cette zone?

(ii) quels sont les transferts de magmas se produisant au cours de l'évolution d'une marge active sur plusieurs centaines de millions d'années et comment peut-on s'en servir pour reconstituer la déformation de la plaque chevauchante?

(iii) comment se font les transferts d'eau dans la lithosphère ; est il possible de déterminer la composition et l'âge des flux et le comportement de l'eau lors des processus magmatiques et métamorphiques ?

(iv) quelle est la mobilité à différentes échelles des REE et des HFSE lors du métamorphisme associé à la circulation d'une phase fluide ?

*Chercheurs* : Sylvain Bourlange, Françoise Chalot-Prat, Stéphanie Duchêne, Etienne Deloule, Béatrice Luais

*Collaborations* : P. Henry (Aix-en-Provence), S. Lallemand et L. Louis (Cergy-Pontoise), T. McCann (Germany), A. Saintot (Trondheim), R. Stephenson et J. Wijbrans (Amsterdam), V. Starostenko (Kiev), A Seghedi (Roumanie), N Pravikova (Moscow), N. Metrich (CEA Saclay), C. Wagner (UPMC), QunKe Xia (Hefei), XiaoZhi Yang (USTC), F. Brunet (ENS Paris), D. Marquer et P. Goncalves (Besançon)

*Doctorants* : A.S. Bouvier, C. Martin

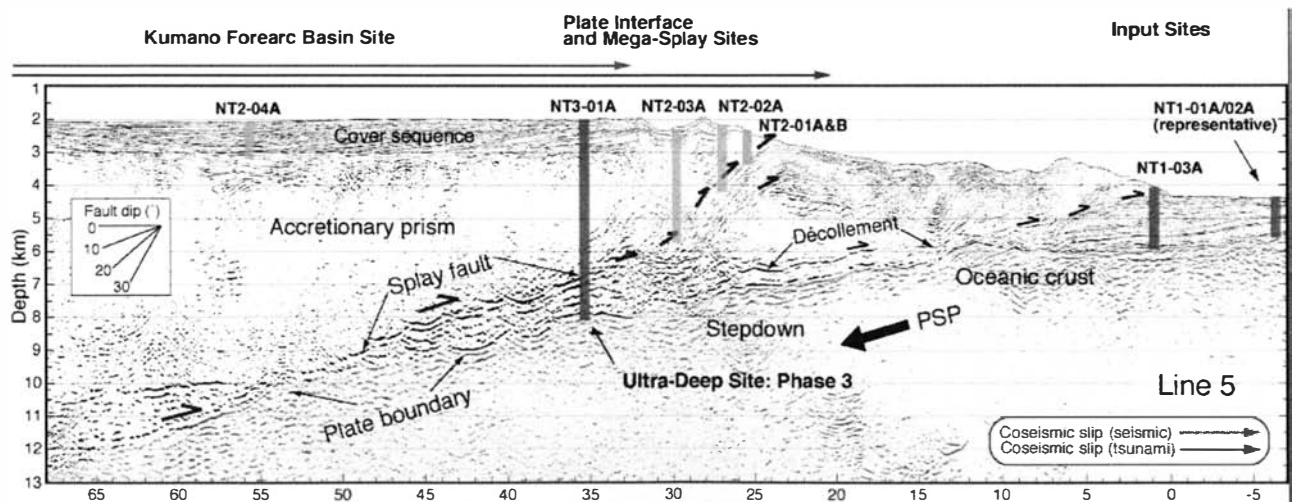
*Financement* : NanTroSEIZE (3F, INSU), demande de financement sur appel d'offre 2008 Eurocores Programme/TOPO Europe, Financement 3f (2007-2008), ANR Antilles et Mime et projet de coopération franco-chinois (PRA)

### TRANSFERTS DE FLUIDES, FRACTURATION ET SISMOGÈNESE DANS LES ZONES DE SUBDUCTION

La zone de subduction de Nankai au Japon est une des zones sismiques les plus actives au monde et une des zones de subduction les mieux étudiées. Les derniers grands séismes ayant affectés cette zone sont ceux de Tonankai (M=8.1) en 1944 et de Nankaido (M=8.3) en 1946. Cette zone de subduction est le chantier d'étude du programme international NanTroSEIZE dans

le cadre du programme IODP (Fig.MFP2, ci-dessous). Il s'agit d'un projet d'étude intégrée de la zone de subduction, incluant le forage, l'échantillonnage et la mise en place d'un observatoire instrumental de la zone sismogénique de la limite de plaque. Les enjeux scientifiques sont de comprendre les mécanismes à l'origine des structures géologiques de cette limite de

*Fig.MFP2. Coupe sismique et localisation des sites de forage du programme IODP NanTroSEIZE de forages multiples de la zone de subduction de Nankai. Les grandes failles de cette zone de subduction et la zone sismogénique vont ainsi faire l'objet de carottage, de diagrapie et d'instrumentation dans les 5 années à venir.*



plaque ainsi que leur évolution temporelle, en rapport avec le déclenchement des tremblements de terre. Dans le cadre de la participation au projet NanTroSEIZE, nous envisageons d'étudier plus précisément le rôle des fluides en essayant de mieux identifier les interactions entre les transferts de fluides, fracturation et sismogénèse. Nous proposons de réaliser une étude fine de

la structure et des modes de déformations des matériaux affectés par la zone de subduction, ainsi qu'une caractérisation des surpressions de fluides en présence dans le système ainsi que des flux en présence. L'objectif étant de mieux cerner comment déformations et circulations de fluides agissent de concert au cours du cycle sismique dans cette zone sismogénique.

## MAGMATISME ET ÉVOLUTION MORPHO-TECTONIQUE À LONG TERME D'UNE MARGE ACTIVE

La marge méridionale de la Plate-Forme Est-Européenne et la région de la Mer Noire ont constitué pendant 300 Ma (Dévonien-Carbonifère) le front d'une zone de convergence de plaques par subduction vers le Nord de la Téthys. L'objectif de ce projet géologique et géophysique est d'élucider le mode de fonctionnement d'une marge active sur une durée de plusieurs centaines de millions d'années : a-t-elle évolué, comme classiquement invoqué, par accrétion continue de terrains en front de marge et chevauchements successifs vers le sud des panneaux subductés, ou plutôt par ouvertures et fermetures répétées de bassins d'arrière-arc à l'arrière d'une zone de subduction océanique majeure et pérenne ? Cette dernière hypothèse suppose la réactivation tectonique à

de multiples reprises de sutures lithosphériques, laquelle s'est accompagnée de nombreux changements topographiques et effets associés (érosion et climats). Les magmas produits, crustaux ou mantelliques, intrusifs ou extrusifs, tout au long de cette évolution sont indicateurs de la composition des zones sollicitées dans la lithosphère continentale ou le manteau sous-jacent mais aussi du comportement rhéologique des niveaux traversés lors de leur mise en place. Intégrées à l'étude tectono-sédimentaire des bassins, les analyses géochimique et isotopique des roches magmatiques et leur datation constituent un excellent traceur de l'évolution de la déformation de la plaque chevauchante.

## FLUX D'ÉLÉMENTS ET COMPORTEMENT DE L'EAU DANS LA LITHOSPHERE CONTINENTALE

L'étude du comportement de l'eau à l'interface manteau-croûte, de sa distribution entre les différentes phases minérales lors des processus magmatiques ou métamorphiques est indispensable pour définir les flux dans la lithosphère. Pour ce faire, il faut d'une part définir les quantités d'éléments susceptibles d'avoir bougé, en mesurant les teneurs en eau, éléments légers et éléments traces, ainsi que leur composition isotopique pour tracer les sources et/ou les processus, dans des échantillons représentatifs des processus à l'interface. Il faut, d'autre part, dater les échantillons et si possible les processus pour pouvoir intégrer dans le temps

les transferts entre réservoirs. Pour réaliser ce projet, nous voulons développer les datations Rb-Sr et K-Ca *in-situ* par microsonde ionique, en faisant l'acquisition d'une microsonde ionique à très haute résolution de masse (> 30 000), qui pourra être installée au CRPG en 2009-2010. Les échantillons destinés à l'étude sont des xénolithes et/ou xénocristaux de granulites de la croûte inférieure et de péridotites du manteau supérieur. Les mesures portent sur les teneurs en eau et éléments traces et les compositions isotopiques sur des minéraux nominalement anhydres par microsonde ionique et des inclusions vitreuses de xénocristaux du manteau.

## MOBILITÉ DES REE ET DES HFSE PAR LES FLUIDES

Le but de cette étude est de mettre en évidence la mobilité à différentes échelles des REE et des HFSE lors du métamorphisme. Est-ce que la mobilité différentielle lors du métamorphisme en présence de fluides carbonatés ou salins peut induire des découplages isotopiques des systèmes Nd et Hf depuis l'échelle de l'affleurement jusqu'à l'échelle crustale ? De même cette mobilité à l'échelle de l'échantillon contrôle-t-elle le fonctionnement des chronomètres Sm-Nd et Lu-Hf et donc la signification relative des âges

métamorphiques sur minéraux séparés ?

Ce projet s'appuie sur deux exemples : métamorphisme HP/BT en contexte de subduction continentale des Calédonides de Norvège et skarn du Quérigut (Pyrénées) pour étudier le transfert des REE en milieu carbonaté. Les approches utilisées sont la réalisation de bilans élémentaires et isotopiques lors du métamorphisme et l'étude expérimentale de la solubilité des REE et des HFSE en conditions métamorphiques.

## TRAÇAGE ISOTOPIQUE ET DATATION DES MINÉRALISATIONS

Toute concentration minérale représentée dans la lithosphère une anomalie géochimique susceptible d'être exploitée rationnellement. La recherche fondamentale sur les ressources minérales a donc une importance capitale car elle permet d'établir des modèles prédictifs qui ciblent la prospection et l'orientation de l'inventaire minéral. Des enjeux de société et des défis scientifiques majeurs apparaissent et s'agissant des métaux associés aux gisements magmatiques s.l., des questions fondamentales peuvent être abordées par l'étude des compositions isotopiques des minéralisations. Ces questions concernent à la fois la datation et la détermination des sources des gisements. La datation peut être effectuée soit sur les minéralisations

elles-mêmes par la méthode Re/Os, soit sur les minéraux accessoires piégés dans les métaux ou les minéraux porteurs par les méthodes U/Pb, Sm/Nd. Le traçage isotopique des métaux et éventuellement des inclusions magmatiques par les isotopes stables (O-H-S) ainsi que par les isotopes radiogéniques (Os, Pb) permettent de définir les sources et les affiliations magmatiques des minéralisations. Il est notamment possible d'estimer les apports relatifs des sources mantelliques et crustales.

L'approche du CRPG pour aborder ces questions est très spécifique, la recherche s'appuyant sur les équipements du centre, notamment la sonde ionique et les laboratoires d'isotopes stables et radiogéniques qui permettent d'apporter des éléments de réponse aux travaux de terrain réalisés par ses chercheurs. Le sous-thème « Traçage isotopique et datation des minéralisations » mérite pleinement son affichage dans le thème Magma et Fluides profonds dans le cadre du quadriennal 2008-2011, dans la mesure où les sujets abordés reposent sur les transferts de magmas et leur interaction avec l'encaissant. Il se compose de deux chantiers : (i) un chantier « métaux » en liaison étroite avec les processus magmatiques et (ii) un chantier « gemmes » plus orienté vers les interactions entre magma et croûte continentale.

*Chercheurs* : Pierre Barbey, Guillaume Caumon, Alain Cheilletz, Etienne Deloule, Gaston Giuliani, Daniel Ohnenstetter, Maryse Ohnenstetter, Laurie Reisberg, Jean-Jacques Royer

*Collaborations* : D. Bois et M. Jébrak (Canada), D. Gasquet (Chambéry), E. Gonzalez, G. Levresse (Mexique), A. Mouttaqi (Maroc), J.L. Paquette (Clermont) M.C. Boiron, A-S. André, J. Leroy, J. Dubessy et M. Cuney (G2R), N. Arndt (Grenoble), D. Rakotomanana (Madagascar), F. Poitrasson (Toulouse), A.E. Fallick (Glasgow), M. Rakotondrazafy (Antananarivo)

*Doctorants et stagiaires* : O. Rabeau (cotutelle INPL/UQAM-Montréal), S. Rakotosamizanany (Université d'Antananarivo, IRD, CRPG/CNRS), A. Ratefiarimino (stagiaire PGRM Madagascar)

*Financement* : DIVEX (Réseau pour la diversification de l'exploration minérale au Québec); Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec, accord de coopération scientifique avec l'ONHYM, allocation de thèse, IRD, SUERC, ANR blanc pour 2008 ou autre spécifique sur l'Afrique.

## LES MÉTAUX

### **Identification des mécanismes de contrôle des flux de matière dans la lithosphère continentale au moyen de l'étude des concentrations métallifères**

Nous nous intéressons aux gisements de métaux précieux (Ag-Au) sur trois exemples : Anti-Atlas marocain, ceinture centrale Mexicaine et Abitibi. Dans le premier cas l'objectif est de déterminer le rôle des multiples réservoirs de la lithosphère continentale à l'origine du stock métal concentré, dans le cadre de l'évolution tardi-panafricaine de la marge continentale Anti-atlasique (Gasquet *et al.*, 2005). Nos travaux ont permis d'établir l'âge et la source de la minéralisation (Cheilletz *et al.*, 2002; Levresse *et al.*, 2003). Au Mexique, nos premiers résultats montrent pour la première fois l'implication d'un magmatisme de type adakitique dans la genèse

des minéralisations Au-Fe de type skarn. Notre objectif est notamment la ré-interprétation des modèles génétiques de certains gisements de type VMS (Francisco y Madero) ou Skarn (Charcas). L'établissement de nouveaux modèles métallogéniques permet de produire, en partenariat avec les entreprises concernées, des guides d'exploration extrêmement efficaces aux échelles tactiques et stratégiques. Enfin, sur l'exemple de la ceinture volcano-sédimentaire archéenne de l'Abitibi, notre objectif est de quantifier les transferts à partir de la modélisation géométrique et numérique des corps minéralisés.

### **Datation, traçage des sources et contexte des minéralisations de la bordure NW du craton Ouest africain (Sahara marocain)**

Le contexte géologique du sud marocain consiste en un domaine archéen, prolongation occidentale de la Dorsale Reguibat, et un domaine néoprotérozoïque repris à l'Hercynien (Mauritanides). De nature essentiellement calco-alcaline/sub-alcaline pour la partie panafricaine, le magmatisme s'accompagne de minéralisations de typologie variées : stratiformes VMS, épithermal, remplacement (Barodi *et al.*, 2002 ; Levresse *et al.*, 2004). Les premières phases d'exploration du Sahara marocain ont mis en évidence de nouvelles cibles, notamment : magmatisme alcalin (carbonatites), magmatisme anorthositique

(gabbros, anorthosites). Il apparaît donc un enjeu économique en raison des ressources potentiellement associées à ces roches (Cu, Au, Ti, REE, Nb). En amont de cet intérêt économique se situent deux enjeux scientifiques : (i) la genèse et l'évolution des minéralisations dans les contextes polyphasés (datation, traçage des sources, etc.), et (ii) la signification de ces différents magmatismes sur l'évolution géodynamique de la bordure NW du craton ouest-africain qui reste à ce jour mal connue. L'expertise que nous avons acquise, d'une part, sur la datation des zircons hydrothermaux (Pelleter *et al.*, 2007) et



la méthode Ar et, d'autre part, sur le Panafricain et Hercynien de l'Anti-Atlas marocain (Gasquet *et al.*, 2005) et sur l'Archéen et le Paléoprotérozoïque de la Dorsale Reguibat (Barbey 1974, 1975 ;

Cuney *et al.*, 1975 ; Lahondère *et al.*, 2004), nous permettent d'aborder ce sujet dans les meilleures conditions.

### **Le système Re-Os : datation et traçage des sources des minéralisations**

Le couple radiogénique Re-Os est d'un intérêt particulier dans les investigations métallogéniques car il est le seul système isotopique qui permet la datation de la minéralisation elle-même, plutôt que celle des phases silicatées associées. En outre, en raison du contraste important de la composition isotopique de l'osmium entre la croûte continentale et le manteau, ce système est également un excellent traceur pour l'identification de la source des métaux dans les gisements. Au CRPG, les analyses Re-Os ont déjà été exploitées pour contraindre la source des métaux dans le

gisement géant d'argent d'Imiter, Maroc (Levresse *et al.*, 2004), et pour dater la minéralisation à Cuivre et or de l'intrusion de Bolcana, Roumanie (Cardon *et al.*, soumis). Grâce à sa souplesse, ce système sera un composant important de nombreuses études métallogéniques en cours ou prévues dans les années à venir, par exemple sur des projets concernant les gisements d'or et de chrome de Madagascar, et les minéralisations aurifères hercynienne en Europe. Ces études seront menées en collaboration étroite avec des chercheurs du G2R.

### **Transfert et dépôt des éléments du groupe du platine (EGP) et du chrome dans les chambres magmatiques**

Notre objectif est d'aborder l'origine des minéralisations en EGP sur les exemples du Bushveld et Andriamena. Les études géochimiques récentes entreprises dans le complexe du Bushveld invoquent l'injection d'un magma spécifique, contaminé par la croûte continentale, et porteur de la minéralisation platinifère, à l'origine du Merensky Reef (Arndt *et al.*, 2005). Cela contraste avec les précédents modèles qui envisageaient le mélange du magma résident après le dépôt de la plupart des ultramafites avec un autre magma (soit de composition semblable au magma parent des ultramafites du Bushveld, soit très évolué et issu de la cristallisation des ultramafites, soit alumineux, contaminé par la croûte et parent des leucogabbros de la zone principale reposant au-dessus du Merensky Reef). Les travaux préliminaires mettent en évidence un contraste lithologique et géochimique entre les assemblages interstitiels et les inclusions magmatiques associés à la minéralisation d'une part, et les phénocristaux et minéraux poecilitiques d'autre part, ces derniers montrant également des évolutions cryptiques contrastées en fonction de leur position stratigraphique dans l'unité. Tout ceci conforterait l'hypothèse de la

présence de magmas distincts lors du dépôt de la minéralisation platinifère. Notre objectif est donc de caractériser l'origine des assemblages pétrographiques (par différentes approches dont la sonde ionique) d'une section de l'unité du Merensky Reef, à Rustenburg, afin de décrypter la présence et l'origine de différents magmas, leur mode de mise en place et évolution dans une zone transitoire clef de la chambre magmatique du Bushveld.

Par ailleurs, le lien entre minéralisation chromifère et minéralisation en EGP existe aussi, d'une manière plus générale, dans les ophiolites et les complexes alaskéens. A Madagascar, des minéralisations platinifères ont été découvertes dans des intrusions supposées néoprotérozoïques, dont l'origine par rapport aux chromitites d'Andriamena, réputées archéennes, est problématique. Les études de terrain et pétrographiques sur les chromitites d'Andriamena montrant des variations significatives de la composition des chromitites, notre approche sera d'utiliser les méthodes Re/Os et Sm/Nd pour dater ces minéralisations et leur encaissant, déterminer l'origine des magmas parents et le type de complexe porteur.

## **LES GEMMES**

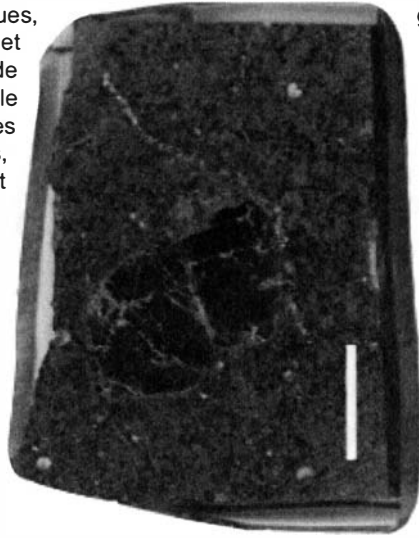
### **Les gisements de corindons gemmes associés aux basaltes alcalins**

L'objectif de la recherche est l'étude des saphirs et des rubis associés aux environnements basaltiques notamment de Madagascar, Tanzanie, Cameroun, Chine et Australie. Il s'agit d'étudier soit les gisements primaires de rubis et de saphirs associés aux basaltes (Fig.MFP3, page suivante), soit les placers liés au démantèlement de ces derniers. L'étude des caractéristiques chimiques,

minéralogiques et isotopiques de ces corindons ainsi que celles des basaltes va permettre de contribuer au débat international sur l'origine de ces cristaux (mécanismes de formation métamorphique, magmatique ou hybride). L'étude pétro-géochimique des xénolites et enclaves associés aux basaltes vont nous apporter des informations primordiales sur la nature de la

croûte profonde et du manteau infra-continental au Cénozoïque. Le couplage des données pétrographiques, géochimiques et radiométriques permettra de proposer un ou des modèle(s) de formation pour ces gisements. Par ailleurs, l'étude gemmologique et isotopique des différents types de saphirs et de

rubis nous permettra d'établir une carte d'identité minéralogique et isotopique pour chaque gisement avec une application certaine à la certification commerciale. Les chantiers sont répartis sur les différents continents: Afrique (Cameroun, Tanzanie, Nigéria, Madagascar), Asie (Chine, Vietnam, Australie), Europe (France), Amérique du sud (Colombie), Amérique du Nord (Etats-Unis)



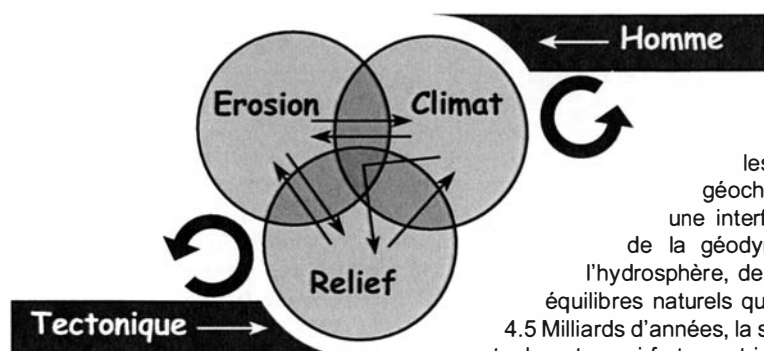
*Fig.MFP3. Xénocrystal de saphir bleu inclus dans un basalte alcalin du Changle (Chine). échelle : 1 cm de long*



# SURFACE DE NOTRE PLANÈTE

PROCESSUS NATURELS ET ANTHROPIQUES

Animateurs : Raphaël Pik et Jérôme Lavé



Ce thème de recherche se propose de fédérer les actions conduites au CRPG autour des processus qui affectent la surface de notre planète et qui, tout en modelant son évolution, ont pu contrôler les variations du climat et des grands cycles géochimiques. La surface de la Terre est en effet une interface complexe entre l'expression superficielle de la géodynamique interne et les cycles externes de l'hydrosphère, de l'atmosphère et de la biosphère. Au delà des équilibres naturels qui ont caractérisé son évolution depuis plus de 4.5 Milliards d'années, la surface de notre planète et notre environnement actuel sont aussi fortement influencés depuis quelques centaines d'années par l'activité de l'Homme et notamment son impact sur l'exportation des sols, la pollution de l'hydrosphère et le réchauffement du climat.

Cette interface, qui est matérialisée par le relief terrestre, a donc la particularité d'être à la fois le témoin privilégié et accessible des processus qui régissent la dynamique de notre planète, ainsi que le terrain de jeu de tous les acteurs de l'érosion et des processus superficiels naturels ou anthropiques. Notre démarche scientifique pour aborder l'étude de ces processus est basée sur notre expérience du développement et de l'utilisation de traceurs géochimiques, de l'observation et la modélisation des objets géologiques et des processus physiques associés. Ces recherches se feront en alliant l'expérience, l'expertise et la complémentarité de 14 chercheurs et enseignant-chercheurs (~ 10 ETP) dans les domaines de la géochimie, géochronologie, géologie structurale et sédimentaire, géomorphologie, et modélisation numérique.

Quatre axes de recherche sont distingués dans le document ci-après dans un souci de clarté et de synthèse. Ils sont bien sûr thématiquement extrêmement liés et interdépendants et seront souvent abordés conjointement par les différents acteurs de ce thème de recherche sur des chantiers phares de la surface du globe.

