



**HAL**  
open science

## Centre de recherches pétrographiques et géochimiques : rapport annuel 1995-1996

- Centre de Recherches Pétrographiques Et Géochimiques

► **To cite this version:**

- Centre de Recherches Pétrographiques Et Géochimiques. Centre de recherches pétrographiques et géochimiques : rapport annuel 1995-1996. [Rapport de recherche] CNRS. 1996, 108 p. hal-01358123

**HAL Id: hal-01358123**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01358123v1>**

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.

4624

CENTRE DE RECHERCHES PETROGRAPHIQUES ET GEOCHIMIQUES

# CRPG

La Terre : du Cosmos  
aux déchets ultimes.

## Rapport d'activité

### 1995 -1996

TOTAL  
620  
08 E  
A  
S

2ème édition - Octobre 1996



3 5400 00777353 5

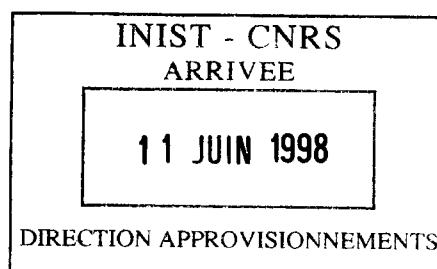


CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

G 175452

# Sommaire

	page
<b>Sommaire</b>	1
<b>Sommaire détaillé</b>	3
<b>Avant Propos</b>	7
<b>A - Personnel</b>	9
<b>B - Recherche Scientifique</b>	15
<b>Thème I - Terre primitive: des météorites à la Terre différenciée</b>	19
<b>Thème II - Terre solide: Dynamique et évolution du manteau et de             la lithosphère</b>	27
<b>Thème III - Terre-eau : Les fluides dans le système croûte-bassin-océan</b>	35
<b>Thème IV - Micro-marqueurs isotopiques des environnements et             des paléoenvironnements</b>	43
<b>Thème V -Terre et activités anthropiques (des ressources aux déchets).</b>	49
<b>C - Listes des publications 1995-1996 du CRPG</b>	57
<b>D - Les Services analytiques</b>	67
<b>I - Le Service d'Analyse des Roches et Minéraux (SARM)</b>	69
<b>II - Geostandards Newsletter</b>	75
<b>III - Point sur l'implantation de la sonde ionique Caméca IMS 1270</b>	81
<b>E - Points forts des activités de recherche</b>	85
<b>F - Contrats de recherche</b>	91
<b>G - Enseignement</b>	97
<b>H - Rayonnement</b>	117



# Sommaire détaillé

	page
<b>Sommaire</b>	1
<b>Sommaire détaillé</b>	3
<b>Avant Propos</b>	7
<b>A - Personnel</b>	9
Chercheurs CNRS	11
Enseignants-Chercheurs	11
ITA	12
Organigramme du centre	13
Conseil de laboratoire et Bureau de direction	14
<b>B - Recherche Scientifique</b>	15
<b>Rappel des thèmes</b>	17
<b>Thème I - Terre primitive: des météorites à la Terre différenciée</b>	19
I-1. Les chondrites primitives	21
I.1.1. L'origine nucléaire du Li-Be-B dans le gaz pré-solaire	21
I.1.2. Le mécanisme d'apparition de l'eau dans le système solaire	22
I.1.3. Les premiers processus de différenciation métal-silicate	23
I-2. La Terre primitive	23
I.2.1. Solubilité de l'azote dans les liquides silicatés sous $fO_2$ variable : implications sur l'origine de l'atmosphère terrestre	23
I.2.2. Analyse isotopique de He, Ar, C et n dans les roches du manteau : basaltes océaniques et inclusions magmatiques dans les komatiites archéennes	24
I.2.3. Etudes de modélisation concernant les gaz rares dans le système solaire et le cycle de l'azote sur Terre	24
I-3. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème I	25
I-4. Liste des 5 publications récentes les plus significatives du thème I	25
<b>Thème II - Terre solide: Dynamique et évolution du manteau et de         la lithosphère</b>	27
II-1. Structure et cinématique de la lithosphère continentale	29
II-1.1. Le projet Lithoprobe	29
II-1.2. Les plutons marqueurs de la rhéologie de la croûte anté-2.0 Ga	29
II-1.3. Le houillier briançonnais, marqueur cinématique de l'orogénèse alpine	29
II-1.4. Exemples de témoins de la cinématique de la croûte continentale	30
II-2. Fractionnement et cristallisation des liquides silicatés	30
II-2.1. Magmatisme et géodynamique	30
II-2.2. Cristallochimie	30
II-2.3. Pétrologie et cinétique de cristallisation	30
II-2.4. Géochronologie U/Pb et structure	31
II-3. Evolution de la lithosphère mantellique	31
II-4. Evolution comparative des cratons précambriens	32