## TECTONIQUE, EXHUMATION ET ÉVOLUTION DES RELIEFS

*Chercheurs* : Stéphanie Duchêne, Mary Ford, Christian France-Lanord, Jérôme Lavé, Raphaël Pik

*Doctorants et post-doctorants* : Audrey Billerot (2007-2010), Lise Salle (2006-2009), Nicolas Backert (2004-2007), P. Steer (2007-2010, co-dir. ENS-Paris), doctorants coop. IPGP, IPGS.

A la surface de notre planète le modelé du paysage est le résultat d'interactions complexes et variables dans le temps et l'espace, entre une tendance générale d'origine tectonique qui crée des reliefs et des bassins, et une tendance inverse qui réduit les irrégularités topographiques par érosion et sédimentation. L'évolution des reliefs est donc contrôlée à la fois par des forçages internes (dynamique de la lithosphère) et par des forçages externes (dynamique du climat). Par une approche multi-disciplinaire, alliant observation, expérimentation, quantification et modélisation, notre but est de mieux comprendre, sur des chantiers phares de la surface du globe, les processus qui contrôlent ce système, de façon à caractériser les interactions et rétroactions entre tectonique, érosion et climat.

### CONTRÔLES DES INTERACTIONS SOULÈVEMENT - ÉROSION - SÉDIMENTATION : COUPLAGES ENTRE PROCESSUS PROFONDS ET SUPERFICIELS

Dans les zones soumises à de la tectonique active ou récente, la création de topographies positives conduit le plus souvent à un accroissement de l'érosion, qui éventuellement peut conduire à un état d'équilibre pour lequel

l'érosion compense complètement l'épaississement tectonique et permet le maintien d'un relief en moyenne stationnaire. Ces processus actifs et opposés opérant dans l'évolution des chaînes de montagne laissent différentes empreintes qui

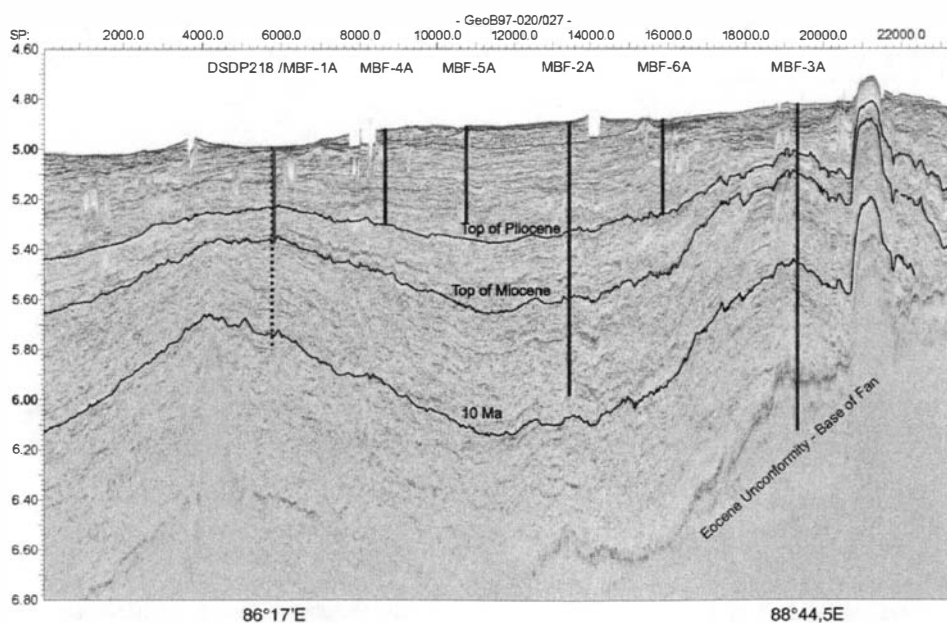
permettent de retracer pour partie cette évolution et éventuellement de démêler l'enchaînement des causes et des conséquences dans les interactions qui lient ces deux processus. Sur l'évolution long terme, c'est à dire pour suivre une orogénèse sur plusieurs millions d'années, les méthodes thermochronologiques permettent d'appréhender localement l'histoire de l'exhumation des massifs, tandis que l'étude des archives sédimentaires dans les bassins proximaux à périphériques nous livre une histoire complémentaire sur l'érosion de la chaîne. Pour quantifier la remontée des roches au cours d'une orogène, leur refroidissement associé, et les taux de dénudation correspondant lorsque l'exhumation n'est pas tectonique, une panoplie de thermochronomètres de haute (U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd) à basse (U-He) température ont été développés au CRPG dans le quadriennal précédent. L'étude des archives sédimentaires dans les bassins associés au démantèlement (avant-pays orogéniques, bassins océaniques) nous permet quant à elle d'accéder à une lecture plus continue dans le temps, ainsi qu'aux périodes plus anciennes et précoces de l'évolution orogénique. Dans les bassins d'avant pays, l'architecture stratigraphique, la distribution des faciès et les interactions tectono-sédimentaires, couplées avec des traceurs géochimiques et paléo-environnementaux donnent des informations sur le rôle relatif des processus tectoniques et climatiques et l'évolution géodynamique du bassin et de la chaîne de montagne source des sédiments.

Les différents chantiers proposés pour le futur quadriennal sont, dans cette perspective, l'occasion de mettre en oeuvre ces méthodes complémentaires pour étudier diverses «surfaces d'interaction» caractérisées par des contextes climatiques et tectoniques variés.

La collision Inde-Asie, en particulier le système Himalaya-Tibet, représente une orogénèse sur laquelle historiquement les chercheurs du CRPG se sont souvent focalisés. De part l'étendue de la zone et des problèmes à comprendre, une grande part de notre activité va continuer d'être focalisée sur les différentes marges du plateau tibétain avec au Sud le front Himalayen, les chaînes du Nord telle le Kunlun Occidental (coop. IPGP-IPGS), ou encore la chaîne des Longmenshan sur la bordure Est (coop. ENS-Paris). Dans cette dernière, l'évolution des niveaux crustaux médians de la chaîne, évolution largement ancienne (du protérozoïque au début du tertiaire), sera comparée à l'évolution des niveaux crustaux superficiels, ainsi qu'aux caractéristiques morphologiques et géophysiques actuelles de la chaîne de façon à répondre aux questions suivantes qui restent en suspens pour expliquer ce relief atypique : l'exhumation observée depuis le tertiaire est-elle uniquement superficielle ou s'accompagne t'elle d'une exhumation de roches d'origine profonde compatibles avec un modèle de transfert de croûte inférieure vers l'Est du plateau du Tibet ? existait-il déjà un relief avant le cénozoïque ? quel est l'héritage de l'orogénèse indo-sinienne sur ce relief ?

Sur la bordure sud de l'Himalaya, l'étude du bassin d'avant pays de l'Himalaya oriental

*Projet IODP 552. Transect de six forages à 8°N permettant de reconstituer une coupe complète du cône du Bengale intermédiaire. La profondeur de pénétration est de 1500m pour le site MBF-3. Les objectifs comprennent la reconstitution détaillée de la migration des centres d'accumulation depuis le Pliocène, l'histoire Néogène du bassin et l'échantillonnage du cône pré-Miocène.*



(coop. LGCA) viendra compléter notre vision existante du contexte de l'Himalaya central et apporter des informations sur l'évolution d'un segment de la chaîne où contextes tectoniques, climatiques et lithologiques sont différents. Plus en aval, nous regarderont aussi comment varie le régime d'érosion Himalayen au cours du temps à partir des enregistrements sédimentaires dans le Cône du Bengale, et ce notamment au travers du futur projet «IODP 552 Enregistrement de l'érosion de l'Himalaya depuis l'Oligocène». Ce projet IODP, qui prendra la forme d'un transect E-W de six forages dans le cône du Bengale intermédiaire (8°N), est maintenant prêt à être planifié et sera probablement réalisé lors du prochain quadriennal. La reconstitution de flux d'érosion fiables à l'échelle du Néogène est en particulier indispensable en vue d'une estimation de l'impact global de l'érosion himalayenne, d'une compréhension des interactions entre l'orogène himalayenne, le développement de la mousson asiatique et les processus de forçage du cycle du carbone.

En contrepoint à l'étude du bassin d'avant pays himalayen, l'étude du bassin d'avant pays des Alpes (coop. Total, IFP) permettra d'illustrer les stades précoces (par exemple disparus en Himalaya) de la collision avec le passage d'un bassin «sous-rempli» à comblé, et d'étudier avec plus de détail l'architecture stratigraphique, la distribution des faciès et les interactions tectono-sédimentaires dans les plis de couverture.

Enfin l'étude d'un système en extension fournit l'opportunité d'étudier la réponse de l'érosion, la sédimentation et les couplages tectonique/érosion dans un contexte tectonique différent des précédents. C'est le cas de l'évolution des systèmes de rift où un relief de marge est associé à un bassin le long des failles normales. Dans cette perspective, nous continuerons notre étude du rift de Corinthe, au sein d'un programme Européen (Corinth Rift Laboratory) de façon à définir les rôles relatifs des contrôles climatiques et tectoniques sur le remplissage syn-rift, en particulier sur les Gilbert Deltas géants. La reconstruction de la géométrie, la cinématique

et l'évolution 3D du réseau de failles normales a aussi pour objectif de mieux comprendre comment la lithosphère continentale accommode la déformation en contexte distensif à différentes échelles de temps et d'espace.

Par ailleurs, l'étude de cas naturels pour mettre en évidence des interactions ayant lieu à l'échelle d'une orogène, gagne à être complétée par une approche de modélisation qui permet de caractériser la sensibilité des systèmes orogéniques aux différents forçages et d'identifier les signatures et observables les plus pertinentes. Ainsi la mise en évidence de possibles couplages au niveau de la surface de la terre entre les différentes enveloppes a été le fait essentiellement d'approches numériques au début des années 90. Néanmoins, ces travaux pionniers et ceux qui les ont suivi sont loin d'avoir appréhendé et étudié l'ensemble des boucles de rétroaction. En contrepoint à l'étude de laboratoires naturels ou de grandes orogènes présentée précédemment, une démarche de modélisation numérique sur la base d'un code thermo-mécanique (CASTEM) sera donc menée en collaboration avec R. Cattin à l'ENS Paris, en mettant l'accent sur trois points. Premièrement il s'agit d'implémenter des lois d'érosion plus réalistes pour établir l'ampleur et les limites de la boucle de rétroaction topographie -> érosion -> tectonique. Deuxièmement, l'étude de l'influence de la topographie sur le climat et en particulier sur les précipitations orographiques permettra de mieux caractériser les disymétries produites sur une chaîne soumise à une direction dominante d'apport de masse d'air humide et de comprendre sur de longues échelles de temps la formation et le maintien de hauts plateaux orogéniques secs (voir également le sous-thème suivant). Troisièmement, l'influence de la lithologie sur l'érosion et son couplage avec l'évolution thermomécanique, via le métamorphisme et les changements de phase, seront introduits dans les modèles numériques afin de caractériser l'évolution des chaînes de montagne ainsi que leur phase de décroissance après arrêt de la tectonique.

## PALÉO-TOPOGRAPHIES ET ÉVOLUTION DES HAUTS PLATEAUX

Dans l'étude du fonctionnement de la surface de notre planète, la formation de reliefs n'a pas simplement un impact en terme de bilan d'érosion/altération et de contrôle long-terme du climat global, mais aussi en terme de «géométrie», les reliefs pouvant affecter le transfert des masses d'air et contrôler le climat localement ou régionalement, en créant des barrières orographiques plus ou moins pérennes.

Pour appréhender ces variations topographiques il est nécessaire de considérer les variations paléo-altitudinales des reliefs, et notamment celles des grands plateaux, comme

ceux du Tibet ou d'Afrique de l'Est, qui par leur altitude élevée et leur extension géographique, représentent des barrières efficaces. A la différence des zones orogéniques en constante exhumation, les plateaux possèdent une surface relativement plane qui permet de préserver des objets géologiques (volcanisme, petits bassins) ayant pu enregistrer les variations d'altitude de ces plateaux. Nous avons entrepris de développer dans le quadriennal précédent des traceurs de ces paléo-altitudes via l'utilisation des expositions fossiles au rayonnement cosmique (Thèse de PH Blard). Nous envisageons de poursuivre cet

enjeu important que représente l'obtention de paléo-altitudes fiables, notamment en couplant les approches utilisant les isotopes cosmogéniques (proxy de l'altitude) et de nouveaux traceurs absolus de la température utilisant certaines combinaisons d'isotopes stables ( $\Delta 47$ ,  $\delta^{18}O$ , cf. section paléo-environnements).

Une autre voie que nous utiliserons pour reconstruire les évolutions topographiques consiste à combiner un certain nombre de contraintes quantitatives sur l'évolution morphologique actuelle d'une marge de plateau (données cosmogéniques thermochronologiques, ...) de façon à pouvoir contraindre un modèle numérique d'évolution du paysage (LEM ou SPM) à partir de ces données, et ainsi tester la compatibilité de différents scénarios d'évolution.

Nous sommes notamment engagés dans l'étude de la marge sud du Tibet (coop. IPGP et ENS-Lyon) où nous envisageons d'étudier l'histoire du soulèvement du plateau Tibétain à travers sa compatibilité avec l'incision de ses trois grandes rivières (Mékong, Salween, Yang Tsé). Nous nous attacherons aussi, avec cette approche, à contraindre le soulèvement des hauts plateaux Ethiopiens et l'évolution morphologique des rifts qui les bordent (notamment celui de la marge Afar), de façon à évaluer leur impact potentiel sur l'aridification de l'Afrique de l'Est à la fin du Miocène, et donc leur rôle en tant que facteur forçant des conditions environnementales qui ont conduit à l'apparition des hominidés dans ces bassins d'Afrique.

## DYNAMIQUE DE L'ÉROSION PHYSIQUE ET CHIMIQUE

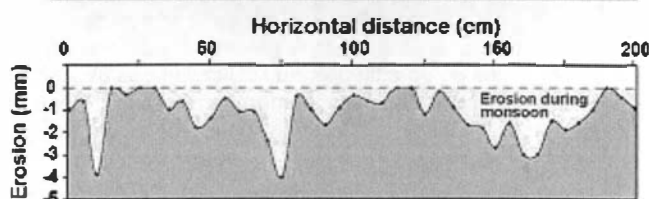
*Chercheurs* : Guillaume Caro, Christian France-Lanord, Jérôme Lavé, Fabien Palhol, Raphaël Pik, Laurie Reisberg, Claire Rollion-Bard, Nathalie Vigier

*Doctorants et post-doctorants* : Maarten Lupker (2007-2010), Maxence Paul (2004-2007), Matthieu Bureau (2004-2007), Emile Boulou Bi Boulou (2006-2009).

Comprendre et évaluer l'ampleur et l'influence des couplages entre tectonique, climat et érosion sur l'évolution d'une orogénèse ou du cycle du carbone ; comprendre la réponse des reliefs et paysages continentaux aux changements climatiques, passés ou futurs ; ou encore améliorer notre lecture des archives sédimentaires en termes tectoniques ou climatiques ; renvoient au besoin criant de quantification des processus de l'érosion, en particulier du transport physique et de l'érosion chimique.

Dans le cadre du prochain quadriennal, nous envisageons d'appréhender cette caractérisation suivant plusieurs axes : le développement de nouveaux traceurs de l'érosion et de certains processus érosifs, la caractérisation expérimentale des processus, la modélisation numérique de l'érosion d'un bassin versant ou d'un orogène avec en vis à vis comme test ultime plusieurs études de cas ou de grands chantiers ciblés et fédérateurs. Cette dernière démarche représentant le trait d'union naturel avec le sous-thème précédent à savoir l'évolution des orogènes en réponse à l'érosion ou encore avec le sous-thème suivant pour ce qui est de l'impact environnemental du cycle du carbone au cours du phanérozoïque, ou du message climatique enregistré par les marqueurs géomorphologiques.

### DYNAMIQUE DE L'ÉROSION PHYSIQUE ET DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS



Dans la plupart des paysages, le réseau hydrographique a un rôle prépondérant. Les rivières ont en effet à la fois un rôle de convoyeur des sédiments en provenance des versants et un rôle de contrôle du niveau de base des versants. Bien qu'elles ne représentent pas plus de 5% de la surface totale du paysage, les rivières sont donc les acteurs prépondérants de l'évolution de la topographie à grande longueur d'onde et des couplages climat/tectonique/érosion. Les phénomènes fluviaux comme l'incision et la réduction de taille des sédiments au cours du transport fluvial, seront appréhendés

*Mesure de l'incision fluviale sur le fond et les flancs d'une rivière traversant les plis frontaux himalayens (thèse en cours de M. Dubille). (En haut) Appareil de mesure utilisé en 2005 puis en 2006 sur les mêmes profils microtopographiques pour mesurer l'incision ; (en bas) Exemple de mesure de l'incision due à la mousson 2006 d'une dalle de grès subhorizontale et affleurant au dessus du niveau d'étiage.*

essentiellement via des études sur un dispositif expérimental (canal circulaire), la modélisation physique du transport et des mesures répétées de terrain de l'incision du substrat sur une ou deux rivières bien instrumentées.

Les processus de transport fluvial ont été assez largement étudiés par les hydrauliciens, néanmoins un travail important reste à mener sur les phénomènes de ségrégation. Les différentes phases minérales et granulométriques présentes dans un sédiment ne sont pas transportées de manière identique : cela se traduit au sein d'une tranche d'eau par une ségrégation verticale de la composition chimique, et à l'échelle d'une plaine d'inondation et d'un delta par des stockages et le déstockage préférentiels de certains éléments. Cette problématique sera essentiellement appréhendée par l'échantillonnage de rivières actuelles, des mesures géochimiques de bilans d'éléments ou le traçage des temps de stockage via les séries de l'Uranium (coop. CGS et IPGP).

### CYCLE DU CARBONE ET ÉROSION CHIMIQUE

En regard des enjeux environnementaux et sociétaux actuels, le cycle du carbone tient une place à part. La complexité des mécanismes en jeu qui font intervenir surface terrestre, atmosphère et hydrosphère, ainsi que les processus physiques, chimiques ou biologiques, donnent également un caractère particulier à l'étude du cycle du carbone et des éléments qui y sont intimement liés (e.g. Mg, K). Quantifier les flux de consommation de CO<sub>2</sub> par altération continentale et flux particulière de carbone organique est une préoccupation centrale pour modéliser à toute échelle de temps les forçages géologiques sur le climat. Nous poursuivons la démarche de traçage de l'altération par le développement de nouveaux traceurs isotopiques du cycle bio-géochimiques (Li, Mg, K), l'utilisation de traceurs classiques (Sr, Os, δ<sup>18</sup>O) et l'analyse de l'expression de l'altération dans les sédiments détritiques. Également nos recherches sur l'exportation du carbone organique dans les bassins se poursuivront sur des exemples particuliers. Une attention particulière sera apportée à la recherche de la réponse de régimes d'altération aux contraintes climatiques à partir d'enregistrements sédimentaires récents et de comparaisons de bassins actuels (Himalaya, Amazone, Sibérie...)

Durant le quadriennal précédent, nous avons montré que la formation des argiles et le recyclage par la végétation sont deux paramètres clefs qui déterminent les compositions isotopiques du Li et du Mg des silicates et en solution. L'utilisation de ces traceurs et leur intégration dans des modèles globaux nécessitent maintenant un travail de calibration des fractionnements isotopiques associés à l'altération et au recyclage par les plantes. Nous poursuivons expérimentalement ces voies via des synthèses d'argiles, et des

En dépit de l'importance des processus fluviaux, les versants exercent un certain contrôle sur la capacité de transport et d'incision des rivières au travers notamment de la distribution de tailles des produits de l'érosion et bien sûr fournissent l'essentiel des produits de l'érosion. Ils ont donc une importance majeure sur les bilans et traçages géochimiques déterminés à partir des sédiments exportés dans les bassins. Cependant, il existe des phénomènes de ségrégation chimique et particulaires via la pédogénèse et le transport préférentiel dans les différentes phases du transport fluvial (dissoute, charge solide en suspension, charge solide de fond) qui vont influencer les bilans géochimiques. L'étude des phénomènes de versant se concentrera notamment sur la signature géochimique des processus via l'utilisation des isotopes cosmogéniques et de traceurs tels que les isotopes stables légers.

réactions de substitution et d'adsorption associées, et via les croissances de plantes en milieu contrôlé. Parallèlement, nous développerons l'étude isotopique de systèmes naturels simples, déjà bien contraints, en particulier les rivières et sols de petits bassins versants 'monolithologiques' (basaltiques ou granitiques) monitorés (e.g. Hawaii, Moselle). L'étude isotopique de certains profils d'altération anciens, très étudiés, de la croûte océanique (e.g. site ODP 417) devrait aussi nous permettre d'affiner notre connaissance de l'altération basaltique, de son impact sur la chimie de l'océan et sur le cycle du magnésium.

Le potassium reste l'un des derniers éléments majeurs dont les variations isotopiques dans le cycle bio-géochimique sont méconnues. Compte tenu de la mobilité de cet élément durant les processus d'altération, et de son importance dans les minéraux silicatés et les plantes il a un potentiel fort de traçage des processus de néoformation et de fixation biologique. L'ICP-MS à cellule de collision «Isoprobe» du CRPG est particulièrement adaptée à l'analyse du K. Des développements analytiques, ainsi que des tests sur les fractionnements isotopiques du potassium lors de la croissance expérimentale de plantes seront menés. Parallèlement, nous testerons le potentiel des isotopes du Potassium comme traceur des réactions dites d'altération inverse. Ces réactions se produisent lors de la diagenèse des sédiments en milieu océanique. Elles impliquent la formation de minéraux aluminosilicatés à partir de matériel détritique ou biogénique sur une échelle de temps courte (quelques mois à quelques années). L'importance de ces processus reste difficile à quantifier à l'échelle globale et le flux de production de CO<sub>2</sub> qui l'accompagne représente l'une inconnues importantes du cycle du carbone.



L'intérêt du K comme traceur des mécanismes d'altération inverse réside dans le fait que K<sup>+</sup> est le cation majeur impliqué dans ces réactions. Cette observation est à mettre en parallèle avec le bilan océanique fortement déséquilibré du K, puisqu'environ 80% des flux vers l'océan ne sont pas compensés par les flux sortants. Une approche isotopique du cycle du Potassium pourrait permettre de mieux appréhender les flux de K océaniques, d'établir un bilan de masse à l'échelle globale, et, si les résultats sont concluants, d'évaluer l'évolution de ce bilan au cours du temps par l'étude de l'enregistrement sédimentaire marin.

Outre ces nouveaux traceurs de l'altération, nous allons poursuivre une approche de bilan

d'altération à partir des sédiments détritiques silicatés. Elle sera basée sur le couplage entre compositions isotopiques d'oxygène et d'hydrogène, concentrations en eau et compositions chimiques des sédiments. La composition isotopique d'hydrogène apportera également une signature météorique de l'hydratation. Cette approche partira d'une calibration sur sédiments de rivières (Himalaya, Amazone, Sibérie) prenant en compte les processus de ségrégation minéralogique induits par le transport. Elle sera ensuite appliquée sur des enregistrements sédimentaires marins (Bengale et Amazone) permettant en particulier d'analyser la réponse de l'érosion aux changements climatiques récents.

### ÉROSION DU PAYSAGE : DE LA MESURE AU MODÈLE NUMÉRIQUE

Les étapes principales qui font suite à la quantification des processus de l'érosion voire à la détermination de lois physiques consistent à intégrer l'ensemble des processus (altération et érosion des versants, incision et transport fluvial) dans un modèle numérique d'évolution du paysage ou des modèles heuristiques de versant afin d'étudier les réponses complexes du paysage fluvial aux forçages tectoniques et climatiques, ou encore l'évolution vers l'aval des signatures géochimiques ou minéralogiques d'un sédiment au cours de son transport depuis les versants jusqu'aux bassins ou cônes sous marin. La plupart des modèles numériques qui ont été développés jusqu'à présent ont le plus souvent fait abstraction

de l'évolution de la charge sédimentaire vers l'aval, de la complexité des couplages entre versants et réseau hydrographique, ou encore des couplages entre altération et érosion physique. Notre démarche consistera pour bonne part à combler cette lacune. Comme pendant nécessaire à cette démarche, les «laboratoires» naturels et études de cas représentent le test ultime de tels modèles (cf. section précédente). A contrario, les tests de sensibilité rendus possibles par les modèles numériques permettront une meilleure interprétation des variations géochimiques ou autres observées dans les archives sédimentaires.

## TRACEURS PALÉO-ENVIRONNEMENTAUX

*Chercheurs* : Jean Carignan, Christian France-Lanord, Jérôme Lavé, Fabien Palhol, Raphaël Pik, Laurie Reisberg, Claire Rollion-Bard, Nathalie Vigier,

*Doctorants et post-doctorants* : Jennu Maccali (coop. Univ. Quebec, 2007-2010)

Le climat de la Terre évolue à la fois par le biais de facteurs naturels, mais aussi sous l'effet des activités anthropiques à cause d'émissions importantes de CO<sub>2</sub>, gaz à effet de serre, dans l'atmosphère. La maîtrise et la prédiction de cette évolution dans le temps passent par la compréhension et la reconstitution la plus précise possible des climats passés. Ces deux aspects vont ensuite permettre une meilleure modélisation des climats futurs. Cela passe par une meilleure maîtrise des traceurs géochimiques et par l'utilisation de nouveaux outils isotopiques qui permettent de reconstituer les environnements et les climats du passé, à la fois en milieu marin et en milieu continental.

### TRACEURS DES MILIEUX MARINS

Les traceurs des milieux marins sont principalement issus des carottes sédimentaires. L'étude de ces carottes peut ainsi nous apporter des renseignements sur l'évolution des courants marins. Cette potentialité sera utilisée pour l'étude de carottes sédimentaires du Déroit de Fram. Ce déroit est le plus important passage des échanges entre les Océans Arctique et Atlantique Nord, point de départ du «tapis roulant» des courants océaniques régissant en grande partie le climat de l'Europe de l'Ouest. Cette étude se fera par l'enregistrement des variations spatiales

et temporelles des compositions chimiques et isotopiques (Pb, Sr et Nd) afin de les mettre en corrélation avec la paléoclimatologie récente (0-10 ka), pour évaluer l'évolution des échanges entre les deux océans en fonction du climat. En outre, les carottes sédimentaires prélevées dans des bassins suboxiques fournissent des enregistrements à haute résolution des changements en composition de l'eau de mer. La corrélation nette entre la composition isotopique d'Os et celle d'oxygène du forage ODP 1002 (Basin de Cariaco, Venezuela), démontrée par des

travaux récents au CRPG, suggère une diminution importante de l'apport de l'érosion continentale lors des intervalles glaciaires. Nous projetons de confirmer cette observation par l'étude d'autres bassins suboxiques.

L'étude des évolutions climatiques en milieu marin se fait également par l'intermédiaire de mesures de rapports isotopiques et/ou

élémentaires dans des carbonates biogéniques comme les foraminifères et les coraux. Durant le dernier quadriennal, nous avons montré l'importance de mieux comprendre les processus de biominéralisation qui affectent l'enregistrement des marqueurs paléoenvironnementaux (ex.  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{11}\text{B}$ ,  $\delta^{44}\text{Ca}$ ,  $\delta^7\text{Li}$ ...). En effet, la précision à laquelle peuvent être connues les variations passées du climat dépend beaucoup de notre compréhension des phénomènes responsables de l'effet vital, c'est-à-dire des processus de biominéralisation. Il est donc primordial de savoir à quel degré ces processus de biominéralisation altèrent les paramètres environnementaux (température, pH,  $[\text{Ca}^{2+}]$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$ ,...) de l'eau de mer à partir de laquelle les organismes calcifient. Nous allons donc continuer en utilisant principalement des organismes dont la croissance s'est faite en conditions contrôlées en laboratoire (pH, température, salinité...). Les mesures à échelle micrométrique, grâce à la microsonde ionique, couplées à des mesures par ICP-MS à multicollecion (Isoprobe, VG instr.) vont ainsi permettre une approche comparée des conditions de calcification.



Aquarium au CSM (Centre Scientifique de Monaco) contenant des coraux qui poussent sous conditions contrôlées.

### TRACEURS DES MILIEUX CONTINENTAUX

En dehors des carottes glaciaires correspondant à des environnements bien particuliers, les traceurs permettant de remonter aux conditions paléo-environnementales en milieu continental sont relativement peu nombreux. Afin d'améliorer nos connaissances de l'évolution de ces milieux, nous comptons poursuivre l'étude des variations de températures et de précipitations sur les continents, en lien avec les archives glaciaires (moraines, polis) d'une part et les enregistrements sédimentaires d'autre part. Au cours du prochain quadriennal, nous envisageons de développer plus avant nos compétences dans la mesure des conditions climatiques continentales passées via plusieurs méthodes :

Sur la période tardi-Quaternaire, nous nous intéresserons aux enregistrements glaciaires et lacustres, et à la modélisations de ces phénomènes afin de remonter aux conditions de précipitation et de température. Il s'agit premièrement de dater les avancées et retraits glaciaires à partir des isotopes cosmogéniques ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ), deuxièmement de modéliser la géométrie des langues glaciaires et d'inverser les conditions paléoclimatiques à partir des extensions déduites des morphologies glaciaires.

L'inversion ne fournissant qu'un ensemble de solution (précipitations, température), nous envisageons de coupler une telle approche avec l'estimation des précipitations via la modélisation des niveaux d'équilibre des lacs (nombreux par exemple au Tibet ou sur l'Altiplano) à la même époque.

Une autre approche pourrait aussi être de combiner ces modélisations avec des estimations absolues des paléo-températures. Ceci grâce à un nouveau champ d'application qui s'ouvre dans le domaine des isotopes stables, avec la mesure des isotopologues rares des molécules de  $\text{CO}_2$ . Des travaux récents menés par l'équipe de John Eiler (Caltech) ont démontré que, dans les carbonates, la proportion de molécules rares de type  $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$  suit une fonction de la température de formation. Cette propriété ouvre le champ à de nombreuses applications pour reconstituer directement les conditions de température de surface ou encore les altitudes. L'application de ce type de traceur n'en est qu'à ses débuts et des voies intéressantes d'investigations existent sur d'autres phases telles que les molécules atmosphériques par exemple. Au cours du prochain quadriennal, nous avons l'intention de développer ce projet

avec l'acquisition d'un spectromètre de masse adapté qui est demandé dans le cadre du CPER «Plateforme géochimique» de la FR-EST.

Par ailleurs, nous nous intéresserons également à la matière organique préservée dans les sédiments qui constitue un traceur des conditions de croissance des espèces végétales. Les analyses isotopiques moléculaires couplées de l'hydrogène et du carbone permettent en effet d'apporter des informations sur les variations de paléo-humidité et la saisonnalité ou l'origine des paléo-précipitations. Actuellement, l'utilisation des *n*-alcanes pour ce type d'approche paléo-environnementale se développe dans la mesure où la préservation du signal paraît assurée dans des conditions de dégradation peu poussées.

L'utilisation de ces traceurs à l'échelle du sous-continent indien, engagée lors du dernier quadriennal sera poursuivie. En effet, l'étude détaillée d'un bassin tel que celui du Gange-Brahmapoutre, très actif au niveau du transport sédimentaire, présente un intérêt majeur dans le cadre de la précision des conditions d'entrées des modèles climatiques à proximité des grandes chaînes de montagne. D'autres traceurs isotopiques moléculaires spécifiques de certains biotopes pourrait également être utilisés pour compléter les reconstitutions paléo-environnementales. Enfin, la généralisation de cette approche à d'autres bassins sera également envisagée (Amazone, McKenzie, Nil, ...).

## ENVIRONNEMENTS ANTHROPISÉS

*Chercheurs* : Jean Carignan, Christophe Cloquet, Pauline Collon-Drouaillet, Christian France-Lanord, Guy Libourel, Bernard Marty

*Doctorants et post-doctorants* : Nicolas Estrade (2006-2009, co-dir. Pau)

L'activité anthropique (fonderies, incinérateurs, combustion fossile, ...) et ses réalisations (irrigation, barrages, canaux, ...) sont à même de modifier les processus et les flux élémentaires naturels. Il est donc important de pouvoir identifier ses effets sur l'environnement, particulièrement pour les pollutions diffuses et/ou réactives.

### MODÉLISATION DE LA RESSOURCE EN EAU À L'ÉCHELLE DU BASSIN

En s'appuyant sur le cas particulier du bassin mosellan, nous souhaitons développer de nouveaux outils d'aide à la gestion de la ressource en eau.

Des bilans spatialisés et une caractérisation chimique et isotopique des eaux du bassin versant de la Moselle serviront à identifier les sources des polluants, définir les temps de transfert, et caractériser les interactions eau-sol-roche au sein du bassin. Ces informations géochimiques seront complétées par des informations physiques (traitement des données de débit, étude de la spatialisation des crues) afin de comprendre le fonctionnement hydrologique du système. En effet, les travaux de Mathieu Bureau (thèse CRPG 2004-2008) démontrent qu'il est possible d'estimer la contribution des nappes à la rivière

en fonction du débit de celle-ci. Le comportement des éléments dissous permet aussi d'identifier la contribution de différentes nappes possédant des compositions distinctes. Cette démarche sera, entre autre, appliquée au projet BisMad, développé en collaboration avec des géographes (Metz) et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse dans le cadre de la ZAM.

L'ensemble de ces données aura pour but d'alimenter et de construire un modèle hydrogéochimique en 3 dimensions du bassin mosellan. Réalisé avec le géomodeleur Gocad, cette approche nécessitera l'adaptation des outils de simulation d'écoulement existants et le développement de modules géochimiques spécifiques, basés sur les données de terrain ou expérimentales.

### CYCLE DE SURFACE DES MÉTAUX (EN PARTICULIER Pb, Zn, Hg, Se)

Il s'agit de documenter des variations chimiques, minéralogiques et isotopiques sur des échantillons naturels et anthropisés afin d'en déduire des informations sur la sources de ces éléments ainsi que les interactions subits dans le milieu. Nous étudions depuis plusieurs années les lichens et les aérosols dans la région messine et désirons poursuivre ce programme afin de documenter des évolutions temporelles des signaux atmosphériques. Nous envisageons d'étudier plus en détail le mode de bio-accumulation des métaux dans les lichens par expérimentation

en laboratoire par l'utilisation de solutions de Pb et Zn dont la composition isotopique sera connue. En parallèle, nous mènerons des expériences de laboratoire visant à reproduire des processus de réactivité des métaux dans l'environnement comme la volatilisation, l'oxydo-réduction, la photochimie d'espèces radicales, afin d'en déduire les fractionnements isotopiques associés et établir un cadre de référence pour les variations observées dans la nature et environnements anthropisés. Par exemple, le système Hg - HgCl<sub>2</sub> sera particulièrement étudié car l'oxydation du



*La fonderie de Manchegorsk dans la péninsule de Kola, Russie, est une des plus importantes d'Europe. Ses émissions atmosphériques (acide sulfurique et métaux) contribuent à la forte acidité des précipitations, ce qui engendre une déforestation de la vallée sur plusieurs dizaines de kilomètres.*

Hg<sup>0</sup> en Hg<sup>2+</sup> par le chlore et les halogènes en général est une réaction importante du cycle atmosphérique du Hg ainsi qu'à l'intérieur de certaines usines de transformation comme les incinérateurs d'ordures ménagères. Les fractionnements isotopiques associés à ces réactions seront utilisés pour l'interprétation des variations isotopiques mesurées dans les échantillons naturels. Les systèmes naturels étudiés seront: 1- les shales noirs riches en métaux (Se, Hg, Mo, Pb, Zn, etc...), 2- les sols forestiers et agricoles soumis ou non aux pressions anthropiques, 3- les aérosols et les lichens. Les chercheurs du CRPG dans ce domaine font partie d'un regroupement national et international avec lesquels des collaborations seront établies dans le cadre d'actions ou de programmes nationaux et européens.

#### DYNAMIQUE ATMOSPHÉRIQUE ET PERTURBATIONS ANTHROPIQUES

Ce projet vise à mesurer avec une grande précision le rapport isotopique <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He de l'air pour détecter des variations temporelles ou/et géographiques. Ce projet avait déjà été proposé lors du dernier quadriennal. Un spectromètre de masse à deux collecteurs pour l'analyse précise des deux isotopes de He a été monté durant cette période, mais le montage de la ligne a pris du retard du fait de l'engagement de l'équipe sur d'autres programmes d'une part, et de problèmes non attendus sur un autre nouveau spectromètre de masse multicollecion. Une demande ANR proposée sur ce projet en partenariat avec une équipe de modélisation climatique et avec une équipe de prélèvement atmosphérique n'a pas été couronnée de succès, retardant également le projet. Nous sommes cependant décidés à le continuer, le financement de l'installation ayant été assuré sur d'autres sources.

Le but du projet est de mesurer avec une précision de l'ordre du pour mille le rapport isotopique de He d'échantillons d'air prélevés à

diverses périodes et sous différentes latitudes. L'hélium s'échappe de l'atmosphère terrestre et son abondance est basse, ce qui permet d'envisager des variations faibles, mais mesurables, sur des échelles de temps humaines. Une source majeure est l'hélium-4 de la croûte, relâché avec les hydrocarbures, donc lié à l'exploitation du pétrole. De plus, les mécanismes de gain et de fuite de He n'étant pas homogènes à la surface du Globe, il est possible de détecter des variations géographiques. Enfin, il peut y avoir localement des sources ponctuelles d'isotopes de He comme l'industrie nucléaire ou les volcans. Ce type de mesure montre donc de grandes potentialités de recherche dans divers secteurs des sciences de la Terre et des sciences de l'environnement, comme traceur de cycle atmosphérique et de perturbation anthropique. Nous prélevons depuis 2003 des échantillons d'air, et nous entreprendrons un programme de prélèvement d'air sous diverses latitudes.

## BESOIN EN ÉQUIPEMENT

Les projets de recherche développés dans ce document de prospective nécessiteront l'installation de nouveaux équipements de mesures géochimiques au CRPG, comme planifiés dans le nouveau plan Etat-Région et qui correspondent à :

- Un spectromètre de masse isotope stable multi-collecion capable de mesurer simultanément, et avec une précision suffisante, la plage de masse de 44 à 49 pour pouvoir déterminer le  $\Delta 47$  et ainsi mettre en oeuvre au CRPG, et en France, ces mesures de température absolue basées sur les combinaisons d'isotopes rares lors de la précipitation des carbonates.

- Un ICPMS à multi-collection permettant l'analyse isotopique de haute précision de Li, Mg, Si ainsi que des métaux Fe, Cu, Zn, Ge, Cd, Hg, Tl, Mo et métalloïdes Se, Sb, dédié au traçage isotopique des processus environnementaux et géologiques. Le projet est commun entre le CRPG, la FR EST et le Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) du CNRS, et l'objectif scientifique est double : 1) mettre en commun la force multidisciplinaire des équipes de Nancy pour faire des percées technologiques en associant expérimentation et technique d'analyse isotopique, 2) utiliser la géochimie isotopique comme traceur de sources et de processus sur les différents chantiers géologiques et environnementaux (e.g. ZAM et GISFI).

Dans le cadre de la poursuite du développement de notre approche quantitative des processus d'exhumation et d'érosion nous envisageons : 1) d'optimiser notre chaîne de séparation des minéraux et 2) d'implanter ou de participer au co-financement d'un laboratoire de préparation chimique des cibles nécessaires en amont des mesures d'isotopes cosmogéniques ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ) réalisées par l'AMS national ASTER (gestion CEREGE).

# ACTIVITÉS DE VALORISATION

Cet axe transverse a pour objectif d'afficher les activités de recherche du CRPG en prise directe avec les besoins et la demande sociétale. Il s'appuie sur les savoirs faire des différentes équipes et regroupe nos principaux projets en relation avec le monde industriel ou des objectifs industriels (Carnot ICEEL) pour le prochain quadriennal.

## CONSORTIUM GOCAD

*Chercheurs impliqués* : Pauline Collon, Guillaume Caumon, Mary Ford, Jean-Jacques Royer, Pierre Jacquemin.

*Doctorants impliqués* : Lise Salles, V. Henrion, Pauline Durand-Riard, Thomas Viard, Evelyne Bennewitz, Marc-Olivier Titeux, Luc Buatois.

*Collaborations* : B. Lévy (LORIA, Nancy); J. Sausse (G2R, Nancy) ; J. Caers (SCRF, Stanford) ; H. Schaeben (Freiberg) ; Consortium Gocad; INRA

Gocad est un logiciel de géomodélisation créé et développé au CRPG et à l'ENSG par le Consortium Gocad à partir de 1989. Fruit d'un travail collectif associant des chercheurs à Nancy et des partenaires industriels et académiques, il a donné lieu en 1997 à la création de la compagnie EarthDecision, qui a racheté le code du logiciel au Consortium Gocad, et travaillé à son industrialisation. EarthDecision a ensuite été absorbée par Paradigm Geophysical en 2006.

Actuellement, le CRPG poursuit une activité de recherche en géomodélisation, qui se traduit notamment par l'animation du Consortium Gocad. Cette recherche partenariale s'effectue en accord avec un comité de pilotage constitué des membres industriels du Consortium (22 membres internationaux en 2007), sur des thématiques de recherche méthodologique liées à la modélisation 3D des ressources naturelles. L'ensemble du budget du consortium est consacré à ces actions de recherche, essentiellement via les salaires de doctorants au CRPG.

Nous souhaitons poursuivre cette recherche partenariale et développer davantage les synergies entre méthodologie et thèmes de recherche en géologie fondamentale (bilans de transferts sédimentaires, sismologie, etc.). La géomodélisation est de fait utilisée par de nombreux laboratoires de par le monde (en 2007, le Consortium Gocad regroupe ainsi 86 organismes de recherche gouvernementaux en 2007, dont quatre seulement sont français).

Pour cette raison, nous proposons de développer un Service National pour l'accueil et la formation de chercheurs souhaitant s'investir dans la modélisation 3D. Nous pourrions fournir localement des licences du logiciel commercial Gocad, les codes de recherche développés au sein du Consortium, ainsi qu'une expertise technique. Les organismes (UMR/UPR) concernés pourraient être exonérés de cotisation au consortium Gocad. Pour soutenir ce Service National, nous souhaitons demander un poste d'IE afin d'assurer le lien entre le logiciel Gocad, les nouveaux développements méthodologiques et leur utilisation par la communauté des géosciences française ainsi qu'à l'échelle nancéienne.

Concernant les thématiques de recherche méthodologiques envisagées au sein du Consortium Gocad, plusieurs axes sont envisagés :

### **Restauration des structures géologiques**

Les codes numériques de restauration des structures plissées et faillées développés dans notre équipe ont un fort potentiel pour valider les modèles géométriques des structures du sous-sol, tester quantifier des scénarii tectoniques, et estimer les déformations subies par les roches. Cependant, de nombreuses questions se posent lors de l'utilisation de ces codes sur des problèmes concrets, par exemple :

- Doit-on mailler les couches de manière conforme pour appliquer une méthode de restauration ?

- Quelle doit être la géométrie de l'état restauré ?

- Quelle mode de retroréformation : préservation de l'épaisseur des couches, déformations ductiles, conservation du volume ?

- Comment peut-on utiliser les déformations entre l'état restauré et la géométrie actuelle pour calculer la vraisemblance d'une interprétation structurale ?

- Peut-on détecter et corriger une géométrie irréaliste à partir des résultats de la restauration ?

- Comment restaurer des formations affectées par du diapirisme ?

- Comment restaurer progressivement les plis et les failles syn-sédimentaires (3D backstripping)?

Les éléments de réponse à ces questions, impliquent une recherche méthodologiques,

mais aussi des applications de ces méthodes (réservoirs pétroliers, chantier des Grès d'Annot).

### **Modélisation de réservoirs fracturés**

Caractériser la position et les attributs de réseaux de fractures dans le sous-sol ainsi que leur impact sur des problèmes de transfert de fluides est une tâche difficile. Nous souhaitons pour cela nous intéresser à :

- La combinaison d'indicateurs structuraux, d'observations de puits et d'indicateurs sismiques (attributs AVO et multi-azimut) pour caractériser les milieux fracturés.
- L'utilisation pratique de ces résultats dans des simulations de transferts de fluides

### **Visualisation du sous-sol : processus dynamiques et incertitudes**

Les principes de visualisation 3D du sous-sol sont relativement bien établis, et ont déjà fait l'objet de travaux dans notre équipe. Cependant, il convient de franchir une nouvelle étape pour considérer deux dimensions supplémentaires :

- La visualisation de processus dynamiques tels que la propagation de fluides dans le sous-sol, qui passe par un meilleur couplage entre modélisation statique du sous-sol et la simulation

des transferts en milieux poreux ;

- La visualisation d'incertitudes quant à la position des interfaces géologiques et des propriétés pétrophysiques des roches.

Ces deux problématiques soulèvent d'importants problèmes en termes de traitement de gros volumes de données, de perception humaine, et de modèles mathématiques de représentation des incertitudes.

### **Concepts géologiques et méthodes géostatistiques**

Actuellement, seules les méthodes géostatistiques assurent un remplissage pétrophysique du sous-sol honorant les données d'observation. Cependant, le réalisme des modèles obtenu reste limité par l'hypothèse de stationnarité, et la modélisation géostatistique dans l'espace de dépôt. Nous souhaitons nous affranchir autant que possible de ces limites par l'intégration de concepts et d'interprétations géologiques dans les modèles géostatistiques.

Cette recherche implique trois volets :

- La prise en compte d'informations directionnelles lors de la simulation géostatistique
- La conception de méthodes stochastiques de corrélations de diagraphies aux puits, permettant de générer plusieurs interprétations chronostratigraphiques reflétant les incertitudes.
- Le calcul probabiliste de transformations pétrophysiques entre le dépôt et l'Actuel (diagenèse, dolomitisation, karstification).

### **Transferts réactifs dans le sous-sol**

La demande croissante d'outils d'aide à la gestion des ressources de la part des décideurs, mais aussi de certains industriels nécessite le développement de nouveaux modèles de transferts réactifs dans le sous-sol. La difficulté est de combiner une approche suffisamment globale pour prendre en compte la multiplicité des processus qui influencent la ressource considérée, tout en conservant une représentation suffisamment spatialisée pour

répondre aux questions de gestion du territoire. C'est dans cet objectif que nous souhaitons développer de nouveaux modèles conceptuels pour représenter des transferts réactifs dans le sous-sol. En liaison avec le géomodeleur Gocad, on pourra ainsi réaliser des analyses fonctionnelles tridimensionnelles (définition de corps géologiques « homogènes »), puis intégrer les processus géochimiques dans un simulateur d'écoulement monophasique.

## **L'ÂGE DU PÉTROLE**

*Chercheurs* : L. Reisberg, R. Michels (G2R)

*Collaborations* : J-P. Houzay, G. Sermondadaz (TOTAL)

*Financement* : Contrat TOTAL, géré par le Cregu

Dans le cadre de l'exploration et de l'exploitation pétrolière, la connaissance de l'histoire d'un système pétrolier est stratégique pour prédire l'existence et la composition des fluides pétroliers en réservoir.

Les événements constitutifs de cette histoire sont majoritairement datés de façon relative. Ce qui manque cruellement est un moyen de dater de façon absolue les événements affectant le fluide pétrolier lui-même. Des études récentes (e.g.,

Selby and Creaser, 2005) ont suggéré que le système radiogénique Re-Os pourrait être utilisé pour dater la migration des fluides pétroliers. Cependant, des questions essentielles restent sans réponse. Est-ce que les alignements de ces

fluides dans des diagrammes du type isochrone représentent vraiment des événements bien définis, ou est-ce qu'il s'agit simplement de lignes de mélange? S'ils datent des événements, quelle est la nature de ces événements (la genèse de l'huile, sa dernière migration, son temps de résidences en réservoir, une altération), en bref, quel est le processus qui fractionne le couple Re-Os ?