II-5. Cartographie et métallogénie 3D du Massif Central : le chantier "Limousin" (Projet GéoFrance 3D)	33
II-6. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème II	33
II-7. Liste des 5 publications récentes les plus significatives du thème II	33
<b>Thème III - Terre-eau : Les fluides dans le système croûte-bassin-océan</b>	<b>35</b>
III-1. Géométrie des circulations fluides et priorités des réservoirs : de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique	37
III-1.1. Géométrie et comportement des milieux insaturés (sols)	37
III-1.2. Perméabilité des zones de cisaillement	37
<i>Zones à fortes circulations fluides : cas de l'Abitibi</i>	37
<i>Zones à circulations fluides modérées : cas de l'Aar</i>	38
III-1.3. Modélisation de la géométrie et des propriétés physiques des milieux géologiques	38
<i>La caractérisation des propriétés physiques des roches à partir de leur réponse sismique</i>	38
<i>Modélisation et simulation de corps géologiques complexes</i>	38
III-2. Processus et bilan des transferts	38
III-2.1. Fluides chauds dans les bassins : origine et interaction eaux-roches	38
III-2.2. Circulation dans les aquifères : origine et temps de résidence des espèces dissoutes	39
III-2.3. Bilan d'échanges entre une couverture sédimentaire et le socle : l'exemple du rift continental du Rhin	39
III-2.4. Diagenèse de la croûte océanique	39
III-2.5. Modélisation numérique des transferts dans les bassins : cinétique, bilans de masse et d'énergie	40
III-3. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème III	41
III-4. Liste des 5 publications récentes les plus significatives du thème III	41
<b>Thème IV - Micro-marqueurs isotopiques des environnements et des paléoenvironnements</b>	<b>43</b>
IV-1. Enregistrement des conditions paléo-environnementales par les coraux	45
IV-2. L'érosion de l'Himalaya	46
IV-3. L'avenir	47
IV-4. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème IV	48
IV-5. Liste des 5 publications récentes les plus significatives du thème IV	48
<b>Thème V -Terre et activités anthropiques (des ressources aux déchets).</b>	<b>49</b>
V-1. Ressources minérales et métallogénie	51
V-1.1. Les zones de cisaillement aurifères	51
V-1.2. Les systèmes magmatiques à métaux précieux	51
V-1.3. Les systèmes péri-batholitiques	52
V-1.4. Les circulations profondes dans les bassins	52
V-1.5. Perspectives	52
<i>Le volet "Métallogénie 3D du limousin" du projet GéoFrance 3D</i>	52

<i>Le GDR "Métallogénie"</i>	52
V-2. Activités de transfert	53
V-2.1. Caractérisation et stabilité des matériaux anthropiques mal organisés	53
V-2.1.1. Les déchets ultimes ...	53
... les produits de stabilisation/solidification ...	53
... et leur comportement à long terme	54
<i>Approche expérimentale</i>	54
<i>Approche analogique</i>	54
V-2.1.2. Les verres et les laitiers	54
V-2.2. Simulation numérique et expertise des matériaux appliquées à l'environnement	54
V-2.2.1. Simulation numérique	54
<i>Site géothermique de Soultz</i>	55
<i>Réacteur d'Oklo comme analogue naturel d'un dépôt de déchets</i>	55
V-2.2.2. Expertise des matériaux	55
<i>Sensibilité des écosystèmes forestiers à l'acidification</i>	55
<i>Expertise pétrologique du site de la Vienne</i>	55
V-3. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème V	55
V-4. Liste des 5 publications récentes les plus significatives du thème V	55
<b>C - Listes des publications 1995-1996 du CRPG</b>	57
<b>D - Les Services analytiques</b>	67
<b>I - Le Service d'Analyse des Roches et Minéraux (SARM)</b>	69
I-1. Introduction	71
I-2. Intégration du nouveau chef de service	71
I-3. Réunion du Comité CNRS du SARM (février 1996)	71
I-4. Les échantillons analysés au SARM	71
I-5. Les géostandards	73
I-6. Recherche et développement analytique	74
I-6.1. <i>Une salle propre</i>	74
I-6.2. <i>Préconcentration d'éléments sur résine</i>	74
I-6.3. <i>Le robot Lab-séparateur</i>	74
I-6.4. <i>Le nouveau nébuliseur pour l'ICP-MS</i>	74
I-7. Personnel	74
<b>II - Geostandards Newsletter</b>	75
<i>Geostandards story</i>	77
<i>Lettre du nouveau rédacteur en chef</i>	78
<b>III - Point sur l'implantation de la sonde ionique Caméca IMS 1270</b>	81
III-1. Développement de l'IMS 1270 n° 5 chez Cameca	83
III-2. Installation de l'IMS 1270 au CRPG	83
III-3. Organisation du comité national de la sonde 1270	83
<b>E - Points forts des activités de recherche</b>	85
<i>Chercheurs CNRS</i>	87
<i>Enseignants-chercheurs</i>	88

<i>Ingénieurs</i>	89
<b>F - Contrats de recherche</b>	91
<i>Contrats CEE</i>	93
<i>Contrats privés</i>	93
<i>Contrats publics</i>	94
<i>Actions Thématiques Programmées</i>	95
<b>G - Enseignement</b>	97
<i>Etudiants et chercheurs post-doctoraux</i>	99
<i>Enseignements dispensés par les chercheurs CNRS</i>	105
<i>Enseignements dispensés par les enseignants-chercheurs</i>	109
<i>Devenir des étudiants (thésards et DEA)</i>	113
<b>H - Rayonnement</b>	117
<i>Au plan local</i>	119
<i>Au plan national</i>	120
<i>Au plan international</i>	121
<i>Activités grand public</i>	122
<i>Revue de presse</i>	123

## Avant Propos

Le CRPG (UPR A9046) était en restructuration en 1994. Depuis le 1er janvier 1995, les recherches du Centre portent sur cinq thèmes, trois correspondent à des thèmes traditionnels du CRPG : "Terre solide, dynamique et évolution du manteau et de la lithosphère", "Terre-eau, les fluides dans le système croûte-bassin-océan", "Terre et activités anthropiques, des ressources aux déchets" et deux sont nouveaux : "Terre primitive : des météorites à la terre différenciée" et "Les micromarqueurs isotopiques des environnements et paléoenvironnements". Le Département SDU, en janvier 1995, a nommé un nouveau directeur pour le Centre (J.N. Ludden) et a donné pour mission au CRPG de développer la géologie à Nancy autour d'un laboratoire bénéficiant d'une instrumentation analytique de haut niveau (spectrométrie de masse, sonde ionique 1270 et Service d'analyses à vocation nationale). Cette année verra l'installation de la sonde ionique ims 1270 au CRPG.

Depuis janvier 1995, notre production scientifique s'élève à 85 publications de rang A, dont 7 dans les périodiques Nature et Science, et trois chercheurs du CRPG ont été distingués, c'est ainsi que Marc Chaussidon s'est vu décerner la médaille Houtermans (European Association of Geochemistry), Guy Libourel a reçu la médaille de bronze du CNRS en automne 1995 et J. Ludden, la médaille scientifique de l'AAPG, Québec en 1996.

Les thèmes de recherche définis pendant la restructuration sont bien amorcés, notamment dans le domaine des micromarqueurs géochimiques et dans l'expérimentation du système fer/silicate et les applications aux domaines aussi différents que les déchets domestiques et l'évolution des planètes. Au sein de l'actuelle équipe "Dynamique de la Lithosphère et Modélisation" qui regroupe plusieurs équipes de la structure précédente du CRPG, il existe un fort potentiel particulièrement au niveau des études du système croûte-manteau et du transfert des fluides dans la croûte couplées à la modélisation numérique 3D au moyen du logiciel gOcad.

En ce qui concerne l'évolution des effectifs du Centre, trois nouveaux chercheurs sont arrivés au cours des deux dernières années : il s'agit de John N. Ludden (DR1), Maryse Ohnenstetter (DR2) et Daniel Ohnenstetter (CR1). Nous attendons la venue d'un nouveau CR2 en expérimentation (M. Toplis), classé en deuxième position par la section 13 au printemps 1996, ainsi que le transfert par mobilité interne de Stuart Boyd, CR1, en provenance du laboratoire de Physico-chimie des fluides géologiques, spécialiste de l'application des isotopes d'azote à l'évolution de la planète. Cependant, en septembre 1996, deux chercheurs (Anne-Marie Boullier, DR2 et Jean-Michel Bertrand DR2) ont quitté le CRPG dans le cadre d'une mutation ; ces deux chercheurs représentaient le noyau dur de la recherche en géologie structurale/tectonique du Centre et leur départ nécessitera une réévaluation de notre rôle dans ce domaine de recherche. Néanmoins, il est important pour la communauté de la géologie structurale de privilégier le maintien de liens étroits avec un centre doté d'une puissance analytique telle que celle du CRPG.

En février 1996, nous avons recruté au Service d'Analyses de Roches et de Minéraux (SARM) un ingénieur, Jean Carignan (IR1) pour remplacer K. Govindaraju (IR0), ayant fait valoir ses droits à la retraite en 1994. Le SARM évalue les besoins analytiques en recherche liée aux sciences de la Terre en France et prévoit d'importants développements en analyse des "ultratracés" et dans l'analyse des déchets industriels.