Pour répondre à ces questions, nous entamons une série d'expériences censée déterminer le comportement du couple Re-Os lors des événements affectant un fluide pétrolier, de sa formation à son séjour en réservoir. À partir d'une huile naturelle, nous réalisons des expériences de précipitations fractionnées des asphaltènes

et résines ainsi que des séparations par classes de masses molaires et déterminons celles susceptibles de concentrer soit le Re, soit l'Os, soit les deux. Nous performons également des expériences d'équilibration entre huiles et eaux pour comprendre le comportement géochimique de Re/Os dans les huiles en contact avec des eaux de bassin et de gisement. Nous projetons également d'étudier le fractionnement éventuel du couple Re-Os lors de la genèse d'un fluide pétrolier, en chauffant des schistes noirs dans des réacteurs à haute température. Ces expériences ont débuté pendant le post-doc de Y. Hautevelle à G2R. Nous espérons de les continuer dans le contexte d'une thèse.

## STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

*Collaboration* : ANDRA, MNHN (Paris)  
*Postdoc ANDRA* : Andréas Morlok (2 ans)  
*Financement* : ANDRA

Dans la perspective d'un stockage des déchets radioactifs de Haute Activité et à Vie Longue en formation géologique profonde, la connaissance du comportement à long terme ( $10^4$ - $10^5$  ans) du système multi-barrières Verre-Fer-Argile passe par l'élaboration d'un modèle phénoménologique fiable et robuste sur les durées mises en jeu.

### ***Altération des météorites chondritiques et implications sur la corrosion des déchets nucléaires en site de stockage profond.***

À cette fin, de nombreuses simulations expérimentales ont été entreprises pour préciser les paramètres qui dimensionnent de ces modèles. Malgré l'intérêt de cette approche aux temps courts, de nombreuses études ont montré des limitations quant à l'extrapolation sur des longues durées, i.e., rupture de cinétiques, activation artificielle pour accélérer le vieillissement (courant, temps, etc.). À ce stade, l'étude d'analogues archéologiques et naturels fournit une base de données essentielles et uniques pour i) documenter la diversité des phases et des mécanismes mis en jeu, ii) paramétrer les cinétiques réactionnelles et de transport des éléments, et in fine pour iii) valider les modèles phénoménologiques d'évolution de ce système multibarrières sur le long terme.

À cette fin, nous nous proposons d'étudier les météorites, plus particulièrement l'altération des chondrites carbonées, comme analogues naturels d'un système verre-métal-silicates soumis à une altération aqueuse sur une grande période de

temps dans des conditions réductrices. L'objectif est de dimensionner l'évolution des propriétés de confinement du système multi-barrières Verre-Fer-Argile à long terme.

En effet, les météorites sont soumises à des altérations de longues durées dans les corps-parents (ceinture d'astéroïde) dont les conditions (température, pression, conditions d'oxydation, temps) sont très voisines de celles qu'auront à subir l'association VFA en site de stockage. Si l'on rajoute à cela les pressions d'hydrogène régnant lors de l'altération, les météorites chondritiques (conditions anoxiques) fournissent alors un analogue unique, et encore peu exploité à ce jour, pour appréhender les réactions et paramétrer les transferts élémentaires opérant lors de l'altération d'un système VFA en conditions réductrices. L'autre avantage des météorites réside dans la diversité des signatures isotopiques (Fe, O, D/H, etc) des phases minérales primaires et secondaires permettant ainsi de tracer les échanges élémentaires réels lors des réactions d'oxydation ou d'hydratation affectant le métal ou le verre.

## INCINÉRATION DES DÉCHETS MÉNAGERS

*Collaboration* : HAGANIS (Metz)  
*Financement* : HAGANIS et région Lorraine

La gestion des déchets étant un enjeu sociétal prioritaire, nous poursuivrons nos travaux entrepris dans le précédent quadriennal sur l'incinération des déchets ménagers et les sujets connexes.



## ***Suivi des émissions atmosphériques d'un incinérateur en milieu urbain et péri-urbain***

La ville de Metz s'est équipée d'un incinérateur d'ordure ménagère ou une usine de valorisation énergétique (UVE) de nouvelle génération en 2001. Nous continuerons nos travaux de suivi de cet incinérateur entrepris depuis 2001 en partenariat avec HAGANIS, la société qui opère l'UVE. Nous nous focaliserons sur l'étude cristallographique et isotopique (mercure, sélénium, soufre et carbone) des gaz et des

particules PM10, dans le but de suivre l'évolution des retombées atmosphériques en milieu urbain et péri-urbain de cette UVE. L'objectif sera de déterminer les flux d'émissions de l'incinérateur et de les comparer aux retombées atmosphériques totales en différents points de la région étudiée afin d'estimer la contribution relative des émissions de l'UVE à la chimie globale des gaz et des aérosols de la région messine.

### ***Carbonatation ex-situ des résidus d'incinération des déchets ménagers***

Outre ce suivi, nous nous intéresserons tout particulièrement pour ce quadriennal à tester, à l'échelle du laboratoire et du pilote industriel, la faisabilité et le rendement i) de minéralisation du CO<sub>2</sub> par carbonatation de résidus ultimes issus de l'incinération des ordures ménagères, et ii) de leur transformation en un produit valorisable en génie civil (graves, remblais, techniques routières, etc). On envisage ici de convertir, certains déchets minéraux en carbonates, pour immobiliser le CO<sub>2</sub> de façon pérenne.

Les REFOM (Résidus d'Épurations des Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères) et les MIOM (Mâchefers d'Incinération des Ordures Ménagères), sont des matières anthropiques dont la forte réactivité peut résulter de leur finesse, mais plus généralement du fait qu'ils ont issus d'un enchaînement réactionnel (fusion, évaporation, hydratation, condensation, précipitation, oxydation, réduction, etc...) figé

dans un état hors équilibre. Leur minéralogie est complexe et les paragenèses échappent aux règles habituelles d'associations minérales. Riche en Ca, Fe, Mg, Na et K, ces résidus ultimes sont dotés de propriétés texturales, minéralogiques et chimiques, telles qu'ils pourraient très efficacement piéger le CO<sub>2</sub> sous forme de carbonates, la vapeur d'eau servant de catalyseur. Outre la stabilisation des résidus ultimes par carbonatation (diminution de la porosité, de la perméabilité et de l'alcalinité avec augmentation de la résistance mécanique), cette voie de piégeage ex-situ du CO<sub>2</sub> offre l'avantage d'immobiliser dans divers composés carbonatés la plupart des éléments polluants, notamment les métaux amphotères (Pb, Zn, etc...). La carbonatation a donc en plus, un rôle bénéfique sur le comportement à long terme de ces déchets ultimes en diminuant considérablement leur impact environnemental, et en offrant la possibilité de les valoriser.

## **VERRE ET CRISTAL**

*Collaboration* : Cristalleries de S' Louis, Baccarat, Daum

*Financement* : Cristallerie de S' Louis, REVELOR

Fleurons industriels de la région lorraine, verre et cristal n'en sont pas moins des matériaux complexes. Nous appliquons ici à des fins industrielles nos connaissances fondamentales sur les réactions d'oxydo-réduction acquises à haute température dans les silicates fondus.

### ***Traitement et valorisation des rebuts de cristal***

Les cristalliers lorrains, fabricant d'articles en cristal (verres, brocs, carafes, lustres...), produisent chaque année des rebuts en quantité importante. De par la législation actuelle, ces verres, contenant du plomb en quantité importante (près de 27 pds% PbO), ne peuvent être rebuté en l'état mais nécessitent un stockage en site de stockage créant un surcoût onéreux pour les entreprises. Outre le plomb, ces verres contiennent également d'autres éléments en abondance variable et utilisés comme éléments colorants. Sans que la liste soit exhaustive, il s'agit du cobalt, du cuivre, du chrome, du nickel, de l'antimoine, du fer, de l'uranium, du sélénium et de l'arsenic. Ces éléments pouvant être eux aussi

des polluants potentiels, l'entreprise cherche également à les valoriser.

Dans le cadre d'un partenariat avec ces entreprises et sous l'égide de REVELOR, nous nous proposons d'extraire le plomb du cristal (verre au plomb) en vue de sa réutilisation ultérieure et de recycler le verre résiduel en un verre «propre» sans plomb. La méthode que nous proposons consiste à effectuer une réduction du cristal à une température légèrement supérieure à celle de la température de transition vitreuse (T<sub>g</sub>) et une ségrégation gravitaire de la fonte de plomb métal ainsi formé. Ce procédé de retraitement, qui permettra à terme de valoriser les rebuts de verre en calcin propre et le plomb sous forme métallique, est à moindre coût financier et sans risque de pollution pour l'environnement.



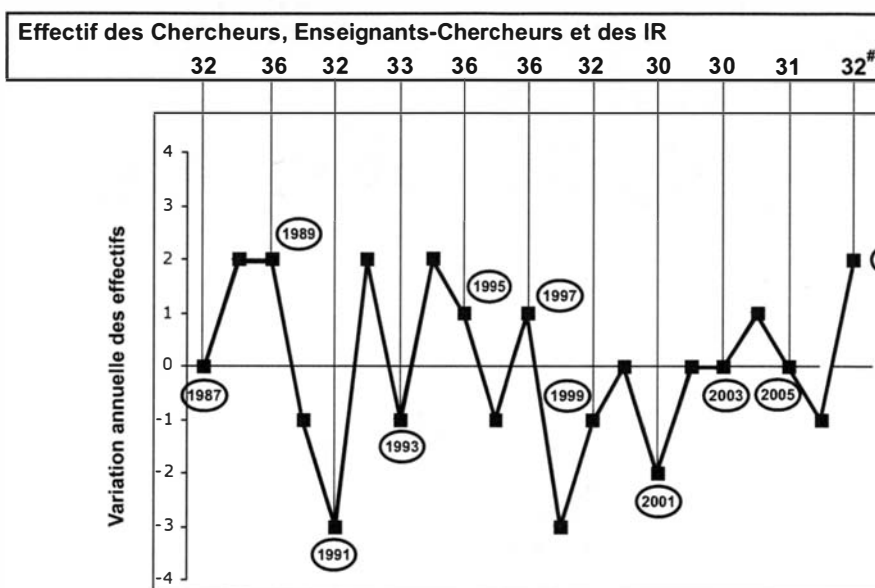
**LES ACTIVITÉS DES CHERCHEURS,  
ENSEIGNANTS-CHERCHEURS ET  
INGÉNIEURS DE RECHERCHE**

Les publications des agents sont présentées suivant la méthode d'évaluation par quartiles utilisée par la section 18 du Comité National du CNRS.

Le premier quartile (A1) correspond aux revues ayant un impact factor supérieur ou égal à 1,6  
 Le deuxième quartile (A2) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 1 et 1,6  
 Le troisième quartile (A3) correspond aux revues ayant un impact factor compris entre 0,6 et 1  
 Le quatrième quartile (B) correspond aux revues ayant un impact factor inférieur à 0,6

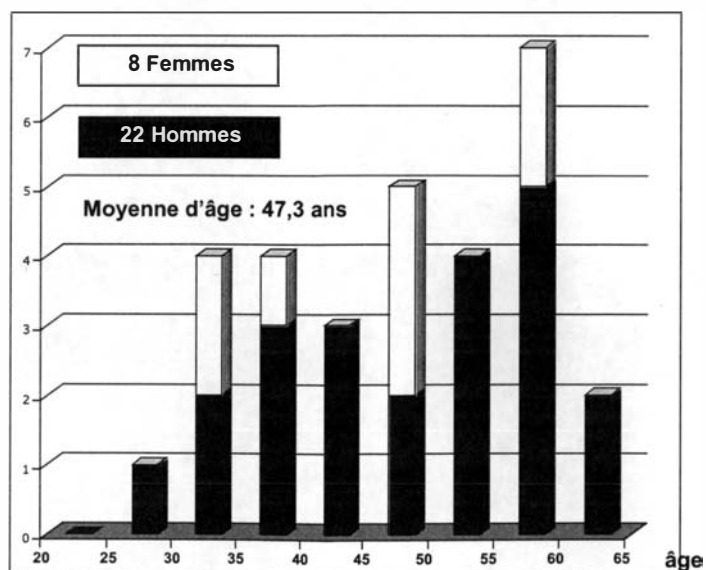
(\*) indique les Chercheurs, Enseignants-Chercheurs et les IR présentés pour la première fois dans le rapport d'activité du CRPG

### Evolution de l'effectif des Chercheurs, Enseignants-Chercheurs et les IR entre 1987 et 2007



# : cet effectif de 33 prend en compte l'intégration prochaine de 2 agents nouvellement recrutés (G. Caro, CR2-CNRS et P. Colon MC ENSG-INPL) d'une mutation vers le CRPG (J. Lavé CR1-CNRS) et d'une mutation pour Rennes (Christian Le Carlier de Veslud, IR2-CNRS).

### Répartition des âges pour les Chercheurs, Enseignants-Chercheurs et les IR





**PIERRE BARBEY**

**60 ans**

**PRCE1, Univ. Henri Poincaré-Nancy1, 35<sup>ème</sup> section CNU**

**Equipe Pétrologie**

**Centre d'intérêt**

Processus magmatiques (granites) et métamorphiques (granulites/migmatites), genèse et évolution de la croûte continentale (Archéen, Protérozoïque, Varisque)

**Enseignement**

Niveau Licence, master

- 2003-2004: 198h (décharge de 1/2 du service statutaire de 192h eqTD)
- 2004-2005: 195h (décharge de 1/2 du service statutaire de 192h eqTD)
- 2005-2006: 160h (décharge de 1/2 du service statutaire de 192h eqTD)
- 2006-2007: 83h (décharge des 2/3 du service statutaire de 192h eqTD)

**Encadrement de thèses**

Elsa Pupier : co-encadrement avec M. Toplis (CRPG, OMP-Toulouse). Thèse de l'Université H. Poincaré-Nancy1. Soutenance en 2006.

Francesca Micheletti : co-encadrement avec A. M. Fornelli (Univ. Bari). Thèse de Doctorat en cotutelle Universités de Bari et de Nancy I. Soutenance en 2005.

Clément Yonta-Ngouné - 2005 - ....., co-encadrement avec C. Nkoubou (Univ. Yaoundé, Cameroun). Cotutelle Universités de Yaoundé et de Nancy I.

Yvan Denele - 2004 - ....., co-encadrement: G. Gleizes, P. Olivier (LMTG de Toulouse)

Raymond Enjolvy - 2004 - ....., co-encadrement: P. Monié, C. Delors (Géosciences Montpellier).

**Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

- Chargé de mission au Département STUE de la MSTP (2003-2006)
- Directeur scientifique du Département STUE de la MSTP (septembre 2006 à juin 2007)
- Chargé de mission à la DGRI - département sectoriel A1 (Direction générale de la recherche et de l'Innovation).

**Curriculum vitae succinct**

- Doctorat ès Sciences Naturelles (THF) - Université de Nancy I (1982)
- Bénéficiaire de la PEDR
- Rayonnement scientifique : 89 publications comprenant notamment 42 publications de rang AE, 16 de rang AF et 4 chapitres de livres. Encadrement de 15 thèses de doctorat. Je suis reconnu internationalement pour mes travaux sur les migmatites. Le nombre de citations de mes travaux est de 1074 au 01-02-2007 (Web of Science).
- Activités pédagogiques et administratives sur les 5 dernières années. En matière d'enseignement, j'ai publié en collaboration un ouvrage pédagogique destiné aux étudiants (collection SGF des Editions GB, Paris). J'ai pris en charge la coordination des projets de Licence et de Master en Sciences de la Terre à l'UHP, dans le cadre de la mise en place du LMD. En matière de gestion de la recherche et de la pédagogie, j'ai assuré une charge assez lourde (chargé de mission, membre de Conseil Scientifique, responsable de Département pédagogique, responsable d'équipe et de thème au CRPG, etc...)

**Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

Travaux sur la fusion partielle dans la croûte continentale

**Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 61

Nombre de citations : 1060

H-Index : 18

## Toutes les publications de 2004 à 2007

### A1

- Barbey P.** (2007). Diffusion-controlled biotite breakdown reaction textures at the solid/liquid transition in the continental crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **154**, 707-716.
- Cagnard F., Gapais D., **Barbey P.** (2007) Collision tectonics involving juvenile crust: the example of the southern Finnish Svecofennides. *Precambrian Res.*, **154**, 125-141.
- Micheletti F., **Barbey P.**, Fornelli A., Piccarreta G., Deloule E. (2007) Latest Precambrian to Early Cambrian U-Pb zircon ages of augen gneisses from the Calabria (Italy), with inference to the Alboran microplate in the evolution of the peri-Gondwana terranes. *Intern. J. Earth Sci.*, **96**, 843-860.
- Gleizes G., Crevon G., Asrat A., **Barbey P.** (2006) Structure, age and mode of emplacement of the Hercynian Borderes-Louron pluton (Central Pyrenees, France). *Intern. J. Earth Sci.*, **95**, 1039-1052.
- Pons J., **Barbey P.**, Nachit H., Burg J. P. (2006) Development of igneous layering during growth of pluton: The Tarçouate Laccolith (Morocco). *Tectonophysics*, **413**, 271-286.
- Barbey P.**, Ayalew D., Yirgu G. (2005) Insight into origin of gabbro-dioritic cumulo-phyric aggregates from silicic ignimbrites: Sr and Ba zoning profiles of plagioclase phenocrysts from Oligocene Ethiopian Plateau rhyolites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **149**, 2, 233-245
- Asrat A., **Barbey P.**, Ludden J., Reisberg L., Gleizes G., Ayalew D. (2004) Petrology and isotope geochemistry of the Pan-African Negash Pluton, Northern Ethiopia: mafic-felsic magma interactions during the construction of shallow-level calc-alkaline plutons. *J. Petrol.*, **45**, 6, 1147-1179

### A2

- Dereje A., Marty B., **Barbey P.**, Yirgu G., Ketefo E. (2006) Sub-lithospheric source for Quaternary alkaline Tepi shield, southwest Ethiopia. *Geochem. J.* **40**, 47-56.

### A3

- Nkoumbou C., Yonta Ngouné C., Villiéras F., **Barbey P.**, Njopwouo D., Yvon J. (sous presse). Petrogenesis of amphibole pyroxenites from the Pan-african Youndé group (Cameroon): geodynamic implications. *J. Af. Earth Sci.*
- Barbey P.**, Macaudière J., Maignac C., Jabbori J. (2005) Les concentrations à sillimanite du Sud de Velay et l'évolution P-T-t fini-hercynienne dans le Massif central (France). *C. R. Géoscience*, **337**, 872-879.
- Barbey P.**, Oberli F., Burg J. P., Nachit H., Pons J., Meier M. (2004) The Paleoproterozoic in western Anti-Atlas (Morocco): a clarification. *J. Af. Earth Sci.*, **39**, 239-245.
- Laumonier B., Autran A., **Barbey P.**, Cheilletz A., Baudin T., Cocherie A., Guerrot C. (2004) Conséquences de l'absence de socle cadomien sur l'âge et la signification des séries pré-varisques (anté-Ordovicien supérieur) du sud de la France (Pyrénées, Montagne Noire). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **175**, 643-655.

### B

- Barros C. E. M., Macambira M. J. B., **Barbey P.**, Scheller T. (2004) Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Provincia Mineral de Carajes, Brasil: implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**, 351-358.



(\*) SYLVAIN BOURLANGE

**31 ans**

**Maître de Conférence, ENSG/INPL, 35<sup>ème</sup> section CNU**

**Equipe Géodynamique**

**Centre d'intérêt**

Zone de subduction  
Prismes d'accrétion  
Relations fluides/failles  
Géologie marine - Géophysique

**Enseignement**

Géologie Structurale

**Curriculum vitae succinct**

depuis 2004 : maître de conférence ENSG/INPL - CRPG/CNRS  
2000 - 03 : Doctorat spécialité Géodynamique et Physique de la Terre, Paris XI - Relations entre fluides et déformations dans le prisme d'accrétion de Nankai. Laboratoire de géologie de l'ENS (Paris)  
2002 : Agrégation Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Univers  
1999 - 2000 : DEA d'hydrologie, hydrogéologie, géochimie et géostatistiques, mention bien, Paris VI et diplôme de Magistère des Sciences de la terre (MIST)  
1996 - 2000 : Elève à l'ENS de Paris

**Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

**Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 2  
Nombre de citations : 8  
H-Index : 1

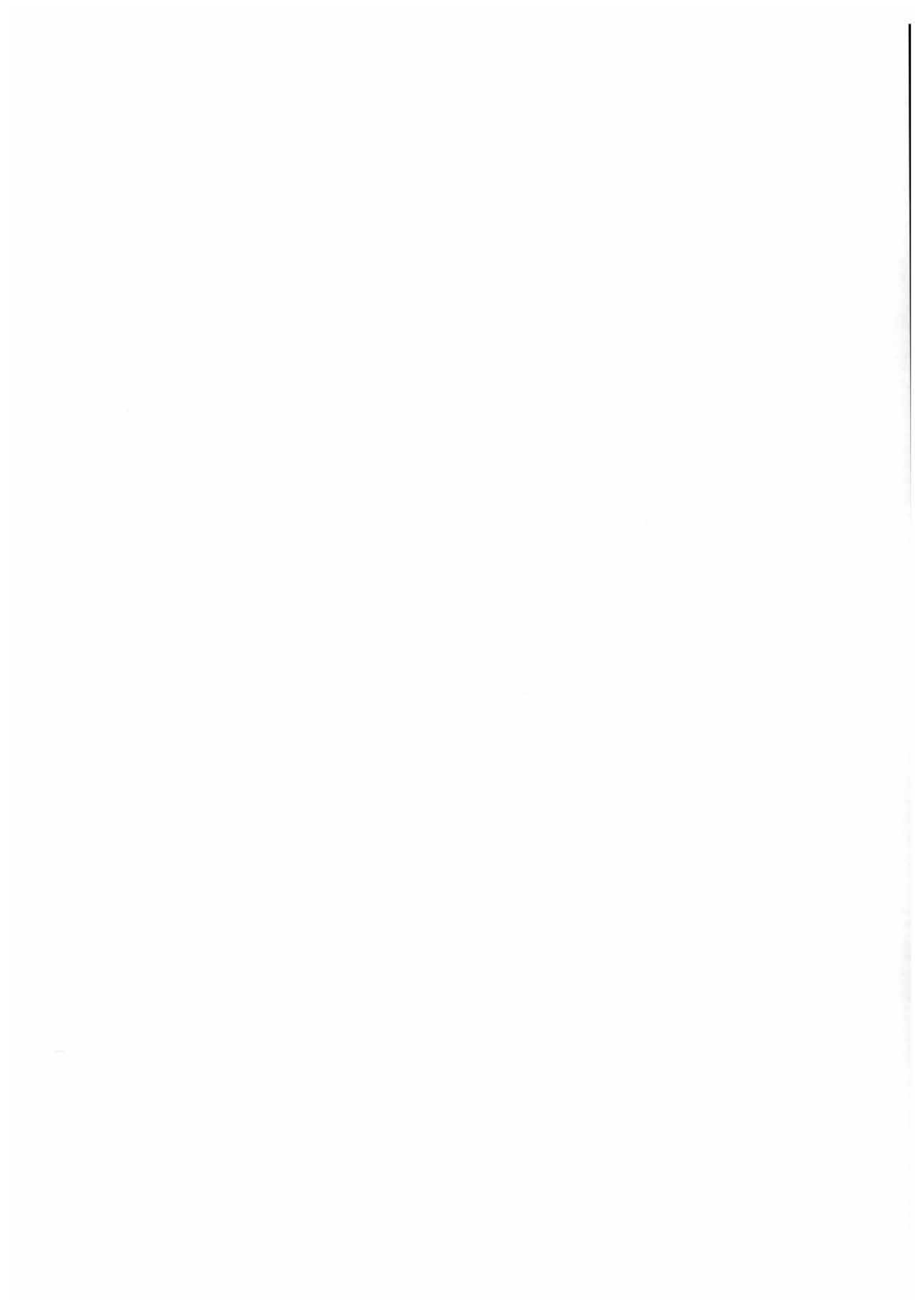
**Toutes les publications de 2004 à 2007**

**A1**

Henry P., **Bourlange S.** (2004) Smectite and fluid budget at Nankai ODP sites derived from cation exchange capacity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **219**, 1-2, 129-145.