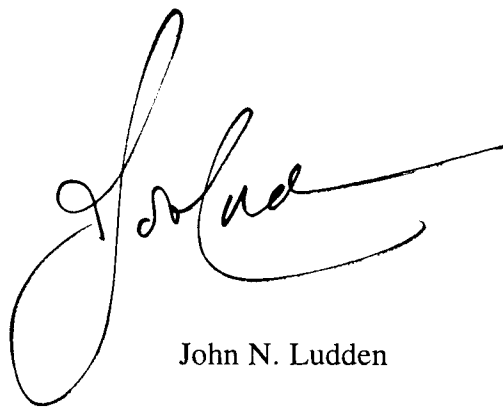
Au cours des deux prochaines années, le CRPG s'engage à développer les applications de la nouvelle sonde ionique. Nous affichons la Terre Primitive comme thème fédérateur au niveau du Centre et nous prévoyons le développement de liens européens dans cette thématique. Nous proposons le développement d'applications uniques de la sonde ionique aux problèmes de paléoclimatologie et de pollution atmosphérique. Nous jouerons un rôle moteur dans le développement d'un thème fédérateur au niveau des Unités de recherche à Nancy, celui de l'étude des

déchets domestiques et industriels. Dans le domaine de l'évolution de la lithosphère, nous nous insérerons davantage dans les projets pluridisciplinaires de grande envergure d'imagerie en HD, tels que Géofrance 3D, Europrobe, Lithoprobe, Ridge et ODP.

Le CRPG est l'un des Centres s'intéressant aux sciences de la Terre les plus performants actuellement en France. Il faut maintenir cette dynamique de recherche en assurant la régénération de la recherche et de l'aide technique par le remplacement des postes. Les chercheurs, enseignants-chercheurs et ITA du Centre proposent qu'il demeure une Unité Propre en 1997 et, que pour le prochain plan quadriennal, il y ait un renforcement, au moyen d'une convention, de ses liens avec l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) en particulier. Nous nous proposons, également, de maintenir des liens privilégiés dans le domaine de la pétrologie et de la géochimie avec l'Université Henri Poincaré-Nancy1 (UHP). C'est dans ce cadre, que trois enseignants-chercheurs de la "Jeune Equipe DRED" (JE-249), Pierre Barbey, Guy Libourel et Françoise Chalot-Prat rejoindraient officiellement le CRPG début janvier 1997. Nous prévoyons également la préparation de conventions de recherche CRPG, au niveau européen et spécifiquement avec le Max Planck Institut für Geochemie de Mayence et le Laboratoire d'expérimentation de Bayreuth (Allemagne).

Dans l'environnement multidisciplinaire nancéien des sciences de la Terre, le CRPG sera la pierre angulaire de la Fédération de Recherche "Institut Lorrain des Géosciences" dont nous demanderons la création en 1997.

Octobre 1996

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'John N. Ludden', with a large, stylized initial 'J'.

John N. Ludden

**A - Personnel**

## Liste des chercheurs CNRS

	Grade	Habilité à diriger des recherches	Equipes CRPG(*)
ARNOLD Michel	CR1	X	MME
BROWN William	DR1	X	MME
CHAUSSIDON Marc	CR1	-	GI
DELOULE Etienne	CR1	X	GI
DESMONS Jacqueline	CR1	X	DLM
FRANCE LANORD Christian	CR1	-	GI
GIULIANI Gaston	détaché ORSTOM	-	DLM
LETERRIER Jacques	CR1	X	DLM
LUDDEN John	DR1	X	DLM
OHNENSTETTER Daniel	CR1	X	MME
OHNENSTETTER Maryse	DR2	X	MME
PLOQUIN Alain	CR1	X	MME
REISBERG Laurie	CR1	-	GI
SAUPE Francis	CR1	X	GI
STUSSI Jean-Marc	CR1	X	DLM
ZIMMERMANN Jean-Louis	CR1	X	DLM

- (\*) DLM : Dynamique de la Lithosphère et Modélisation (animateur : J. Ludden)  
 GI : Géochimie Isotopique (animateur : B. Marty)  
 MME : Minéraux, Matériaux et Expérimentation (animateur : G. Libourel)

## Liste des enseignants-chercheurs

	Grade corps	Etablissement d'affectation(*)	Habilité à diriger des recherches	Equipes CRPG(**)
BARBEY Pierre	PR	UHP	X	MME
CHALOT PRAT Françoise	MCF	UHP	-	DLM
CHAROY Bernard	MCF	ENSG	X	DLM
CHEILLETZ Alain	MCF	ENSG	X	DLM
GASQUET Dominique	MCF	ENSG	X	DLM
LIBOUREL Guy	MCF	UHP	-	MME
MACAUDIERE Jean	PR	ENSG	X	DLM
MALLET Jean-Laurent	PR	ENSG	X	DLM
MARIGNAC Christian	MCF	EMN	X	DLM
MARTY Bernard	PR	ENSG	X	GI
WEISBROD Alain	PR	ENSG	X	MME

- (\*) UHP : Université Henri Poincaré-Nancy 1  
 ENSG : Ecole Nationale Supérieure de Géologie  
 (\*\*\*) DLM : Dynamique de la Lithosphère et Modélisation (animateur : J. Ludden)  
 GI : Géochimie Isotopique (animateur : B. Marty)  
 MME : Minéraux, Matériaux et Expérimentation (animateur : G. Libourel)

## Liste des ITA CNRS

	Corps grade	Quotité
ALLE Paul	IR2	1
BLANCHARD Christine	AJT	1
BLANCHARD Jean-Pierre	AI	1
BOULMIER Suzanne	T1P	1
BOYMOND Edmond	TCN	1
CARIGNAN Jean	IR2	1
CHAFFAUT Jean-Marc	AGT	1
CHAMPENOIS Michel	IE2	1
CHRETIEN Gilbert	AI	0.5
COGET Pierre	AI	1
DEGEORGE Jacques	TCN	1
DEMANGE Jean-Claude	IE1	1
FRAMBOISIER Xavier	TCN	1
FRANÇAIS Caroline	AGT	1
GAUDE Colette	TCN	0.8
HILD Pascal	AI	1
JACQUEMIN Pierre	IR1	1
JACQUIER Bertrand	TCE	1
JEANNOT Annie	TCN	0.8
LE CARLIER DE VESLUD Christian	IR2	1
LEHMANN Chantal	AI	0.9
LEHMANN Robert	T1P	1
LHOMME Jitka	T1P	1
LHOTE François	IR2	1
MANGIN Denis	TCN	1
MARIN Luc	IE2	1
MEVELLE Guy	IE1	1
MOREL Jacques	IE2	1
MULOT André	TCN	1
NOEL Marie-Thérèse	AJTP	0.8
NOEL Martine	AI	0.8
PAGEL Suzanne	TCN	0.8
PARMENTIER Christiane	TCN	0.8
PORCU Bruno	AJTE	1
RAIGUE Christiane	AJTP	1
ROBERT Pascal	IE2	1
ROUILLIER Alain	IE2	1
ROYER Jean-Jacques	IR1	1
SANDRIN Lucien	AI	1
SPATZ Catherine	TCN	1
URIOT Jean-Pierre	IE2	1
VERNET Michel	IR1	1

**Personnel détaché au CREGU :**

NGUYEN TRUNG Chinh	IE2	1
RAMBAUX Robert	TCN	1
SEGUIN Michèle	SARCE	1





## Equipes de Recherche

### Dynamique de la lithosphère et modélisation

**J. Ludden (DR1)**  
*J. Macaudière (Prof. ENSG)*  
**J. L. Mallet (Prof. ENSG)**  
*J. Desmons (CR1)*  
*J. Leterrier (CR1)*  
*J. M. Stussi (CR1)*  
*J. L. Zimmermann (CR1)*

**F. Chalot Prat (MC UHP)**  
*C. Marignac (MC Mines)*  
**B. Charoy (MC ENSG)**  
**A. Cheilletz (MC ENSG)**  
**D. Gasquet (MC ENSG)**  
**G. Giuliani (ORSTOM)**

*P. Jacquemin (IR1)*  
*J. J. Royer (IR1)*  
*C. Le Carlier (IR2)*  
*M. Champenois (IE2)*  
*P. Robert (IE2)*

### Géochimie Isotopique

**B. Marty (Prof. ENSG)**  
*M. Chaussidon (CR1)*  
*E. Deloule (CR1)*  
*C. France Lanord (CR1)*  
*L. Reisberg (CR1)*  
*F. Saupé (CR1)*

*J. C. Demange (IE1)*  
*P. Robert (IE2)*  
*P. Coget (AI)*  
*B. Jacquier (T1)*  
*D. Mangin (TCN)*  
*C. Spatz (TCN)*

### Minéraux, Matériaux et Expérimentation

*W. L. Brown (DR1)*  
*M. Ohnenstetter (DR2)*  
*P. Barbey (Prof. UHP)*  
*A. Weisbrod (Prof ENSG)*  
*M. Arnold (CR1)*  
*D. Ohnenstetter (CR1)*  
*A. Ploquin (CR1)*  
*M. Toplis (CR2)*  
**G. Libourel (MC UHP)**