**A2**

**Bourlange S.**, Henry P. (2007). Numerical model of fluid pressure solitary wave propagation along the décollement of an accretionary wedge, application to the Nankai wedge. *Geofluids*, **7**, 323-334.

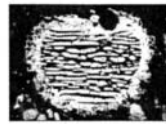




50%



30%



20%

**PETER BURNARD**

**41 ans**

**IR1, CNRS, section 18**

**Equipe Géodynamique**

**Centre d'intérêt**

Etude et analyse des gaz rares

**Enseignement**

Encadrement de deux projets en Mastère et de 5 projets de 2<sup>ème</sup> année ENSG

**Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

- Membre du Conseil de laboratoire du CRPG
- Organisateur des séminaires externes du CRPG d'une fréquence hebdomadaire

**Le transfert des connaissances vers l'industrie et la valorisation de la recherche**

Collaboration avec GV instruments sur développement des spectromètres de masse  
 Collaboration avec le CEA sur le comportement de l'He dans les minéraux fortement endommagé par la radioactivité

**Curriculum vitae succinct**

**Formation universitaire**

1987 : B.S. Chimie Géologie, RHB New College, University of London, England, 1987

1991 : Ph.D. Department of Earth Sciences, University of Manchester, Manchester, England, 1991, Directeur de thèse: Prof. VAUGHAN, David

**Expérience professionnelle:**

depuis 2002 : Ingénieur de Recherche (IR1), Centre de Recherche Pétrographiques et Géochimiques.

2001 - 2002 : Associate Specialist, Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles, California.

1998 - 2001 : Geochemistry Research Fellow, California Institute of Technology, Pasadena, California.

Collaborateur: K. Farley.

1991 - 1998 : Post-doctoral research associate, University of Manchester, Manchester, England.

Collaborateur: G. Turner.

**Professional Memberships:**

American Geophysical Union

Geochemical Society

**Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

Construction des systèmes laser pour l'analyse des gaz rares

**Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 42

Nombre de citations : 478

H-Index : 12

**Toutes les publications de 2004 à 2007**

**A1**

Marty B., Palma R., Pepin R.O., Zimmermann L., Schlutter D., **Burnard P.**, Westphal A., Snead C.J., Bajt S., Becker R.H., Simones J.E. (sous presse). Helium and neon abundances and compositions in cometary matter. *Science*.

Dunai T. J., Stuart F. M., Pik R., **Burnard P.**, Gayer E. (2007). Production of <sup>3</sup>He in crustal rocks by cosmogenic thermal neutrons. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**, 228-236.



- Blard P. H., Pik R., Lavé J., Bourlès D., **Burnard P. G.**, Yokochi R., Marty B., Trusdell F. (2006) Cosmogenic  $^3\text{He}$  production rates revisited from evidences of grain size dependent release of matrix-sited helium. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **247**, 3-4, 222-234.
- Burnard P.**, Harrison D. (2005) Argon isotope constraints on modification of oxygen isotopes in Iceland Basalts by superficial processes. *Chem. Geol.*, **316**, 1-2, 143-156.
- Yamamoto J., **Burnard P.** (2005) Solubility controlled noble gas fractionation during magmatic degassing: implications for noble gas compositions of primary melts of OIB and MORB. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 3, 727-734.
- Yokochi R., Marty B., Pik R., **Burnard P.** (2005) High  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in peridotite xenoliths from SW Japan revisited: evidence for cosmogenic  $^3\text{He}$  released by vacuum crushing. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **G3**, **6**, 1, 1-12.
- Burnard P.** (2004) Diffusive fractionation of noble gases and helium isotopes during mantle melting. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **220**, 3-4, 287-295.
- Burnard P.**, Graham D., Farley K. (2004) Fractionation of noble gases (He, Ar) during MORB mantle melting: a case study on the Southeast Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **227**, 3-4, 457-472.
- Burnard P.**, Polya D. (2004) Importance of mantle derived fluids during granite associated hydrothermal circulation: He and Ar isotopes of ore minerals from Panasqueira. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 7, 1607-1615.
- Hu R. Z., **Burnard P. G.**, Bi X.-W., Zhou M.-F., Pen J.-T., Su W.-C., Wu K.-X. (2004). Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River–Jinshajiang fault belt, SW China. *Chem. Geol.*, **203**, 305-317.



## JEAN CARIGNAN

**42 ans**  
**IR1, CNRS, section 18**  
**Responsable SARM**

### Centre d'intérêt

- développements analytiques - élémentaire et isotopique majeurs et traces
- préparation et caractérisation de matériaux géologiques et environnementaux de référence pour l'analyse géochimique
- cycle géochimique des métaux d'origine naturelle et anthropique
- géochimie isotopique des métaux
- hydrochimie des rivières

### Enseignement

- ENSG/Master -impacts des activités anthropiques et cycle des métaux dans l'environnement
- UHP-Pharmacie/Master santé public et environnement

### Encadrement de thèses

- Agnès Brenot : co-direction avec Christian France-Lanord, CRPG. Soutenance 2005.
- Mathieu Bureau : 2004 - ....., co-direction avec Louis François (FNRS Liège)
- Nicolas Estrade : 2006 - ....., co-direction avec Olivier Donard (CNRS Pau)

### Transfert des connaissances vers l'industrie et la valorisation de la recherche

- analyse et expertise du SARM pour des sociétés privées (Tredi, Lafarge, Cregu, Lhoist, ...)
- analyse et expertise du SARM pour des organismes publics et para-publics (Les Musées de France, CEA, IRSN, IRD, ...)
- collaboration et contractualisation scientifiques avec la région Lorraine, la société HAGANIS, l'ADEME, le BRGM

### Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')

- Membre du Conseil de laboratoire et du Bureau de direction du CRPG
- Membre du Conseil scientifique et Co-animateur scientifique de la ZAM
- Conseil scientifique de AIRLOR
- Comité de l'instrumentation mi-lourds "analyses, mesures, expérimentations" du CNRS
- Membre expert de comités d'audit et d'évaluation de laboratoires CNRS

### Curriculum vitae succinct

- 1992 : PhD Univ. Québec à Montréal (UQAM), Centre de Recherche GEOTOP.  
«Géochimie isotopique du Pb: croissance crustale et métallogénie»
- 1993-94 : stage post-doctoral Univ. de Montréal et Carnegie Institution of Washington - DTM
- 1995 : chercheur associé GEOTOP - UQAM et Université McGill de Montréal.
- 1996 : IR1 CNRS au CRPG. Directeur du Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) du CNRS-INSU.
- 2005 : habilitation à co-encadrer localement des thèses INPL
- 2006-2007 : chargé d'enseignement à la faculté de Pharmacie, UHP.

### Point fort ou action la plus marquante de la carrière

- rayonnement national et international du SARM et animations scientifiques connexes
- géochimie isotopique des métaux et applications environnementales

## Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 58

Nombre de citations : 480

H-Index : 13

## Toutes les publications de 2004 à 2007

### A1

- Cloquet C., **Carignan J.**, Lehmann M.F., Vanhaecke F. (sous presse). Variation in the isotopic composition of zinc in the natural environment and the use of zinc isotopes in biogeosciences. *Anal. Bioanal. Chem.*
- Pik R., Marty B., **Carignan J.**, Yirgu G., Ayalew T. Timing of East African Rift development in Southern Ethiopia: Implication for mantle plumes activity and evolution of topography. *Geology*. accepté.
- Vigier N., Decarreau A., Millot R., **Carignan J.**, Petit S., France-Lanord C. Quantifying Li isotope fractionation during smectite formation and implications for the Li cycle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, accepté, en révision.
- Brenot, A., **Carignan, J.**, France-Lanord, C., Benoit, M. (2007). Geological and land use controls on  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of river dissolved sulfate : the Moselle river basin, France. *Chem. Geol.*, **244**, 25-41.
- Carignan J.**, Vigier N., Millot R. (2007) Three secondary reference materials for Lithium isotope measurements: Li7-N, Li6-N and LiCl-N solutions. *Geostand. Geoanal. Res.*, **31**, 1, 7-12.
- Carignan J.** and Wen H. (2007) Scaling NIST SRM 3149 for Se isotope analysis and isotopic variations of natural samples. *Chem. Geol.*, **242**, 347-350.
- Wen H. and **Carignan J.** (2007). Reviews on atmospheric selenium: emissions, speciation and fate. *Atmos. Environ.*, **41**, 7151-7165.
- Baron S., **Carignan J.**, Laurent S., Ploquin A. (2006) Medieval lead making on Mont-Lozère Massif (Cévennes-France): tracing ore sources using Pb isotopes. *Ap. Geochem.*, **21**, 214-252.
- Baron S., **Carignan J.**, Ploquin A. (2006) Heavy metals (oids) dispersion in soils from a 800 years old pollution (Mont-Lozère, France). *Environ. Sci. Technol.* **40**, 5319-5326.
- Bayon, G., Vigier, N., Burton, K.W., Brenot, A., **Carignan, J.**, Etoubleau, J., Chu, N.-C. (2006) The control of weathering processes on riverine and seawater hafnium isotope ratios. *Geology*, **34**, No 6, 433-436.
- Cloquet C., **Carignan J.**, Libourel G. (2006) Atmospheric pollutant dispersion around an urban area using trace metal concentrations and Pb isotopic compositions in epiphytic lichens. *Atmos. Environ.*, **40**, 3, 574-587.
- Cloquet, C., **Carignan J.**, Libourel, G. (2006) Isotopic composition of Zn and Pb atmospheric depositions in an urban/peri-urban area of northeastern France. *Environ. Sci. Technol.* **40**, 6594-6600.
- Cloquet, C., **Carignan, J.**, Libourel, G., Sterckeman, T., Perdrix, E. (2006) Tracing source pollution in soils using cadmium and lead isotopes. *Environ. Sci. Technol.* **40**, 2525-2530.
- Kraml, M., Pik, R., Rahn M., **Carignan, J.**, Keller, J. (2006) A new multi-mineral age reference material for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , (U-Th)/He and FT dating methods: the Limberg t3 tuff. *Geostand. Geoanal. Res.*, **30**, N°2, 73-86.
- Rose-Koga, E.F., Sheppard, S.M.F., Chaussidon, M., **Carignan, J.** (2006) Boron isotopic composition of atmospheric precipitations and liquid-vapour fractionation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 1603-1615.
- Sterckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Proix N., Schvartz C., **Carignan J.** (2006) Trace element distributions in soils developed in loess deposits from northern France. *Eur. J. Soil Sci.*, **57**, 392-410.
- Wen, H., **Carignan, J.**, Qiu, Y., Liu S. (2006) Selenium speciation in kerogen from two Chinese selenium deposits: environmental implications. *Environ. Sci. Technol.* **40**, 1126-1132.
- Baron S., Lavoie E., Ploquin A., **Carignan J.**, Pulido M., De Beaulieu J. L. (2005) Record of metal workshops in peat deposits: history and environmental impact on the Mont Lozère Massif, France. *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 14, 5131-5140.
- Carignan J.**, Libourel G., Cloquet C., Le Forestier L. (2005) Lead isotopic composition of fly ash and flue gas residues from municipal solid waste combustors in France: implications for atmospheric lead source tracing. *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 2018-2024.
- Cloquet C., Rouxel O., **Carignan J.**, Libourel G. (2005) Natural Cadmium isotopic variations in eight geological reference materials (NIST 2711, BCR 176, GSS 1, GXR-1, GXR-2, Nod-P-1, Nod-A-1) and anthropogenic samples, measured by MC-ICP-MS. *Geostan. Geoanalyt. Res.*, **29**, 1, 95-106.
- Carignan J.**, Cardinal D., Eisenhauer A., Galy A., Rehkämper M., Wombacher F., Vigier N. (2004) A reflection on Mg, Cd, Ca, Li and Si isotopic measurements and related materials. *Geostand. Geoanal. Res.*, **28**, 1, 139-148.

### A3

- Wen H., **Carignan J.**, Hu R., Fan H., Chan B., Yang G. (2007). Large Selenium isotopic variations in the Yutangba Se deposit, Hubei Province and its implication for Se enrichment. *Chinese Sci. Bull.*, **52**, 2443-2447.
- Chabaux F., Riotte J., Schmitt A. D., **Carignan J.**, Herckes P., Pierret M. C., Wortham H. (2005) Variations of U and Sr isotope ratios in Alsace and Luxembourg rain waters: origin and hydrogeochemical implications. *C. R. Géoscience*, **337**, 1447-1456.

**29 ans**  
**CR2, CNRS, section 18**  
**Equipe Géochimie**

**Centre d'intérêt**

Évolution précoce de la Terre et des planètes telluriques

**Enseignement**

2004 – 2005 : ATER mi-temps, Université Denis Diderot Paris 7 (Enseignement Licence-Master)  
2001 – 2003 : Monitorat au Palais de la Découverte (Paris), environ 160 heures de conférences en Sciences de la Terre destinées aux élèves de classes primaires, collèges et lycées.

**Curriculum vitae succinct**

**Cursus Universitaire**

2005 : Doctorat Géochimie fondamentale et appliquée, Université Paris 7. Mention très Honorable avec les félicitations du jury. Thèse soutenue le 7 Juillet 2005  
2001 : DEA Géochimie fondamentale et appliquée, Université Paris 7. Mention Très Bien.  
2001 : Magistère Sciences de la Terre, Ecole Normale Supérieure de Lyon. Mention Bien  
1998 : DEUG Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Lyon 1. Mention Bien

**Recherche**

2005 - 2007 Postdoc, Geological and Planetary Science Division, *California Institute of Technology*, USA. Collaboration avec D. A. Papanastassiou et G. J. Wasserburg.  
2001 - 2005 Thèse de doctorat, Laboratoire Géochimie-Cosmochimie, *Institut de Physique du Globe de Paris*, France. Thèse dirigée par Bernard Bourdon (Pr.) et Jean-Louis Birck (DR). Titre : "Radioactivité éteinte du  $^{146}\text{Sm}$  et différenciation précoce du manteau terrestre".

**Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 11  
Nombre de citations : 77  
H-Index : 4

**Toutes les publications de 2004 à 2007**

**A1**

**G. Caro**, V. Bennett, B. Bourdon, T. M. Harrison and S. Mojzsis Precise measurements of  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  in small samples: applications to inclusions in diamonds from Finsch and Hadean zircons from Jack Hills. *Chemical Geology (in Press)*  
**G. Caro**, B. Bourdon, J.L. Birck & S. Moorbath (2006). High-precision  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  measurements in terrestrial rocks: Constraints on the early differentiation of the Earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **70**, 164-191.

**G. Caro**, B. Bourdon, B.J. Wood & S. Corgne (2005). Trace element fractionation in Hadean mantle generated by melt segregation from a magma ocean. *Nature* **436**, 246-249.  
M.G. Kopylova & **G. Caro** (2004) Mantle xenoliths from the Southeastern Slave craton: Evidence for chemical zonation in a thick cold lithosphere. *Journal of Petrology* **45** (5), 1045-1067.

**A2**

**G. Caro**, M.G. Kopylova & R. Creaser (2004) The hypabyssal kimberlite of the Gahcho Kue cluster, Southeastern Slave craton, Northwest Territories, Canada : A granite contaminated Group-I kimberlite. *The Canadian Mineralogist* **42**, 183-207.

**A3**

B. Bourdon, **G. Caro**. The early terrestrial crust, *Compte-rendus de l'Academie des Sciences (in Press)*





(\*) **GUILLAUME CAUMON**

**30 ans**

**Maître de Conférence, ENSG/INPL, 35<sup>ème</sup> section CNU  
Equipe Géodynamique**

**Centre d'intérêt**

Modélisation tridimensionnelle des objets géologiques et géostatistique

**Enseignement**

Géologie numérique.  
Géostatistique  
Programmation  
Mathématiques appliquées.  
Géologie de terrain

**Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

Responsable de l'option géologie numérique à l'ENS Géologie  
Directeur scientifique du Consortium de Recherche Gocad  
Membre du Conseil de laboratoire du CRPG.

**Curriculum vitae succinct**

Depuis 2004 : Maître de conférences, ENSG-INPL / CRPG-CNRS  
2003-2004 : Postdoc, Stanford University (Petroleum Engineering Dept.)  
2003 : Thèse INPL-CRPG "Représentation, visualisation et modification de modèles volumiques pour les Géosciences", sous la direction de Jean-Laurent Mallet.  
1999 : Diplôme d'ingénieur ENSG ; DEA Physique et Chimie de la Terre, INPL-CRPG.

**Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 2  
Nombre de citations : 6  
H-Index : 1

**Toutes les publications de 2004 à 2007**

**A3**

Fetel E. and **Caumon G.** (sous presse). Reservoir flow uncertainty assessment using response surface constrained by secondary information. *J. Petrol. Sci. and Eng.*

**G. Caumon**, B. Lévy, L. Castanié and J.-C. Paul, 2005. Visualization of grids conforming to geological structures: a topological approach. *Computers and Geosciences*, **31**, 671-680.

**G. Caumon**, F. Lepage, C. Sword and J.-L. Mallet, 2004. Building and Editing a Sealed Geological Model. *Mathematical Geol.* **36**, 405-424.





## FRANÇOISE CHALOT-PRAT

**55 ans**

**Maître de Conférence Hors Classe, UHP-Nancy1, 35<sup>ème</sup> section CNU**

**Equipe Pétrologie**

### Centre d'intérêt

- Genèse des magmas basiques et caractérisation des sources par études de cas naturels et par expérimentation HT-HP
- Différenciation du manteau lithosphérique par études de cas naturels et par expérimentation HT-HP

### Enseignement

2006-07 : 182h équiv TD

2005-06 : 68h équiv TD + Décharge pour Congé pour Recherche et Conversion Thématique

2004-05 : 229h équiv TD

2003-04 : 229h équiv TD

Thèmes enseignés :

Pétrologie magmatique et mantellique

Structure de la Terre

Histoire géologique ante-alpine de l'Europe

Stage de Cartographie en domaine magmatique et métamorphique (55 étudiants)

Traversée des Alpes (44 étudiants)

### Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')

- membre du conseil de l'UFR STMP (élue jusqu'en 2005)
- responsable de la Géologie dans la filière Formation des Professeurs de SVT depuis 1995

### Curriculum vitae succinct

1976 : Thèse 3<sup>ème</sup> Cycle Sciences de la Terre, Université de Caen

1976-1979 : Post-Doc à l'École Polytechnique de MONTREAL (CANADA)

1981-1988 : Maître Assistante au Département des Sciences de la Terre sur contrat de Coopération Scientifique et Technique, à la Faculté des Sciences de Fes (MAROC)

1988-1989 : Congé pour études à l'Université P. et M. Curie (Paris VI), rédaction thèse

1990 : Thèse Sciences de la Terre de l'Université de Paris VI

depuis 1989 : Maître de Conférences au Département des Sciences de la Terre de l'Université Henri Poincaré de Nancy rattachée au CRPG, UPR 2300 du CNRS

### Point fort ou action la plus marquante de la carrière

- Découverte de calcio-carbonatites et de leur relation d'immiscibilité avec des liquides silicatés dans du manteau lithosphérique (Chalot-Prat & Arnold, *Lithos*, 1999)
- Découverte d'un ancien fragment d'océan, et proposition d'un nouveau modèle de construction du plancher océanique à la zone axiale d'un océan à croissance lente (Chalot-Prat, *GSA*, 2005)

### Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 11

Nombre de citations : 85

H-Index : 4

### Toutes les publications de 2004 à 2007

#### A1

Extebarria M., Chalot-Prat F., Apraiz A., Eguluz L. (2006) Birth of a volcanic passive margin in Cambrian time: Rift paleogeography of the Ossa-Morena Zone, SW Spain. *Precambrian Res.*, **147**, 366-386.



Alexandre P., **Chalot-Prat F.**, Saintot A., Wijbrans J., Stephenson R., Wilson M., Kithcka A., Stovba S. (2004)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of magmatic activity in the Donbass foldbelt and the Scythian platform (Eastern European Craton). *Tectonophysics*, **23**, 15.

Tikhomirov P. L., **Chalot-Prat F.**, Nazarevitch B. P. (2004) Triassic volcanism in the eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. *Tectonophysics*, **381**, 119-142.

### A3

Gasquet D., Chevremont P., Baudin T., **Chalot-Prat F.**, Guerrot C., Cocherie A., Roger J., Hassenforder B., Cheilletz A. (2004) Polycyclic magmatism in the Tagragra d'Akka and Kerdous-Tafeltast inliers (Western Anti-Atlas, Morocco). *J. Af. Earth Sci.*, **39**, 267-275.

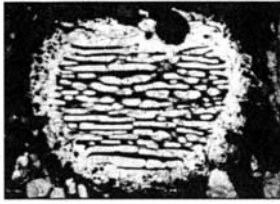
### B

**Chalot-Prat F.**, Tikhomirov P.L, Saintot A. (2007). Devonian and Triassic basalts from the southern continental margin of the East European Platform, tracers of a same heterogeneous lithospheric mantle source. *J. Earth Syst. Sci.* **116**, 469-492.

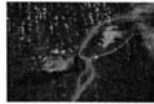
## Chapitre d'ouvrages

**Chalot-Prat F.** (2005) An undeformed ophiolite in the Alps: Field and geochemical evidence for a link between volcanism and shallow plate tectonic processes. In: *Plates, plumes and paradigms*, (881 p.). 388), *The Geological Society of America*. 751-780.

Saintot A., Brunet M. F., Yakovlev F., Sébrier M., Stephenson R., Ershov A., **Chalot-Prat F.**, Mc Cann T. (2006). The Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Greater Caucasus. From Gee DG & Stephenson RA (eds) 2006. *European Lithosphere Dynamics*. *Geological Society, London, Memoirs*, 32, 277-289.



80%



20%

**MARC CHAUSSIDON**

**46 ans**

**DR2, CNRS, section 18**

**Équipe Géochimie**

#### **Centre d'intérêt**

Mes activités de recherche récentes et actuelles sont essentiellement tournées vers deux domaines : la Terre primitive et la cosmochimie. Mon approche est principalement fondée sur l'étude des variations des compositions isotopiques dans les objets naturels et ma particularité est de développer une approche analytique par sonde ionique qui donne accès à des échelles d'analyse isotopique comparables aux échelles d'analyse minéralogique et pétrographiques.

#### **Enseignement**

J'enseigne à l'ENSG de Nancy (cours +TD de 25 heures d'introduction à la géochimie en 1<sup>ère</sup> année de l'ENSG, encadrement de stages de recherche) et je suis responsable d'un module du master de Nancy et je participe au master Nantes-Nancy. J'enseigne aussi ponctuellement (6h) en prepa-CAPES et dans le Master de l'ENS de Lyon (6h).

#### **Encadrement de thèses**

Laure Sangély : co-direction avec Raymond Michels (G2R, Nancy). Soutenance 2004.  
Céline Pisapia : co-direction avec Christian Mustin (LIMOS, Nancy). Soutenance 2006.  
Johana Marin : 2006 - ....., co-direction avec François Robert (MNHN, Paris).  
Johan Villeneuve : 2006 - ....., co-direction avec Guy Libourel (CRPG)

#### **Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

- Co-responsable du service national de sonde ionique de l'INSU-CNRS
- Membre du Conseil Scientifique du CRPG
- Membre nommé du groupe ad-hoc «Système Solaire & Plasmas Spatiaux» du CNES 2001-2005.

#### **Curriculum vitae succinct**

1988 - Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine soutenue le 21 juin : «Géochimie du soufre dans le manteau et la croûte océanique: apports de l'analyse isotopique in situ par sonde ionique», 147p. (Directeurs S.M.F. Sheppard & F. Albarède).  
1988 : Chargé de Recherche CR2 au CNRS (affecté au CRPG UPR 6821).  
1992 : Chargé de Recherche CR1 au CNRS.  
1998 : HDR INPL «Cosmochimie et géochimie du bore» 262p.  
1998 : Directeur de Recherche DR2 au CNRS.

#### **Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

- cycles géochimiques des éléments (S, B et H<sub>2</sub>O) - développement de nouveaux traceurs paléoenvironnementaux (isotopes de l'oxygène dans les aérosols, isotopes du B et de l'O dans les coraux, ...)
- développement de l'analyse isotopique de la matière carbonée des météorites et des roches terrestres archéennes
- cosmochimie des éléments Li-Be-B et découverte des radioactivités éteintes du <sup>10</sup>Be et du <sup>7</sup>Be, origine des radioactivités éteintes, formation des premiers solides dans la nébuleuse
- premières mesures à l'échelle du grain de la composition isotopique de H, Li, C, N et O dans le vent solaire piégé dans les sols lunaires
- nouvelles contraintes sur la température des océans archéens à partir des isotopes du silicium.