*A. Rouillier (IE2)*

Soit au CRPG

Chercheurs CNRS :

3 Dir. de Rech.

13 Chargés de Rech.

Enseignants-Chercheurs :

5 Professeurs

6 Maîtres de Conf.

ORSTOM :

1 Cher. Assoc.

ITA CNRS :

14 Ingénieurs

28 Techniciens

et également :

28 étudiants en thèse

15 étudiants en DEA

5 post-doctorants

ou visiteurs

## Services Communs

### Direction Secrétariat Comptabilité

**J. Ludden (Directeur)**  
*C. Lehmann (AI)*  
*M. Noel (AI)*  
*S. Pagel (TCN)*  
*C. Andreux (AJT)*

### Service général

*J. P. Blanchard (AI)*  
*E. Boymond (TCN)*  
*B. Porcu (AJT)*  
*J. M. Chaffaut (AGT)*  
*C. Français (AGT)*

3 CES

### Atelier mécanique

*A. Mulot (TCN)*

### Atelier de lames minces

*L. Sandrin (AI)*  
*R. Lehmann (T1)*

### Imprimerie

*G. Chrétien (AI)*  
*J. Degeorge (TCN)*  
*C. Parmentier (TCN)*

1 CES

### Bibliothèque

*A. Jeannot (T1)*

### Laboratoire de Diffractométrie X

*F. Lhote (IR2)*  
*J. P. Uriot (IE2)*

## Laboratoires Nationaux

### Service des Analyses

- Laboratoire de Spectrochimie
- Laboratoire de Chimie
- Atelier de Broyage

• Geostandards Newsletter

• Sonde Ionique 1270

*J. Carignan (IR1)*  
*G. Mevelle (IE1)*  
**L. Marin (IE2)**  
*J. Morel (IE2)*

*P. Hild (AI)*  
*S. Boulmier (T1)*  
*J. Lhomme (T1)*

*M. T. Noel (AJTP)*  
*C. Raigué (AJTP)*  
*C. Blanchard (AJT)*

1 CES

**K. Govindaraju (Editeur)**  
*C. Gaudé (TCN)*

1 CES

*M. Chaussidon (CRI)*  
*E. Deloule (CRI)*  
*P. Allé (IR2)*  
*X. Framboisier (TCN)*  
*D. Mangin (TCN)*

**Conseil de  
Laboratoire du  
CRPG**

Collège Chercheurs - Membres élus

<i>Anne Marie Boullier</i>	<i>Gaston Giuliani</i>
<i>Eteinne Deloule</i>	<i>Laurie Reisberg</i>
<i>Christian France-Lanord</i>	<i>Alain Ploquin</i>
<i>Dominique Gasquet</i>	

Collège Chercheurs - Membres nommés

*Pierre Barbey*  
*Bernard Marty*  
*Guy Libourel*

Collège ITA - Membres élus

<i>Paul Allé</i>	<i>Guy Mevelle</i>
<i>Michel Champenois</i>	<i>André Mulot</i>
<i>Denis Mangin</i>	

Collège ITA - Membres nommés

*Jean Claude Demange*  
*Jacques Morel*  
*Jean-Jacques Royer*

**Bureau de  
Direction du  
CRPG**

Directeur du CRPG	<i>John Ludden</i>
Responsable de l'équipe «Géochimie Isotopique»	<i>Bernard Marty</i>
Co-responsable de l'équipe «Dynamique de la Lithosphère et Modélisation»	<i>Dominique Gasquet</i>
Responsable de l'équipe «Minéraux, Matériaux et Expérimentation»	<i>Guy Libourel</i>
Responsable «Bâtiment- aménagement intérieurs»	<i>Jean Claude Demange</i>
Responsable «ITA»	<i>Michel Champenois</i>

**B - Recherche scientifique**

## Thèmes de recherche

### Thème 1 : Terre primitive (des météorites à la terre différenciée).

Ce thème a pour objet de mieux comprendre l'origine des constituants de notre planète, les modalités de sa formation et de la différenciation entre le noyau métallique, le manteau silicaté et l'atmosphère gazeuse. L'originalité du projet tient au couplage d'une approche expérimentale

(partage haute pression entre phase métallique et phase silicatée d'une part, et mesure de la solubilité des volatils dans les liquides silicatés et les phases cristallisées d'autre part) et d'une approche géochimique notamment par l'analyse in situ de micro échantillons.

### Thème 2 : Terre solide (dynamique et évolution du manteau et de la lithosphère).

La dynamique du manteau supérieur est appréhendée par l'étude des traceurs isotopiques (Os, B, gaz rares). Une approche expérimentale dynamique des relations liquides silicatés-cristaux associée aux études de terrain permet

de caractériser l'évolution des magmas. Les événements tectoniques et thermiques des chaînes orogéniques sont abordés grâce à une géochronologie structurale de haute résolution (Ar et U/Pb).