#### **Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 110  
Nombre de citations : 1608  
H-Index : 22

## Toutes les publications de 2004 à 2007

### A1

- Krot A.N., Yurimoto H., Hutcheon I.D., **Chaussidon M.**, MacPherson G.J., Paque-Heather J. (2007). Remelting of refractory inclusions in the chondrule-forming regions: evidence from chondrule-bearing type C calcium-aluminum-rich inclusions from Allende. *Meteor. & Planet. Sci.* **42**, 1197-1219.
- Krot A.N., Yurimoto H., Hutcheon I.D., Libourel G., **Chaussidon M.**, Tissandier L., Petaev M.I., MacPherson G.J., Paque-Heather J., and Wark D. (2007). Type C CAIS from Allende: Evidence for multistage formation. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **71**, 4342-4364.
- Pisapia C., **Chaussidon M.**, Mustin C., Humbert B. (2007) O and S isotopic composition of dissolved and attached oxidation products of pyrite by Acidithiobacillus ferroxidans: Comparison with abiotic oxidations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 2474-2490.
- Robert F. & **Chaussidon M.** (2007) Reply to the comment on « A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes » by Kasting et al. *Nature* **447**, E1-E2.
- Sangély L., **Chaussidon M.**, Michels R., Brouand M., Cuney M., Huault V. and Landais P. (2007) Micrometer scale carbon isotopic study of bitumen associated with Athabasca uranium deposits: Constraints on the genetic relationship with petroleum source-rocks and the abiogenic origin hypothesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**, 378-396.
- Sharp Z. D., Barnes J. D., Brearley A. J., **Chaussidon M.**, Fischer T.P., Kamenetsky V. S. (2007) Chlorine isotope homogeneity of the mantle, crust and carbonaceous chondrites. *Nature*, **446**, 1062-1065.
- van Zuijlen M., **Chaussidon M.**, Rollion-Bard C., Marty B. (2007) Carbonaceous cherts of the Barberton Greenstone Belt, South Africa: Isotopic, chemical and structural characteristics of individual microstructures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 3, 655-669.
- Beck P., **Chaussidon M.**, Barrat J. A., Gillet P., Bohn M. (2006) Diffusion induced Li isotopic fractionation during the cooling of magmatic rocks: the case of pyroxene phenocrysts from nakhlite meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 18, 4813-4825.
- Brownlee D. et al. 78 co-auteurs (2006) Research article - Comet 81P/Wild 2 under a microscope. *Science*, **314**, 5806, 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 <sup>10</sup>Be and for the possible presence of the short-lived nuclide <sup>7</sup>Be in the early solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 224-245.
- Chaussidon M.**, Robert F., McKeegan K. D. (2006) Reply to the comment by Desch and Ouellette on «Li and B isotopic variations in an Allende CAI: Evidence for the in situ decay of short-lived <sup>10</sup>Be and for the possible presence of the short-lived nuclide <sup>7</sup>Be in the early solar system». *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 21, 5433-5436.
- Krot A. N., Libourel G., **Chaussidon M.** (2006) Oxygen isotope compositions of chondrules in CR chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 3, 767-779.
- Krot A. N., Yurimoto H., McKeegan K. D., Leshin L., Jones R. H., **Chaussidon M.**, Libourel G., Yoshitake M., Huss G. R., Zanda B. (2006) Oxygen isotopic compositions of chondrules. *Chemie der Erde*, **66**, 249-326.
- Lundstrom C. C., Sutton A. L., **Chaussidon M.**, McDonough W. F., Ash R. (2006) Trace element partitioning between type B CAI melts and melilite and spinel: Implications for trace element distribution during CAI formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 13, 3421-3435.
- McKeegan K. D. et al. 47 co-auteurs (2006) Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. *Science*, **314**, 5806, 1724-1728.
- Robert F., **Chaussidon M.** (2006) A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts. *Nature*, **443**, 7114, 969-972.
- Rose-Koga E. F., Sheppard S. M. F., **Chaussidon M.**, Carignan J. (2006) Boron isotopic composition of atmospheric precipitations and liquid-vapour fractionations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 7, 1603-1615.
- Barrat J. A., **Chaussidon M.**, Bohn M., Gillet P., Göpel C., Lesourd M. (2005) Lithium behavior during cooling of a dry basalt: an ion-microprobe study of the lunar meteorite Northwest Africa 479 (NWA 479). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 23, 5597-5609.
- Hashizume K., **Chaussidon M.** (2005) A non-terrestrial <sup>16</sup>O-rich isotopic composition for the protosolar nebula. *Nature*, **434**, 7033, 619-622.
- Kolodny Y., **Chaussidon M.**, Katz A. (2005) Geochemistry of a chert breccia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 2, 427-439.
- Krot A. N., Hutcheon I. D., Yurimoto H., Cuzzi J. N., McKeegan K. D., Scott E. R. D., Libourel G., **Chaussidon M.**, Aléon J., Petaev M. (2005) Evolution of oxygen isotopic composition in the inner solar nebula. *Astrophys. J.*, **622**, 1, 1333-1342.
- Lundstrom C. C., **Chaussidon M.**, Hsui A. T., Kelemen P., Zimmerman M. (2005) Observations of Li isotopic variations in the Trinity ophiolite: evidence for isotopic fractionation by diffusion during mantle melting. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 6, 735-151.
- Sangély L., **Chaussidon M.**, Michels R., Huault V. (2005) Microanalysis of carbon isotope composition in organic matter by secondary ion mass spectrometry. *Chem. Geol.*, **223**, 4, 179-195.
- Semenenko V. P., Jessberger E. K., **Chaussidon M.**, Weber I., Stephan T., Wies C. (2005) Carbonaceous xenoliths in the Krymka LL3.1 chondrite: mysteries and established facts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 2165-2182.
- Beck P., Barrat J. A., **Chaussidon M.**, Gillet P., Bohn M. (2004) Li isotopic variations in single pyroxenes from the Northwest Africa 480 shergottite (NWA 480): a record of degassing of Martian magmas? *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 13, 2925-2933.
- Hashizume K., **Chaussidon M.**, Marty B. (2004) Protosolar carbon isotopic composition: implications for the origin of meteoritic organics. *Astrophys. J.*, **600**, 1, 480-484.

### A3

- Chaussidon M.**, Gounelle M. (2007) Short-lived radioactive nuclides in meteorites and early solar system processes. *C. R. Geosciences*. **339**, 872-884.
- Chaussidon M.**, Robert F. (2007) Formation du système solaire : approche cosmochimique dans le contexte astrophysique. *C. R. Geosciences*. **339**, 859-861.

### B

- Gargaud M., Albarède F., Boiteau L., **Chaussidon M.**, Douzery E., Montmerle T. (2006) Dating methods and corresponding chronometers in astrobiology. *Earth, Moon and Planets*, **98**, 11-38.
- Montmerle T., Augereau J. C., **Chaussidon M.**, Gounelle M., Marty B., Morbidelli A. (2006) Solar system formation and early evolution: the first 100 million years. *Earth, Moon and Planets*, **98**, 39-95.

## Chapitre d'ouvrages

- Chaussidon M.** (2007) Formation of the Solar system: a chronology based on meteorites. In «Lectures in astrobiology II», M. Gargaud, H. Martin & Ph. Claeys eds, Springer. 45-74.
- Chaussidon M.** & Gounelle M. (2006) Irradiation processes in the early solar system in «Meteorites and early solar system II», D. Lauretta and L. Leshin eds, Arizona University press, p 323-339.
- Chaussidon M.** (2005) Chronologie de la formation du système solaire : les informations données par les météorites. In: *Des atomes aux planètes habitables*, Presses Universitaires de Bordeaux 57-78.
- Kolodny Y., **Chaussidon M.** (2004) Boron isotopes in DSDP cherts: fractionation and diagenesis. In: *Hill RJ, Leventhal J, Aizenshtat Z, Baedeker MJ, et al. (Eds), Geochemical Society* 1-14.



## ALAIN CHEILLETZ

**59 ans**

**Professeur ENSG/INPL, 35<sup>ème</sup> section CNU**

**Equipe Géodynamique**

### Centre d'intérêt

Mes activités de recherche portent essentiellement sur la métallogénie et la géodynamique des domaines orogéniques anciens. Mon approche consiste à utiliser les transferts d'éléments chimiques dans la lithosphère et leur concentration sous forme de gisements pour modéliser les évolutions géodynamiques. Les résultats obtenus portent non seulement sur l'établissement de typologies originales (gisements d'émeraudes) ou actualisées (gisements de métaux précieux protérozoïques) mais encore sur la mise en évidence de nouvelles cibles d'exploration stratégique (hercynien des domaines précambriens). Mon originalité est de privilégier l'analyse géochronologique des domaines minéralisés en combinant une analyse détaillée sur le terrain et les outils modernes de laboratoire, sonde ionique et spectrométrie Ar/Ar en particulier.

### Enseignement

J'assure un service de base complet d'enseignement à l'ENSG en pétrologie endogène et métallogénie. Je suis en outre responsable d'un stage de terrain en 2<sup>ème</sup> année (2004-2007), responsable de l'option Génie et Gestion des Ressources Minérales (2004-2007), interrogateur au concours d'entrée de la banque d'épreuves G2E (2004-2007). J'enseigne aussi ponctuellement au Master «Ressources», à l'université Henri Poincaré, ainsi que dans de nombreuses opérations de vulgarisation scientifique (lycées, Société de l'Industrie Minérale).

### Encadrement de thèses

Ewan Pelleter : co-direction avec Dominique Gasquet (Univ. Chambéry). Soutenance en 2007.  
Olivier Rabeau : 2005 - .... co-direction avec Jean-Jacques Roayer (CRPG) et M. Jébrack (UQUAM, Montréal)

### Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')

Membre élu au CA du SIUAP, représentant l'INPL (2003-2007; réélu 2007)  
Responsable de la communication à l'ENSG-INPL (2000-2006)

### Curriculum vitae succinct

1969 à 1972 : Maîtrise de Géologie à la Faculté des Sciences de Nancy et Diplôme d'Etudes Approfondies DEA en Géologie appliquée à l'ENSG-INPL  
1972-1974 : Coopération technique en Haïti au Service d'Étude des Gîtes Minéraux de l'Institut Français de Port au Prince  
1975 : Doctorat de troisième cycle à l'ENSG-INPL. Étude des indices cuprifères de type porphyre dans la péninsule du Nord-Ouest d'Haïti. Dir. JC Samama.  
1984 : Thèse d'Etat INPL-ENSG : Contribution à la géologie du district polymétallique (W-Mo-Cu-Pb-Zn-Ag) du Djebel Aouam (Maroc Central). Application à la prospection des gisements de tungstène. Dir. A. Weisbrod.  
1975-1998 : Assistant puis Maître de Conférences à l'ENSG-INPL  
1989-1990 : CRCT à Queen's University, Ontario, Canada. Thème : Mise en oeuvre de la spectrométrie Ar/Ar dans le cadre de son implantation au CRPG. Missions de terrain au Mexique et au Pérou.  
1998-... : Professeur à l'ENSG-INPL  
2007-2008 : CRCT au Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec et à l'UQAT, Rouyn-Noranda. Thème : Analyse de la ceinture de roches vertes aurifère de l'Abitibi (production 8500t Au depuis cent ans ) dans le cadre de la reprise de l'activité minière mondiale.

### Point fort ou action la plus marquante de la carrière

Gisements d'émeraude dans le monde : analyse typologique, développement du modèle Colombie (direction d'un programme CEE), traçage isotopique H/D et certification d'origine par micro-spectroscopie infrarouge (2 brevets). Thèses Y. Branquet et B. Sabot

- Pyrénées, France : réinterprétation des massifs d'orthogneiss du prétendu socle cadomien de la zone axiale en laccolites ordoviciens. Première publication de mesures d'âges U/Pb par la sonde ionique CAMECA du CRPG. Thèse P. Alexandrov
- Mexique : découverte d'intrusifs de type Adakite en relation avec les gisements Au-Fe. Collaboration UNAM
- Maroc : nouvelle interprétation et datation U/Pb et Ar/Ar des gisements épithermaux à métaux précieux précambriens de l'Anti-Atlas; traçage isotopique (S, Sm-Nd, Re-Os, gaz rares) des sources des métaux. Thèse Levresse. Mise en évidence de systèmes métallogéniques ordoviciens et hercyniens par développement de la géochronologie U/Pb sur zircons magmatiques et hydrothermaux. Thèse E. Pelleter.

### Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 59

Nombre de citations : 472

H-Index : 13

### Toutes les publications de 2004 à 2007

#### A1

- Pelleter E., **Cheilletz A.**, Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., El Hakour A., Deloule E. and Féraud G. (2007) Hydrothermal zircons: a tool for ion microprobe U-Pb dating of gold mineralization (Tamlalt-Menhouhou gold deposit - Morocco). *Chem. Geol.*, **245**, 135-161.
- Gasquet D., Levresse G., **Cheilletz A.**, Azizi-Samir M. R., Mouttaqi A. (2005) Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian-Cambrian transition. *Precambrian Res.*, **140**, 1-2, 157-182.
- De Donato P., **Cheilletz A.**, Barres O., Yvon J. (2004) Infrared spectroscopy of OD vibrators in minerals at natural dilution: hydroxyl groups in talc and kaolinite, and structural water in beryl and emerald. *Ap. Spectros.*, **58**, 5, 521-527.
- Levresse G., **Cheilletz A.**, Gasquet D., Reisberg L., Deloule E., Marty B., Kyser K. (2004) Osmium, sulphur, and helium isotopic results from the giant Neoproterozoic epithermal Imiter silver deposit, Morocco: evidence for a mantle source. *Chem. Geol.*, **207**, 1-2, 59-79.
- Levresse G., Gonzalez-Partida E., Carrillo-Chavez A., Tritla J., Camprubi A., **Cheilletz A.**, Gasquet D., Deloule E. (2004) Petrology, U/Pb dating and (C-O) stable isotope constraints on the source and evolution of the adakite-related Mezcala Fe-Au skarn district, Guerrero, Mexico. *Mineral. Deposita*, **39**, 301-312.

#### A2

- Cheilletz A.**, Pelleter E., Martin-Izard A., Tornos F. (2005) World skarn deposits: skarns of Western Europe. *Econ. Geol. 100th Anniversary Volume*, 1-10.

#### A3

- Pelleter E., **Cheilletz A.**, Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., El Hakour A. Féraud G. (sous presse). The Tamlat-Menhouhou gold occurrence 'Eastern High Atlas, Morocco): a variscan mineralizing event at the northern border of the West African Craton. *J. Af. Earth Sci.*
- Gasquet D., Chevremont P., Baudin T., Chalot-Prat F., Guerrot C., Cocherie A., Roger J., Hassenforder B., **Cheilletz A.** (2004) Polycyclic magmatism in the Tagragra d'Akka and Kerdous-Tafeltast inliers (Western Anti-Atlas, Morocco). *J. Af. Earth Sci.*, **39**, 267-275.
- Laumonier B., Autran A., Barbey P., **Cheilletz A.**, Baudin T., Cocherie A., Guerrot C. (2004) Conséquences de l'absence de socle cadomien sur l'âge et la signification des séries pré-varisques (anté-Ordovicien supérieur) du sud de la France (Pyrénées, Montagne Noire). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **175**, 643-655.
- Le Carlier de Veslud C., Alexandrov P., Cuney M., Ruffet G., **Cheilletz A.**, Virlogeux D. (2004) Thermochronologie <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar et évolution thermique des granitoïdes méso-varisques du complexe plutonique de Charroux-Civray (seuil du Poitou). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **175**, 147-156.
- Zwaan J. C., **Cheilletz A.**, Taylor B. E. (2004) Tracing the emerald origin by oxygen isotope data: the case of Sandawana, Zimbabwe. *C. R. Géoscience*, **336**, 41-48.

#### B

- Ikenne M., Madi A., Gasquet D., **Cheilletz A.**, Hilal R., Mortaji A., Mhaili E. (2005) Petrogenetic significance of podiform chromitites from the Neoproterozoic ophiolitic complex of Bou-Azzer (anti-Atlas Morocco). *Af. Geosci. Rev.* **12**, 131-143.

**(\*) PAULINE COLLON-DROUAILLET**  
intégration au CRPG en septembre 2007  
recrutement MC INPL

**28 ans**  
**MC, ENSG-INPL, 35<sup>ème</sup> section CNU**  
**Équipe Géodynamique**

**Centre d'intérêt**

Modélisation du fonctionnement hydrogéochimique de systèmes géologiques.

**Enseignement**

2004-2005

Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES). 131 h éq. TD – 2<sup>e</sup> cycle : Hydrologie, Géomatique, Aménagement foncier, stages terrain.

sept 2005 – sept 2007

Université de Reims-Champagne-Ardenne (URCA)

112.5 h éq. TD - 1<sup>er</sup> cycle : Hydrogéologie, Géologie générale

78 h éq. TD - 2<sup>e</sup> cycle : Géomatique, Hydrogéologie

2.5 h éq. TD - 3<sup>e</sup> cycle : Prépa Capes

Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG – Nancy)

15h éq. TD - 2<sup>e</sup> cycle : Hydrologie

Lycée Loritz (Nancy)

51 h éq. TD - 1<sup>er</sup> cycle : Hydrologie

A partir de sept 2007 :

Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG – Nancy)

192h éq. TD - 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> cycle : Géologie numérique, Programmation C++, Géomatique, Hydrologie

Lycée Loritz (Nancy)

51 h éq. TD - 1<sup>er</sup> cycle : Hydrologie

**Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

Sept2005-sept 2007

Création, gestion et maintenance du site web du laboratoire GEGENA

Co-responsable de 4 modules d'enseignement de Licence à l'URCA :

GEOL22 : « L'eau à la surface de la Terre »

GEOL23 : « Les métiers de la géologie »

SEN62 : « Sciences Naturelles 2 »

SEN63 : « Sciences Naturelles 3 »

Responsable de 2 modules d'enseignement de Master à l'URCA :

Géomatique 1 : « Introduction à la géomatique »

Géomatique 3 : « Apprentissage d'un logiciel de SIG : MAPINFO® »

A partir de septembre 2007

Responsable du module d'enseignement « C++ » de 2<sup>e</sup> année ENSG

**Curriculum vitae succinct**

2000-2003 : Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL)

1<sup>er</sup> prix de thèse scientifique de la région Lorraine (janvier 2005)

oct. 2003 - janv. 2004 : Ingénieur de recherche, ENSG, INPL, Nancy

fev. 2004-août 2005 : Maître de Conférences contractuel, lab. CEVH, ENGEES, Strasbourg

sept. 2005-sept. 2007 : Maître de Conférences, lab. GEGENA, Univ. Reims (URCA)

sept. 2007 : Maître de Conférences, lab. CRPG, ENSG, Nancy

**Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

Modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain.

Développement de techniques de modélisation globale de type « Réacteurs en Réseaux » (RER) adaptée aux échelles de temps et d'espace des processus hydrogéochimiques.

### Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 3

Nombre de citations : 2

H-Index : 1

### Toutes les publications de 2004 à 2007

#### A1

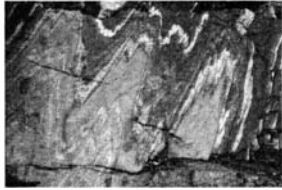
Hamm V., **Collon P.** & Fabriol R. Comparison of two modelling approaches to water quality simulation in a flooded iron mine (Saizerais, Lorraine, France): a semi-distributed model of chemical reactors and a physically-based distributed reactive transport pipe network model. *Journal of Contaminant Hydrology*, accepté avec corrections.

**Collon P.**, Fabriol R. & Bues M. (2006) Modelling the evolution of water quality in abandoned mines in the Lorraine Iron Basin. *Journal of Hydrology*, **328**, 620-634

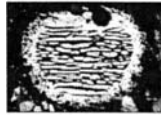
#### A3

**Collon P.**, Fabriol R. & Bues M. (2005) Evolution of the water quality in the abandoned iron mines of Lorraine : towards a semi-distributed modelling approach. *C. R. Géoscience, Géochimie*, **337**, 1492-1499.

**Collon P.**, Fabriol R. & Bues M. (2004) Ennoyage des mines de fer lorraines : impact sur la qualité de l'eau - Flooding of the iron mines of Lorraine : impact on the water quality. *C. R. Géoscience, Géochimie*, **336**, 889-899.



80%



20%

**ETIENNE DELOULE**

**51 ans**  
**DR2, CNRS, section 18**  
**Animateur de l'équipe Géochimie**

#### **Centre d'intérêt**

Le cycle intra-planétaire de l'eau : de l'accrétion du système solaire à l'altération de la croûte terrestre, avec une attention toute particulière au cours des dernières années à la distribution et aux échanges de l'eau dans le manteau terrestre et aux interactions croûte-manteau lors des processus de subduction. Au cours de ces dernières années, mon activité a été centrée sur deux points : 1) l'étude des xenolithes de granulites pour essayer de quantifier leur teneur en eau dans le but d'étudier les transferts d'eau entre le manteau et la croûte inférieure. 2) l'étude de la composition chimique et isotopique des inclusions vitreuses des olivines (sujet de thèse de Anne Sophie Bouvier) et des teneurs en eau des minéraux nominaleme nt anhydre des laves de l'arc des petites Antilles, dans le cadre de l'étude des transferts de matières entre la plaque subductée et la croûte et de l'étude du processus de dégazage des magmas au cours de leur évolution vers la surface.

#### **Enseignement**

2005 - Responsable pédagogique de la deuxième année (M2) de la spécialité « Géoscience et Ressources » du Master Géosciences et Génie Civil, UHP-INPL Nancy, contribution aux modules géochronologie, modélisation et métallogénie en M1, et responsable du module Magmatologie en M2 « Géosciences et Ressources ».

En eq. TD : 16h en 2004-2005, 40h en 2005-2006 et 40h en 2006-2007

#### **Encadrement de thèses**

Anne Sophie Bouvier : 2005 - ....., co-direction avec Nicole Metrich (CEA, Saclay )

Céline Martin : 2005 - ....., co-direction avec Stephanie Duchène (CRPG) et Beatrice Luais (CRPG)

Romain Mathieu : 2005 - ....., co-direction avec Guy Libourel (CRPG - INPL)

Qunke Xia : 2006 - ....., co- directeur avec Xiaozhi Yang (USTC, Chine)

#### **Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

depuis 1996 co-responsable du Service National de Microsonde Ionique IMS 1270.

depuis 2005 Membre élu du Conseil de Laboratoire du CRPG

#### **Curriculum vitae succinct**

1976-1981 : élève de l'école Normale Supérieure de la rue d'Ulm, Paris,

1979-1981 : Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle à Université Paris VII, au BRGM (Orléans) et au Centre d'Etude Nucléaire de Grenoble «Contribution à l'étude génétique des concentrations de fluorine, application aux gisements filoniens de Montroc et du Burc (Tarn)»

1981-1988 : Assistant à l'université Paris VII, puis chargé de Recherche CNRS au Laboratoire de Géochimie et Cosmochimie, Institut de Physique du Globe de Paris

depuis 1989 : Chargé de recherche, puis directeur de recherche CNRS depuis 2000 au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Nancy.

1991 : Doctorat es Sciences «Analyses isotopiques à l'échelle intra-cristalline : une contribution à l'étude des systèmes géologiques»

1992-1993 : visiting associate at Caltech, div. of Geological and Planetary Sciences.

#### **Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

Développement des mesures isotopiques (Pb, S, H, Li, ...) *in situ* par micro sonde ionique.



## Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 95

Nombre de citations : 711

H-Index : 16

## Toutes les publications de 2004 à 2007

### A1

- Deloué E.** (sous presse). 2004-2005 Analytical developments in Secondary Ion Mass Spectrometry. *Geostand. Geoanal. Res.*
- Martin L., Duchêne S., **Deloué E.**, Vanderhaeghe O. (sous presse). Mobility of trace elements and oxygen isotopes in metamorphism: consequences on geochemical tracing. *Earth Planet. Sci. Lett.*
- Pelleter E., Cheilletz A., Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., El Hakour A., **Deloué E.** and Féraud G. (sous presse) Hydrothermal zircons: a tool for ion microprobe U-Pb dating of gold mineralization (Tamlalt-Menhouhou gold deposit - Morocco). *Chem. Geol.*
- Bonhoure J., Kister P., Cuney M., **Deloué E.** (2007). Methodology for Rare Earth Element determinations of uranium oxides by ion microprobe. *Geostand. Geoanal. Res.*, **31**, 3, 209-226.
- Desbois G., Ingrin J., Kita N. T., Valley J. W., **Deloué E.** (2007) New constraints on metamorphic history of Adirondack diopsides (New York, USA): Al and  $\delta^{18}\text{O}$  profiles. *Am. Mineral.*, **92**, 4, 453-459.
- Micheletti F., Barbey P., Fornelli A., Piccarreta G., **Deloué E.** (2007). Latest Precambrian to Early Cambrian U-Pb zircon ages of augen gneisses from the Calabria (Italy), with inference to the Alboran microplate in the evolution of the peri-Gondwana terranes. *Intern. J. Earth Sci.*, **96**, 843-860.
- Pelleter E., Cheilletz A., Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., El Hakour A., **Deloué E.** and Féraud G. (2007) Hydrothermal zircons: a tool for ion microprobe U-Pb dating of gold mineralization (Tamlalt-Menhouhou gold deposit - Morocco). *Chem. Geol.*, **245**, 135-161.
- Martin L., Duchêne S., **Deloué E.**, Vanderhaeghe O. (2006) The isotopic composition of zircon and garnet: A record of the metamorphic history of Naxos, Greece. *Lithos*, **87**, 3-4, 174-192.
- Rossi P., Cocherie A., Fanning C. M., **Deloué E.** (2006) Variscan to eo-Alpine events recorded in European lower-crust zircons sampled from the French Massif Central and Corsica, France. *Lithos*, **87**, 3-4, 235-260.
- Wagner C. and **Deloué E.** (2007). Behaviour of Li and its isotopes during metasomatism of French Massif Central Iherzolites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 4279-4296.
- Xia Q. K., Yang X. Z., **Deloué E.**, Sheng Y. M., Hao Y. T. (2006) Water in the lower crustal granulite xenoliths from Nushan, eastern China. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **111**, B11, B11202, doi:10.1029/2006JB004296.
- Arndt N., Jenner G., Ohnenstetter M., **Deloué E.**, Wilson A. H. (2005) Trace elements in the Merensky Reef and adjacent norites Bushveld Complex South Africa. *Mineralium Depos.*, **40**, 5, 550-575.
- Deloué E.**, Wiedenbeck M. (2005) Analytical developments in secondary ion mass spectrometry in 2003. *Geostand. Geoanal. Res.*, **29**, 1, 37-40.
- Demouchy S., **Deloué E.**, Frost D. J., Keppler H. (2005) Pressure and temperature-dependence of water solubility in Fe-free wadsleyite. *Am. Mineral.*, **90**, 7, 1084-1091.
- Hergt J., Bedard L.P., **Deloué E.**, Linge K.L., Sylvester P.J., Wiedenbeck M., and Woodhead J.D. (2005) Critical review of analytical developments in 2003. *Geostand. Geoanal. Res.* **29**, 5-6.
- Buschaert S., Fourcade S., Cathelineau M., **Deloué E.**, Martineau F., Ayt Ougougdal M. and Trouiller A. (2004) Widespread cementation induced by inflow of continental water in the eastern part of the Paris Basin : O and C isotopic study of carbonate cements, *Appl. Geochem.*, **19**, 1201-1215.
- Levresse G., Cheilletz A., Gasquet D., Reisberg L., **Deloué E.**, Marty B., Kyser K. (2004) Osmium, sulphur, and helium isotopic results from the giant Neoproterozoic epithermal Imiter silver deposit, Morocco: evidence for a mantle source. *Chem. Geol.*, **207**, 1-2, 59-79.
- Levresse G., Gonzalez-Partida E., Carrillo-Chavez A., Tritta J., Camprubi A., Cheilletz A., Gasquet D., **Deloué E.** (2004) Perology, U/Pb dating and (C-O) stable isotope constraints on the source and evolution of the adakite-related Mezcala Fe-Au skarn district, Guerrero, Mexico. *Mineral. Depos.*, **39**, 301-312.
- Xia Q. K., Dallai L., **Deloué E.** (2004) Oxygen and hydrogen isotope heterogeneity of clinopyroxene magacrysts from Nushan Volaco, SE China. *Chem. Geol.*, **209**, 137-151.

### A3

- Xia Q.K., Chen D.G., **Deloué E.**, Zhi X.C. (sous presse). Heterogeneity of hydrogen isotope composition of mantle-derived mica megacrysts: ion probe study. *Chinese Sci. Bull.*
- Xia Q.K., Chen D.G., **Deloué E.**, Zhi X.C. (sous presse). Hydrogen isotope compositions of mantle-derived amphibole megacrysts from Qilin and its tectonic significance. *Chinese Sci. Bull.*
- Numbem Tchakounté J., Toteu S. F., Randall Van Schmus W., Penaye J., **Deloué E.**, al. e. (2007) Evidence of ca 1.6Ga detrital zircon in the Bafia Group (Cameroon): Implication for the chronostratigraphy of the Pan-African Belt north of the Congo craton. *C. R. Geosciences*, **339**, 132-142.
- Toteu S. F., Yongue Fouateu R., Penaye J., Seme Mouangue A. C., Van Schmus W. R., Tchakounte J., **Deloué E.**, Stendal H. (2007) Reply to the comment by Mvondo et al. on "U-Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonics in southern Cameroon: Consequence for the Pan-African orogenic evolution of the central African fold belt by Toteu et al., 2006" (*J. Af. Earth Sci.*, **44**, 479-493) *J. Af. Earth Sci.*, **48**, 53-54.
- Lerouge C., Cocherie A., Toteu S. F., Penaye J., Milési J. P., Tchameni R., Nsifa E. N., Fanning C. M., **Deloué E.** (2006). Shrimp U-Pb zircon age evidence for Paleoproterozoic sedimentation and 2.05 Ga syntectonic plutonism in the Nyong Group, South-Western Cameroon: consequences for the Eburnean-Transamazonian belt of NE Brazil and Central Africa. *J. Af. Earth Sci.*, **44**, 413-427.
- Toteu S. F., Penaye J., **Deloué E.**, Van Schmus W. R., Tchameni R. (2006). Diachronous evolution of volcano-sedimentary basins north of the Congo craton: Insights from U-Pb ion microprobe dating of zircons from the Poli, Lom and Yaounde' Groups (Cameroon). *J. Af. Earth Sci.*, **44**, 428-442.
- Toteu S. F., Fouateu R. Y., Penaye J., Tchakounte J., Seme Mouangue A. C., Van Schmus W. R., **Deloué E.**, Stendal H. (2006). U-Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonic in southern Cameroon: consequence for the Pan-African orogenic evolution of the central African fold belt. *J. Af. Earth Sci.*, **44**, 479-493.
- Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Maluski H., **Deloué E.**, Phan Trong T., Hoang Quang V. (2005) Age and significance of ruby-bearing marble from the red river shear zone, Northern Vietnam. *Can. Mineral.*, **43**, 4, 1315-1329.
- Stone W.E., **Deloué E.**, Beresford S.W. and Fiorentini M., 2005, Anomalous High  $\delta\text{D}$  Values for Archean Ferropicrite Melt: implications for magmatic and post-magmatic Crustal Evolution, *Can. Mineral.*, **43**, 1745-1758.
- Mayer A., Cortiana G., Dal P., **Deloué E.**, De Pieri R., Jobstraibizer P. (2004) U-Pb single zircon of the Adamello Batholith, Southern Alps. *Memorie di Scienze Geologiche*, **55**, 151-167.

### B



**STÉPHANIE DUCHÊNE**

**37 ans**

**Maître de Conférence, UHP-Nancy1, 35<sup>ème</sup> section CNU**

**Equipe Pétrologie**

#### **Centre d'intérêt**

- Dynamique des chaînes de montagnes, processus d'exhumation des roches métamorphiques (Alpes, domaine Egéen)
- Cinétique de cristallisation et étude des distributions de tailles de cristaux dans les basaltes (approche analytique et expérimentale)
- Géochronologie des roches métamorphiques, signification des âges radiochronométriques
- Diffusion chimique dans les minéraux, influence sur les températures de clôture, géovélocimétrie

#### **Enseignement**

- Géochimie, pétrologie, dynamique des chaînes de montagnes en Licence et Master des parcours Sciences de la Terre et Biologie-Géologie.
- Responsable du module de géochimie (les bases) de L3 Sciences de la Terre depuis 2005
- Responsable du module de géochimie (les applications) de L3 Sciences de la Terre depuis 2005
- Responsable du module de géochimie/géophysique de L3 Biologie-Géologie depuis 2005
- Responsable de l'enseignement des géosciences à la préparation au CAPES et à l'Agrégation de Sciences de la Vie et de la Terre de l'UHP depuis 2005.

#### **Encadrement de thèses**

- Laure Martin. Co-direction avec E. Deloule (CRPG) et O. Vanderhaghe (G2R). Thèse de l'Université H. Poincaré-Nancy1. Soutenue en 2004.
- Céline Martin. 2005 - ..... co-direction avec E. Deloule et B. Luais (CRPG).

#### **Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

- Directrice adjointe du département de Sciences de la Terre de l'UHP Nancy I depuis septembre 2006

#### **Curriculum vitae succinct**

- 1990 - Ancienne élève de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon
- 1993-1997 Doctorat de Sciences de la Terre de l'UCB Lyon I - Laboratoire de Sciences de la Terre de l'ENS Lyon «Approche chronologique et cinétique de l'exhumation des éclogites dans les chaînes de montagnes» directeurs de thèse : F. Albarède, J.-M. Lardeaux.
- 1997-1999 : ATER Université Paris VI - Laboratoire de Pétrologie
- depuis 1999 : Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré Nancy I - Recherche au CRPG

#### **Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

- Datation Lu-Hf du métamorphisme alpin (1997, *Nature*, **387**, 586-589) constituant la première datation Lu-Hf sur minéraux séparés et ayant contribué à la reconnaissance de l'âge tertiaire du métamorphisme haute pression - basse température dans les Alpes

#### **Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

- Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 12
- Nombre de citations : 229
- H-Index : 5

## Toutes les publications de 2004 à 2007

### A1

Martin L., **Duchêne S.**, Deloule E., Vanderhaeghe O. (sous presse). Mobility of trace elements and oxygen isotopes in metamorphism: consequences on geochemical tracing. *Earth Planet. Sci. Lett.*

Pupier E., **Duchêne S.**, Toplis M. (sous presse). Experimental quantification of plagioclase crystal size distribution during cooling of a basaltic liquid. *Contrib. Mineral. Petrol.*

Ford M., **Duchêne S.**, Gasquet D., Vanderhaeghe O. (2006) Two-phase orogenic convergence in the external and internal SW Alps. *J. Geol. Soc., London*, **163**, 815-826.

Martin L., **Duchêne S.**, Deloule E., Vanderhaeghe O. (2006) The isotopic composition of zircon and garnet: A record of the metamorphic history of Naxos, Greece. *Lithos*, **87**, 3-4, 174-192.

Vigier N., Burton K. W., Gislason S. R., Rogers N., **Duchêne S.**, Thomas L., Hodge E., Schaefer B. (2006) The relationship between riverine U-series disequilibria and erosion rates in a basaltic terrain. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **249**, 3-4, 258-273

### A3

**Duchêne S.**, Aïssa R., Vanderhaeghe O. (2006) Pressure-temperature-time evolution of metamorphic rocks from Naxos (Cyclades, Greece): constraints from thermobarometry and Rb/Sr dating. *Geodin. Acta*, **19/5**, 301-321.



(\*) **FRANÇOIS FAURE**

**39 ans**

**Maître de Conférence, UHP-Nancy1, 35<sup>ème</sup> section CNU**

**Equipe Pétrologie**

#### **Centre d'intérêt**

- Pétrologie expérimentale haute température
- Cinétique des processus magmatiques terrestre et extra-terrestre.
- Morphologies cristalline, textures réactionnelles, vitesses de croissance et de dissolution des minéraux magmatiques, inclusions magmatiques.

#### **Enseignement**

Environ 180h eq. TD à l'UHP (Licence et Master), interventions ponctuelles à l'ENSG.  
Matières enseignées: Pétrologie magmatique et métamorphique.

#### **Encadrement de thèses**

Benoît Welsch : 2005 - .... co-direction Patrick Bachèlery (Univ. La Réunion)

#### **Curriculum vitae succinct**

1996-2001: Doctorat en Science de la Terre (Pétrologie expérimentale) de l'Université B. Pascal, Clermont-Ferrand, Laboratoire Magmas et Volcans: «Texture de croissance rapide dans les roches basiques et ultrabasiques: étude expérimentale et nanoscopique».  
2001-2002: Post-doc au CRPG: études expérimentales sur l'origine de la texture spinifex dans les komatiites.  
2002-2005: Ingénieur d'études CNRS au Laboratoire Magmas et Volcans (Clermont-Ferrand) : microscopie électronique à balayage et développement du laboratoire d'inclusions magmatiques.  
depuis 2005: Maître de Conférences à l'UHP - Nancy1.

#### **Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

Evolution de la morphologie des olivines en fonction des conditions de croissance.  
Reproduction de la texture spinifex dans les komatiite.  
Lien entre la formation des inclusions magmatiques et les mécanismes de croissance de l'olivine.

#### **Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 10  
Nombre de citations : 46  
H-Index : 4

#### **Toutes les publications de 2004 à 2007**

**Faure F.**, Schiano P., Troliard G., Nicollet C., Soulestin B. (2007) Textural evolution of polyhedral olivine experiencing rapid cooling rates. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **153**, 4, 369-492.  
**Moune S.**, **Faure F.**, Gauthier P. J., Sims K. W. W. (2007) Pele's hairs and tears: natural probe of volcanic plume. *J. Volcan. Geotherm. Res.*, **164**, 244-253.  
**Devineau K.**, **Devouard B.**, **Villieras F.**, **Faure F.**, **Devidal J. L.**, **Kohler A.** (2006) Evolution of product phase assemblages during thermal decomposition of muscovite under strong disequilibrium conditions. *Am. Mineral.*, **91**, 413-424.

#### **A1**

**Faure F.**, **Arndt N.**, **Libourel G.** (2006) Formation of Spinifex texture in komatiites: an experimental study. *J. Petrol.*, **47**, 8, 1591-1610.  
**Schiano P.**, **Provost A.**, **Clocchiatti R.**, **Faure F.** (2006) Transcrystalline melt migration and earth's mantle. *Science*, **314**, 5801, 970-974.  
**Faure F.**, **Schiano P.** (2005) Experimental investigation of equilibration conditions during forsterite growth and melt inclusion formation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 882-898.  
**Faure F.**, **Schiano P.** (2004) Crystal morphologies in pillow basalts : implications for mid-ocean ridge processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **220**, 331-344.





**MARY FORD**

**46 ans**

**Professeur, ENSG/INPL, 35<sup>ème</sup> et 36<sup>ème</sup> sections CNU**

**Animatrice de l'équipe Géodynamique**

**Centre d'intérêt**

Tectonique, bassins, orogénèse, rifts, interactions entre processus de surface et la tectonique.

**Enseignement**

ENSG: Terre Dynamique, géologie structurale, analyse des orogènes, géodynamique des bassins, cartographie, stages de terrain, géomorphologie tectonique, méthodes analytiques structurales dans l'exploration pétrolière.

**Encadrement de thèses**

Nicolas Backert 2003 - .... co-direction avec M. Malartre (G2R, Nancy).

Lise Salles 2006 - ....

Sébastien Rohais : co-direction avec R. Eschard et F. Guillocheau (Univ. Rennes). Soutenance 2007.

**Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

Responsable du groupe Geodynamique au CRPG.

Responsable de l'option 3A au ENSG en Geosciences Pétrolières.

**Transfert des connaissances vers l'industrie et la valorisation de la recherche**

Leader des excursions pour l'AAPG 2005 : Joseph, P., Callec, Y. and Ford, M. 2005. The Grès d'Annot Turbidite System : Dynamic Controls on Sedimentology and Reservoir Architecture in the Alpine Foreland Basin. AAPG 2005 International Conference, Paris, Field Trip No. 6 field guide. 116pp.

2007 : Ford, M. and Rohais, S. 2007. The Corinth Rift and its giant Gilbert Deltas. AAPG international Coenference, Athens, November 2007. Field trip No. 5.

**Curriculum vitae succinct**

1981: Bachelor of Science degree in Geology. National University of Ireland.

1985: Ph.D, National University of Ireland, Cork.

1985-1986: Senior Demonstrator, Geological Sciences, Liverpool University, UK.

1986-1990: Senior Lecturer, Geological Sciences, Plymouth Polytechnic, UK.

1990-1998: Oberassistent (Assistant/Associate Professor), Geological Institute, ETH (Swiss Federal Institute of Technology), Zürich, Switzerland.

1998-Present: Professor, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Nancy, France.

1999: Habilitation, ETH, Zurich, Switzerland

**Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

Dynamisme des prismes critiques.

Organisation du workshop 3F - Corinthe en juillet 2007.

**Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 23

Nombre de citations : 321

H-Index : 10

## Toutes les publications de 2004 à 2007

### A1

- Bourgeois O., **Ford M.**, Diraison M., Pik R., Gerbault M., Le Carlier de Veslud C., Ruby N. & Bonnet S. (2007). Separation of rifting and lithospheric folding signatures in the NW-Alpine foreland. *Intern. J. Earth Sci.* 10.1007/s00531-007-0202-2.
- Ford M.**, **Le Carlier de Veslud C.**, Bourgeois O. (2007). Kinematic and Geometric Analysis of Fault-Related folds in a Rift Setting (Dannemarie Basin, Upper Rhine Graben, France). *J. Struct. Geol.*, **29**, 1811-1830.
- Rohais S., Guillocheau F., Eschard R., **Ford M.** and Moretti I. (2007). Stratigraphic architecture of the Plio-Pleistocene infill of the Corinth rift : implications for its structural evolution. *Tectonophysics*. **440**, 5-28.
- Ford M.**, Duchêne S., Gasquet D., Vanderhaeghe O. (2006) Two-phase orogenic convergence in the external and internal SW Alps. *J. Geol. Soc., London*, **163**, 815-826.
- Ford M.** (2004) The significance of growth structures in foreland basin development. *Basin Res.*, **16**, 361-375.

### A3

- Le Carlier de Veslud C., **Ford M.**, Moretti I. (sous presse). Preliminary 3D structural model for region of Aigion, Gulf of Corinth (Greece). *C. R. Geosciences*.
- Le Carlier de Veslud C., Bourgeois O., Diraison M., **Ford M.** (2005) 3D stratigraphic and structural synthesis of the Dannemarie basin (Upper Rhine Graben). *Bull. Soc. géol. Fr.*, **176**, 433-442.
- Malartre F., **Ford M.**, Williams E. A. (2004) Preliminary biostratigraphy and 3D geometry of the Vouraikos Gilbert-type fan delta, Gulf of Corinth (Greece). *C. R. Géoscience*, **336**, 269-280.

## Chapitre d'ouvrages

- Ford, M.**, Williams, E.A. and Malartre, F. 2007. Stratigraphic architecture, sedimentology and structure of the Vouraikos Gilbert-type delta, Gulf of Corinth, Greece. *Special Publication of the International Association of Sedimentologists*, edited by G.J. Nichols, E.A. Williams, C. Paola, in press.
- Ford M.**, Lickorish W. H. (2004) Foreland basin evolution around the western Alpine arc. In: P. Joseph & S. Lomas (eds), *New perspectives on Turbidites, the Grès d'Annot Sandstones, SE France*, Geological Society, London, *Special Publications*, 221, 39-63.



65%



35%

## CHRISTIAN FRANCE-LANORD

**50 ans**  
**DR1, CNRS, section 18**  
**Equipe Géochimie**

### Centre d'intérêt

Cycle géochimique de l'érosion et du carbone, interactions tectonique-climat

### Enseignement

Paléo-climat, cycle de l'eau. 15h eq.TD/an.

### Encadrement de thèses

Agnès Brenot : co-direction avec Jean Carignan, CRPG. Soutenance 2005.

Sophie Giannesini : co-direction avec J. Lancelot (Univ. Nîmes). Soutenance 2006.

Valier Galy : soutenance 2007.

### Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')

Directeur du DEA TERRE (INPL,UHP,ULP Nancy-Strasbourg) 2000-05.

### Curriculum vitae succinct

1987 Docteur de l'INPL

1988 Chargé de Recherche CR2 au CNRS (affecté au CRPG)

1997-98 Mise à disposition pour un an à l'Université de Cornell, Ithaca, USA. Visiting Scientist à l'Université de Cornell

1998 Directeur de Recherches DR2 au CNRS (affecté au CRPG) DR1 depuis 2006.

### Point fort ou action la plus marquante de la carrière

Recherches sur le système d'érosion Himalayen. Mise en évidence du rôle de l'enfouissement de la matière organique sur le cycle du carbone dans les systèmes à forte érosion physique.

### Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 57

Nombre de citations : 1350

H-Index : 19

### Toutes les publications de 2004 à 2007

#### A1

Galy V., **France-Lanord C.**, and Lartiges B. Loading and fate of particulate organic carbon from the Himalaya to the Ganga-Brahmaputra delta. *Geochim. Cosmochim. Acta*. accepté.

Galy V., François, L., **France-Lanord C.**, Faure P., Kudrass H., Palhol F., and Singh S. C4 plants decline in the Himalayan basin since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Sci. Rev.* accepté.

Vigier N., Decarreau A., Millot R., Carignan J., Petit S., **France-Lanord C.** Quantifying Li isotope fractionation during smectite formation and implications for the Li cycle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, accepté, en révision.

Brenot, A., Carignan, J., **France-Lanord, C.**, Benoit, M. (2007). Geological and land use controls on  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of river dissolved sulfate: the Moselle river basin, France. *Chem. Geol.*, **244**, 25-41.

Calmels D., Gaillardet J., Brenot A. and **France-Lanord C.** (2007). Carbonate weathering: a possible source of atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Geology*. **35**, 1003-1006.