### Thème 3 : Terre-eau (les fluides dans le système croûte-bassin-océan).

Les circulations hydrothermales jouent un rôle important dans l'évolution de la croûte terrestre en raison du flux thermique et des transferts de matières dont elles sont responsables. Les buts recherchés sont, d'une part, la modélisation physique des circulations fluides, et d'autre part, les bilans des transferts de matière et d'énergie associés à ces

circulations. Les problèmes fondamentaux à résoudre pour y parvenir sont : la détermination et l'évolution des caractéristiques physiques, géométriques et mécaniques, à différentes échelles, du milieu traversé, et l'inventaire des processus de transferts, des interactions fluides-roches et des sources de ces fluides.

### Thème 4 : les micro-marqueurs isotopiques des environnements et paléoenvironnements.

Il s'attache à la recherche de nouveaux micro-marqueurs susceptibles de caractériser l'évolution des climats passés et les modifications globales de l'environnement. Il s'agit de développer l'analyse des isotopes stables (H,B,C,O) sur des particules minérales ou organismes (argiles, aérosols, foraminifères, pollens, ...) en utilisant la microsonde IMS 1270.

Les progrès de cette technique devraient, par exemple, permettre l'analyse individuelle de grains de pollen là où les techniques classiques nécessitaient la prise en compte de 20 000 grains. Cette résolution sera appliquée à l'étude de l'enregistrement paléoclimatique en milieu continental, point faible de nos connaissances .

### Thème 5 : Terre et activités anthropiques (des ressources aux déchets).

Un des enjeux majeurs de notre société est de pouvoir 1) répondre à la demande croissante en ressources minérales et 2) maîtriser l'effet des activités anthropiques sur l'environnement. concernant la genèse des gîtes métalliques, l'accent est mis sur les minéralisations en Or, les éléments du groupe du platine (Rh, Pt, Pd) et

des métaux rares (Be, Sn, Li, Nb, Ta).

Ce thème s'attache également à caractériser 1) la chimie et la minéralogie des matériaux anthropiques mal organisés (déchets et déchets ultimes) 2) le comportement à long terme des produits de stabilisation (ciments, verres, vitrifiats).

**Terre primitive : des météorites à la Terre différenciée - Thème I**

# Thème I

## Terre primitive: des météorites à la Terre différenciée

La ligne conductrice de ce thème de recherche est d'étudier la distribution et le comportement des éléments légers et/ou volatils lors de la formation du système solaire et lors des premiers épisodes de différenciation de la Terre. Le but est d'essayer d'apporter des réponses à des questions telles que (1) quelle est l'origine et le mode d'acquisition des volatils dans la nébuleuse solaire, les planétésimaux et la Terre et (2) quelle proportion d'éléments légers est stockée dans le manteau, le noyau et l'atmosphère terrestre. Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire de pouvoir combiner différentes approches analytiques (analyses par spectrométrie de masse et par sonde ionique des gaz ou des éléments légers contenus dans les verres basaltiques océaniques, les inclusions magmatiques dans les roches mantelliques, la matrice et les chondres des météorites primitives), expérimentales (étude des partages et des solubilités à haute température basse pression et haute pression en collaboration avec les groupes de Paris et de Lyon) et de modélisation (acquisition des gaz rares sur Terre, évolution des flux des gaz rares ou d'azote entre manteau et atmosphère terrestre). Un des points forts de ce projet est le couplage entre les études concernant les échantillons extra-terrestres (météorites, roches lunaires) et celles concernant les échantillons terrestres.

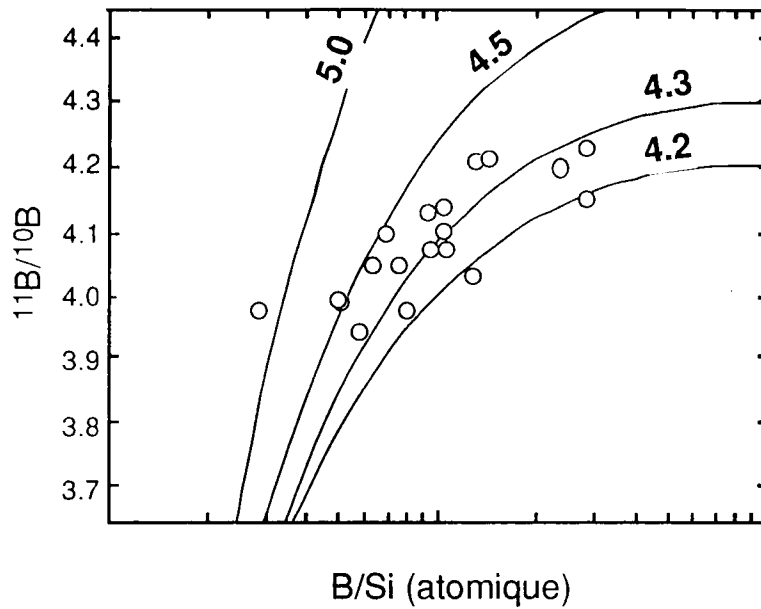
L'originalité principale de ce projet consiste à mener parallèlement l'expérimentation et l'analyse in situ de micro-échantillons grâce à la sonde ionique à grande sensibilité ims 1270. En raison du retard de livraison de cet instrument, une partie des projets n'a évidemment pas pu être menée à bien pour l'instant.