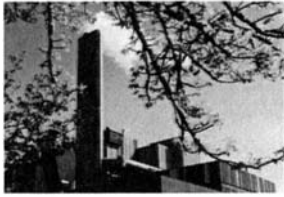
- Galy V.**, Bouchez, J., **France-Lanord C.** (2007). Determination of total organic carbon content and  $\delta^{13}\text{C}$  in carbonate rich detrital sediments. *Geostan. Geoanal. Res.* **31**, 199-208.
- Galy V., **France-Lanord C.**, Beyssac O., Faure P., Kudrass H. and Palhol F. (2007). Extreme efficiency of terrestrial organic carbon burial in the Bengal Fan. *Nature*. **450**, 407-410.
- Garzanti E., Vezzosi G., Andò S., Lavé J., Attal M., **France-Lanord C.** and DeCelles P. (2007). Quantifying Provenance and Sediment Yield in the Marsyandi River Basin (Central Nepal), *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**, 500-515.
- Granet M., Chabaux F., Stille P., **France-Lanord C.**, and Pelt E. (2007). Time-scales of sedimentary transfer and weathering processes from U-series nuclides: Clues from the Himalayan rivers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **261**, 389-406.
- Aucour A., **France-Lanord C.**, Pedoja K., Pierson-Wickmann A., and Sheppard S. (2006) Fluxes and sources of particulate organic carbon in the Ganga-Brahmaputra river system. *Global Biogeochemical Cycle*, **20**, doi:10.1029/2004GB002324.
- Gajurel A. P., **France-Lanord C.**, Huyghe P., Guilmette C., Gurung D. (2006) C and O isotope compositions of modern freshwater mollusc shells and river waters from the Himalaya and Ganga plain. *Chem. Geol.*, **233**, 1-2, 156-183.
- Gayer E., Lavé J., Pik R., **France-Lanord C.** (2006) Monsoonal forcing of Holocene glacier fluctuations in Ganesh Himal (Central Nepal) constrained by cosmogenic  $^3\text{He}$  exposure ages of garnets. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **252**, 3-4, 275-288.
- Remusat L., Palhol F., Robert F., Derenne S., **France-Lanord C.** (2006) Enrichment of deuterium in insoluble organic matter from primitive meteorites: A solar system origin? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **243**, 1-2, 15-25.
- Singh S., Kumar A., **France-Lanord C.** (2006) Sr and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in waters and sediments of the Brahmaputra river system: Silicate weathering,  $\text{CO}_2$  consumption and Sr flux. *Chem. Geol.*, **234**, 3-4, 308-320.
- Giuliani G., Fallick A. E., Garnier V., **France-Lanord C.**, Ohnenstetter D. (2005) Oxygen isotope composition as a tracer for the origins of rubies and sapphires. *Geology*, **33**, 4, 249-252.
- Singh S., Sarin M. M., **France-Lanord C.** (2005) Chemical erosion in the eastern Himalaya: major ion composition of the Brahmaputra and  $\delta^{13}\text{C}$  of dissolved inorganic carbon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 14, 3573-3588.
- Evans M. J., Derry L. A., **France-Lanord C.** (2004) Geothermal fluxes of alkalinity in the Narayani river system of central Nepal. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **G3**, **5**, 8, 1-21.
- Garzanti E., Vezzoli G., Ando S., **France-Lanord C.**, Singh S. K., Foster G. (2004) Sand petrology and focused erosion in collision orogens: the Brahmaputra case. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **220**, 1-2, 157-174.
- Gayer E., Pik R., Lavé J., **France-Lanord C.**, Bourlès D., Marty B. (2004) Cosmogenic  $^3\text{He}$  in Himalayan garnets indicating an altitude dependence of the  $^3\text{He}/^{10}\text{Be}$  production ratio. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **229**, 1-2, 91-104.

### A3

- Nédélec A., Affaton P., **France-Lanord C.**, Charrière A., Alvaro J. (2007) Sedimentology and chemostratigraphy of the Bwipe Neoproterozoic cap dolostones (Ghana, Volta Basin): a record of microbial activity in a peritidal environment. *C. R. Geosciences*, **339**, 223-239.

### B

- Giuliani G., Fallick A. E., Garnier V., **France-Lanord C.**, Ohnenstetter D., Schwartz D. (2005) Les isotopes de l'oxygène, un traceur de l'origine géologique des rubis et saphirs. *Revue de Gemmologie*, **152**, 9-11.



**GASTON GIULIANI**

**53 ans**  
**DR1, IRD, section 15**  
**Equipe Pétrologie**

**Centre d'intérêt**

Métallogénie-géologie des gemmes  
Interactions fluide-roche

**Enseignement**

12h eq. TD/an.  
Université d'Antananarivo et LMTG Toulouse

**Encadrement de thèses**

Saholy Rakotosamizany 2006 - ....., co-directions avec M. Rakotondrazafy (Université d'Antananarivo) et D. Ohnenstetter (CRPG). Thèse de Doctorat en cotutelle Universités de Antananarivo et de Nancy I.

**Transfert des connaissances vers l'industrie et la valorisation de la recherche**

Contrat de Service et d'Expertise entre le Laboratoire Français de Gemmologie de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris, le CNRS et l'IRD pour l'analyse des isotopes de l'oxygène des émeraudes (depuis 1999)

**Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

Membre élu du Conseil d'administration de l'Association Française de Gemmologie et membre de son conseil scientifique (depuis juin 2005)  
Co-responsable du programme de recherche international IRD-Université d'Antananarivo sur les gisements de corindons gemmes (2004-2008)

**Curriculum vitae succinct**

8 mars 1982 : Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle, INPL/CRPG-CNRS  
Mars à décembre 1982 : Contrat de recherche au Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS CNRS - BRGM à Orléans). Mission de terrain en Chine (2 mois) avec L. Lebel et J.C. Delille (BRGM)  
1983 : travail de recherche au GIS-CNRS (7 mois) sous la responsabilité de L. Lebel.  
avril 1984 à mars 1985 : Chercheur contractuel au CRPG-CNRS à Vandœuvre (statut d'ingénieur 3A)  
depuis juillet 1985 à l'IRD (ex ORSTOM) : affectations de longue durée au Brésil de 1986 à 1991. CR2 en 1985, CR1 en 1989 et DR2 en 1999.  
20 juin 1997 : Habilitation à diriger des Recherches, INPL/CRPG-CNRS

**Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

Modèle de formation des gisements d'émeraude de Colombie et du Brésil.  
Modèle de formation des gisements de rubis associés aux marbres.  
Traceur isotopique de l'oxygène des émeraudes et son application par le Contrat de Service et d'Expertise entre le Laboratoire Français de Gemmologie de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris, le CNRS et l'IRD pour l'analyse des isotopes de l'oxygène des émeraudes (depuis 1999).  
Traceur isotopique des rubis et saphirs et son application à leur caractérisation typologique.

**Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 51  
Nombre de citations : 322  
H-Index : 10

## Toutes les publications de 2004 à 2007 **A1**

**Giuliani G.**, Fallick A., Rakotondrazafy M., Ohnenstetter D., et al. (2007) Oxygen isotope systematics of gem corundum deposits in Madagascar: relevance for their geological origin. *Mineralium Depos.*, **42**, 251-270.

**Giuliani G.**, Fallick A. E., Garnier V., France-Lanord C., Ohnenstetter D. (2005) Oxygen isotope composition as a tracer for the origins of rubies and sapphires. *Geology*, **33**, 4, 249-252.

## **A2**

Garnier V., Ohnenstetter D., **Giuliani G.**, Fallick A. E., Phan Trong T., Hong Quang V., Pham Van L., Schwarz D. (2005) Basalt petrology, zircon ages and sapphire genesis from Dak Nong, southern Vietnam. *Min. Mag.*, **69**, 1, 21-38.

## **A3**

Garnier V., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D. et al. (sous presse). Marble-hosted ruby deposits from central and southeast Asia: towards a new genetic model. *Ore Geology Reviews*.

Rakotondrazafy M., **Giuliani G.**, Fallick A. E., Ohnenstetter D., Andriamamonjy A., Rakotosamizanany S., Ralantoarison Th., Razanatsheho M., Offant Y., Garnier V., Maluski H., Dunaigre Ch., Schwarz D., Mercier A., Ratrimo V., Ralison B. (sous presse). Gem corundum deposits in Madagascar: a review. *Ore Geology Reviews*.

Turner D., Groat L.A., Hart C.J.R., Mortensen J.K., Linnen R.L., **Giuliani G.** and Wengzynowski W. (2007). Mineralogical and geochemical study of the true blue aquamarine showing, southern Yukon. *Can. Mineral.*, **45**, 203-227.

Garnier V., Maluski H., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D., Schwarz D. (2006) Ar-Ar and U-Pb ages of marble-hosted ruby deposits from central and southeast Asia. *Can. J. Earth Sci.*, **43**, 509-532.

Garnier V., Ohnenstetter D., **Giuliani G.**, Maluski H., Deloule E., Phan Trong T., Hoang Quang V. (2005) Age and significance of ruby-bearing marble from the red river shear zone, Northern Vietnam. *Can. Mineral.*, **43**, 4, 1315-1329.

Garnier V., Ohnenstetter D., **Giuliani G.** (2004) L'aspidolite fluorée : rôle des évaporites dans la genèse du rubis des mabres de Nangimali (Azad-Kashmir, Pakistan). *C. R. Géoscience*, **336**, 1245-1253.

Marshall D. D., Groat L. A., Falck H., **Giuliani G.**, Neufeld H. (2004) The Lened emerald prospect, Northwest territories, Canada: insights from fluid inclusions and stable isotopes, with implications for Northern Cordilleran emerald. *Can. Mineral.*, **42**, 5, 1523-1540.

## **B**

**Giuliani G.**, Ohnenstetter D., Rakotondrazafy M. et al. (2007). Les gisements de corindons gemmes de Madagascar. *Revue de Gemmologie, AFG*, **159**, 14-28.

Garnier V., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D., Schwarz D., Kausar A.B. (2006) Les gisements de rubis associés aux marbres de l'Asie Centrale et du Sud-Est. *Le Règne Minéral*, **67**, 17-48.

Ralantoarison T., Andriamamonjy A., **Giuliani G.**, Rakotonfrazafy A.F.M., Ohnenstetter D., Schwarz D., Fallick A., Razanatsheho M., Rakotosamizanany S., Moine B., Baillot P. (2006). Les saphirs multicolores de Sahambano et Zazafotsy, région granulitique d'Ihoso, Madagascar. *Revue de gemmologie, AFG*, **158**, 4-13.

Garnier V., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D., Kausar A. B., Hoang Quang V., Phan Trong T., Pham Van L. (2005) Les gisements de rubis du Pakistan et du Viêt-Nam. *Revue de Gemmologie*, **151**, 6-12.

**Giuliani G.**, Fallick A. E., Garnier V., France-Lanord C., Ohnenstetter D., Schwartz D. (2005) Les isotopes de l'oxygène, un traceur de l'origine géologique des rubis et saphirs. *Revue de Gemmologie*, **152**, 9-11.

Garnier V., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D., Schwarz D. (2004) Les gisements de corindon : classification et genèse. *Le Règne Minéral*, **55**, 7-35.

**Giuliani G.**, Garnier V., Ohnenstetter D. (2004) Du sel gemme pour les gemmes. *Pour la science*, **316**, 10-11.

Lemarchand F., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D. (2004) Le sel des rubis. *La Recherche*, **379**, 81-87.

Pham Van L., Vinh H. Q., Garnier V., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D., Lhomme T., Schwarz D., Fallick A., Dubessy J., Trinh P. T. (2004) Gem corundum deposits in Vietnam. *Journal of Gemmology*, **29**, 129-147.

Pham Van L., Hoang Quang V., Garnier V., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D., Lhomme T., Schwarz D., Fallick A., Dubessy J., Phan Trong T. (2004) Gem corundum deposits in Vietnam. *Journal of Gemmology*, **29**, 129-147.

Pham Van L., **Giuliani G.**, Garnier V., Ohnenstetter D. (2004) Gemstones in Vietnam. A review. *Australian Gemmologist*, **22**, 162-168.

Pham Van L., Hoang Quang Vinh, Garnier V., **Giuliani G.**, Ohnenstetter D. (2004) Marble-hosted ruby from Vietnam. *Canadian Gemmologist*, **25**, 83-95.

## Chapitre d'ouvrages

**Giuliani G.**, Ohnenstetter D., Garnier V., Fallick A., Rakotondrazafy M., Schwarz D. (2007). The geology and genesis of gem corundum deposits. *Short course GAC-MAC*.



## PIERRE JACQUEMIN

**56 ans**  
**IR1, CNRS, section 18**  
**Equipe Géodynamique**

### **Centre d'intérêt**

Extraction automatique d'objets géologiques à partir de cubes sismiques.

### **Enseignement**

ENSG. en moyenne 45h eq.TD/an.  
TD informatique 1<sup>ère</sup> année  
Programmation objet 2<sup>ème</sup> année  
UNIX 3<sup>ème</sup> année

### **Fonctions administratives particulières (autres que celles référencées au chapitre 'Instances')**

Maintenance réseau

### **Transfert des connaissances vers l'industrie et la valorisation de la recherche**

Consortium gOcad

### **Curriculum vitae succinct**

1975 - 1982 : ENSG, Modélisation et automatisation de processus industriels de traitement de minerai.  
1982 - 1988 : Développement du logiciel de cartographie 2D « GEOL » destiné aux applications géologiques.  
depuis 1989 : Développement du logiciel 3D « gOcad » devenu depuis une référence dans le monde de l'exploration pétrolière.

### **Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

A l'origine du projet gOcad avec le Professeur Jean-Laurent Mallet.

### **Toutes les publications de 2004 à 2007**





**DAVID JOUSSELIN**

**35 ans**

**Maître de Conférence, ENSG/INPL, 35<sup>ème</sup> section CNU**

**Equipe Géodynamique**

**Centre d'intérêt**

- Initiation du rifting (étude du golf de Corinthe et de l'évolution de son système de failles)
- Dynamique des dorsales et du manteau (étude tomographique de la dorsale est-Pacifique, études pétro-structurales dans les ophiolites).

**Enseignement**

250h/an

Responsable de 4 modules:

- Stage terrain (3 semaines, 1<sup>ère</sup> année ENSG), Géologie structurale (1<sup>ère</sup> année ENSG), Analyse des Orogènes (2<sup>ème</sup> année ENSG), Géophysique (terrain, 1 semaine, 2<sup>ème</sup> année ENSG)
- Interventions dans d'autres modules (géodynamique, prépa CAPES/AGREG).

**Transfert des connaissances vers l'industrie et la valorisation de la recherche**

Contrat d'étude structurale du secteur d'Acoje dans l'ophiolite de Zambales (Philippines) (Juillet 2005)

**Curriculum vitae succinct**

depuis Septembre 2002: Maître de conférence à l'ENSG/INPL, Recherche au CRPG

2001 - 2002 : ATER à l'Université du Maine (Le Mans).

2000 - 2001 : ATER à l'Université Aix-Marseille III.

1998-2000 Chercheur associé post-doctorant à l'Université d'Oregon (USA) «Seismic modeling of the Oman ophiolite and comparisons with undershooting data from the East-Pacific-Rise», en collaboration avec D. Toomey (bourse RIDGE-NSF).

27 avril 1998 Doctorat es Sciences: «Structure détaillée et propriétés sismiques des diapirs de manteau dans l'ophiolite d'Oman» (Laboratoire de Tectonophysique de l'université Montpellier II, directeur de thèse: prof. A. Nicolas).

**Point fort ou action la plus marquante de la carrière**

Rédaction et réalisation du projet de postdoc (2 ans de salaire inclus dans la demande) qui -par une approche couplée géophysique(EPR)-tectonique de terrain(Oman)- a modernisé et remis sur le devant de la scène le modèle d'alimentation des dorsales par des diapirs de manteau.

Organisation (financement inclus) d'un stage terrain d'initiation aux techniques d'exploration par la géophysique pour les élèves 2<sup>ème</sup> année de l'ENSG.

**Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière**

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 8

Nombre de citations : 115

H-Index : 5

**Toutes les publications de 2004 à 2007**

Toomey D. R., Jouselin D., Dunn R. A., Wilcock W. S. D., Detrick R. S. (2007) Skew of mantle upwelling beneath the East Pacific Rise governs segmentation. *Nature*, **446**, 7134, 409-414.



**40 ans**  
**Chargé de Recherche 1, CNRS, section 18**  
**Equipe Géodynamique**

**Centre d'intérêt**

- Néotectonique, géomorphologie et paléosismicité des orogènes actifs
- Etude des boucles de rétro-actions entre tectonique, érosion et climats
- Géomorphologie et incision fluviale, physique de l'abrasion du substrat rocheux et des galets au cours du transport fluvial, études expérimentales
- Modélisation numérique du paysage
- Mesure du soulèvement tectonique et paléoaltimétrie -
- Collision Inde-Asie

**Enseignement**

Années précédentes au LGCA = 10h de cours magistraux en M2R

**Encadrement de thèses**

- M. Attal sur " L'étude expérimentale de l'abrasion des galets et du substrat rocheux au cours du transport fluvial ". Thèse débutée en octobre 1999, soutenue le 31 octobre 2003. Situation actuelle : Lecturer à l'Université d'Edinburgh avec P. Cowie.
- P.H. Blard sur " La mise au point et l'utilisation d'un paléo-altimètre basé sur les isotopes cosmogéniques". Co-direction avec D. Bourlès (Cerege, Aix) et R. Pik (CRPG, Nancy). Thèse débutée en octobre 2002 et soutenue le 30 juin 2006. Situation actuelle : Post-Doc au Caltech avec K. Farley.
- V. Godard sur " L'étude du couplage entre tectonique et érosion : approche numérique et exemples des LongMen Shan (Chine) et de l'Himalaya ". Co-direction avec R. Cattin (ENS, Paris). Thèse débutée en octobre 2003, soutenue le 30 novembre 2006. Situation actuelle : Préparateur agrégé à l'ENS Lyon.
- B. Oveisi (géologue iranien) sur " L'étude de la déformation actuelle et récente du Zagros central ". Thèse débutée en octobre 2003, soutenance prévue en avril 2007.
- M. Dubille sur " La dynamique de l'incision et du transport fluvial : approches combinées d'observation, d'expérimentation et de modélisation numérique". Thèse débutée en octobre 2004.
- P. Steer sur " L'impact des changements dans l'évolution thermomécanique et l'érosion des chaînes de montagne". Co-direction avec R. Cattin (ENS, Paris). Thèse débutée en septembre 2007.

**Curriculum vitae succinct**

Formation et diplômes

- 1993 - 1997 : Doctorat de géophysique, Université de Paris VII, Denis Diderot,
- 1990 - 1991 : Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en géophysique, IPGP.
- 1987 - 1990 : Diplôme d'ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

Expérience professionnelle et de recherche

- sept. 2007- : Chargé de recherche 1<sup>ère</sup> classe CNRS au CRPG.
- 2001-aout 2007 : Chargé de recherche 1<sup>ère</sup> classe CNRS dans le Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines (LGCA) à Grenoble.
- 1999-2001 : Chargé de recherche 2<sup>ème</sup> classe CNRS au sein du LGCA à Grenoble.
- 1998 : Post-doctorat à Pennsylvania State University dans le laboratoire du professeur D.Burbank. Analyse géomorphologique et tectonique des San Gabriel (Californie).
- 1997 : Post-doctorat au Laboratoire de Géophysique (LDG) du CEA : Projet d'évaluation probabiliste du risque sismique en Californie.
- 1993 - 1997 : Doctorat de géophysique au sein du LDG/CEA sous la direction de J.P. Avouac. Thèmes de recherche : Morpho- et sismo-tectonique de l'Himalaya du Népal.
- 1991 - 1993 : Ingénieur géophysicien dans le cadre de la coopération franco-bolivienne à l'Observatoire San Calixto à La Paz (Bolivia) (Suivi scientifique d'un réseau sismologique, Analyse des données enregistrées, Tomographie)
- 1991 : Travaux de recherche de DEA sur l'anisotropie sismique et les directions tectoniques majeures sous la direction de J.P. Montagner et P. Tapponnier à l'IPGP



## Résumés des travaux passés et leur impact scientifique

- Etude Sismo- et morphotectonique de l'Himalaya du Népal qui a fait progresser notre compréhension de la structure, de la déformation actuelle et du risque sismique associé au prisme himalayen (une partie de l'étude a été récompensée par le prix de « meilleur article en tectonique » décernée par la Geological Society of America en 2003 pour l'article Lavé et Avouac [2000] sur la déformation des plis d'avant pays).
- Etude sur l'érosion et l'incision fluviale : j'ai mené de nombreuses études via l'utilisation de méthodes très diverses pour quantifier et comprendre les différents processus de l'érosion (isotopes cosmogéniques, bilans de sédiments, modèles d'incision de rivière, thermochronologie basse température, caractérisation des sédiments au cours du transport fluvial).
- Etude expérimentale de l'abrasion fluviale qui a reçu un véritable écho Outre Manche puisque, depuis sa réalisation en 2002-2003, j'ai accueilli trois étudiants anglais pour travailler dessus et développé une intense collaboration avec l'université de Cambridge. Cette étude a débouché très récemment sur des données inédites et déterminantes pour la communauté.
- Etude de mise au point d'un paléo-altimètre basé sur les isotopes cosmogéniques. Initialement soutenue par une ACI Blanche, cet ambitieux programme a commencé à fournir des résultats extrêmement prometteurs et totalement inédits.

## Distinctions

L'article Lavé and Avouac [JGR, 2000] a reçu en 2003 le « Best paper award » (in structural geology and tectonics) de la Geological Society of America.

## Données bibliométriques sur l'ensemble de la carrière

Nombre de publications référencées ISI Web of Knowledge: 19

Nombre de citations : 393

H-Index : 9

## Toutes les publications de 2004 à 2007

### A1

- Blard P.-H., **Lavé J.**, Pik R., Bourlès D. (sous presse). Cosmogenic  $^3\text{He}$  chronology of the last Mauna Kea (Hawaii) ice cap, and paleoclimatic implications for the Central Pacific. *Nature*.
- Blard P.-H., Bourlès D., Pik R., **Lavé J.** (sous presse) In situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  in olivines and pyroxenes. *Quaternary Geochronology*.
- Garzanti E., Vezzosi G., Andò S., **Lavé J.**, Attal M., France-Lanord C. and DeCelles P. (2007). Quantifying Provenance and Sediment Yield in the Marsyandi River Basin (Central Nepal). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**, 500-515.
- Gayer E., **Lavé J.**, Pik R., and France-Lanord C. (2006). Monsoonal forcing of Holocene glacier fluctuations in Ganesh Himal (Central Nepal) constrained by accurate cosmogenic  $^3\text{He}$  exposure ages of garnets. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **252**, 275-288.
- Blard P.-H., Pik R., **Lavé J.**, Bourlès D., Burnard P.G., Yokochi R., Marty B. and Trusdell F. (2006) Cosmogenic helium loss by preliminary crushing of phenocrysts: implications for  $^3\text{He}$  measurement and production rates calibration. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **247**, 222-234.
- Blard P.-H., Bourlès D., **Lavé J.** and Pik R. (2006). Applications of ancient cosmic-ray exposures: theory, techniques and limitations. *Quaternary Geochronology*, **1**, 59-73.
- Attal M., **Lavé J.**, and Masson J.P. (2006) A new experimental device to study pebble abrasion and transpose to natural systems. *J. of Hydraul. Engineering*, **132**, 624-628, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:6(624), 2006.
- Lavé J.**, Yule D., Sapkota S., Basenta K., Madden C., Attal M. and Pandey R. (2005). Evidence for a Great Medieval Earthquake (~A.D. 1100) in Central Himalaya, Nepal. *Science*, **307**, 1302-1305.
- Lavé J.** (2005) Analytic solution of the mean elevation of a watershed dominated by fluvial incision and hillslopes landsliding. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, 11, L11403, doi: 10.1029/2005GL022482.
- Blard P.-H., **Lavé J.**, Pik R., Quidelleur X., Bourlès D. and Kieffer G. (2005) Fossil cosmogenic  $^3\text{He}$  record from K-Ar dated basaltic flows of Etna volcano (38°N): Evaluation of a new paleoaltimeter. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 613-631.
- Godard V., Cattin R. and Lavé J. (2004). Modeling mountain building, numerical trade off between erosion law and crustal rheology. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, 10.1029/2004GL021006.
- Gayer E., Pik R., **Lavé J.**, France-Lanord C., Bourlès D. and Marty B. (2004). Cosmogenic  $^3\text{He}$  in Himalayan garnets indicating an altitude dependence of the  $^3\text{He}/^{10}\text{Be}$  production ratio. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **229**, 91-104.
- Lavé J.**, and Burbank D. (2004). Erosion rates and patterns in the Transverse Ranges (California). *J. Geophys. Res.*, **109**, 10.1029/2003JF000023.

## Chapitres d'ouvrages

- Oveisi B., **Lavé J.** and van der Beek P. (2007). Active folding and deformation rate at the central Zagros front (Iran). In Lacombe, O., Lavé, J. and Roure F., Eds, in *Thrust Belts and Foreland Basins: From Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems, Series: Frontiers in Earth Sciences*, 492 pp.
- Attal M. and **Lavé J.** (2006). Changes of bedload characteristics along the Marsyandi River (central Nepal): Implications for understanding hillslope sediment supply, sediment load evolution along fluvial networks, and denudation in active orogenic belts. In Willett, S.D., Hovius, N., Brandon, M.T., and Fisher, D., eds., *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution: Geological Society of America Special Paper 398*, p. 143-171, doi:10.1130/2006.2398(09).
- Godard V., **Lavé J.** and Cattin R. (2006) Numerical modelling of erosion processes in the Himalayas of Nepal, effect of spatial variation of rock strength and precipitation. In Buiter, S.J.H. and Schreurs, G., *Analogue and Numerical Modelling of Crustal-scale Processes, Geological Society special publication 253*.