### I.1. Les chondrites primitives

Nos résultats récents sur les compositions isotopiques en hydrogène, bore, lithium et sur les concentrations en hydrogène et carbone dans les chondres ont démontré tout le parti que l'on pouvait tirer d'analyses ponctuelles (à l'échelle de 20 microns) sur les constituants des chondrites. Ces études sont menées en collaboration étroite avec F. Robert (MNHN Paris). Trois grands thèmes scientifiques ont été abordés jusqu'à présent : 1) l'origine nucléaire du Li-Be-B dans le gaz pré-solaire, 2) le mécanisme d'apparition de l'eau dans le système solaire et 3) les premiers processus de différenciation métal-silicate.

#### I.1.1. l'origine nucléaire du Li-Be-B dans le gaz pré-solaire

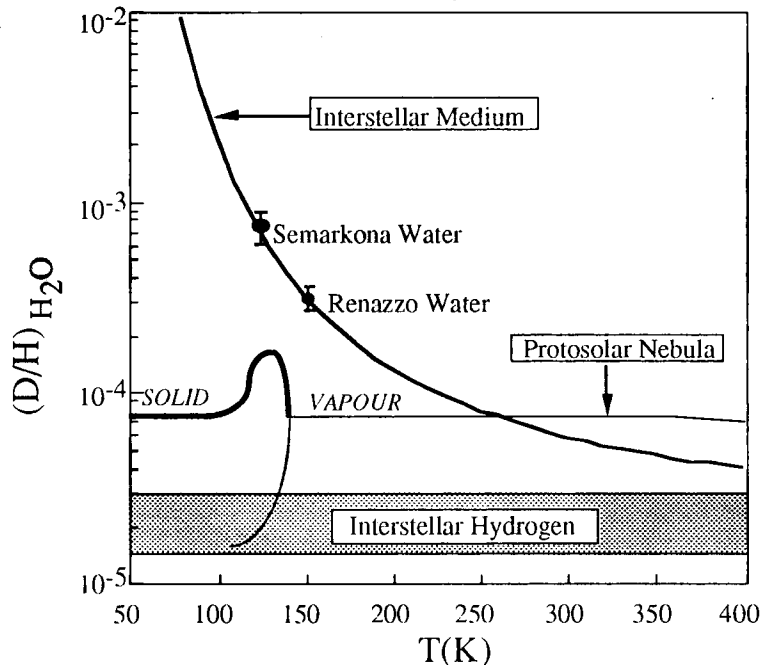
Le but de ce projet est d'étudier les processus de nucléosynthèse présolaire du Li, du Be et du B à partir de la mesure des rapports isotopiques  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$  et  ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B}$ , ainsi que des teneurs en Li, Be et B dans les chondres des météorites primitives. Tout l'intérêt d'étudier ces chondres vient du fait qu'ils renferment des variations de compositions isotopiques importantes pour le Li et le B (variations de  $\delta^{11}\text{B}$  allant jusqu'à  $\approx 80\%$ ). La présence de telles variations isotopiques nous renseigne sur les processus mis en jeu lors de la formation des chondres dans la nébuleuse protosolaire mais surtout sur les processus de nucléosynthèse présolaire. Les variations du rapport  ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B}$  observées s'expliquent si le bore du système solaire est un mélange entre du bore produit au cours de l'évolution de l'univers dans le milieu interstellaire diffus avec un rapport  ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B} \approx 2,5$  et du bore produit dans la nébuleuse présolaire en environ 1 Ma avec un rapport  ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B}$  situé entre 4,2 et 5,0 (cf. figure ci-dessous). En effet, pour que ces variations isotopiques aient été préservées, il faut que les chondres se soient formés à partir de précurseurs solides ayant des  $\delta^{11}\text{B}$  variables, ce qui peut s'expliquer si ces grains se sont condensés en différents endroits ou à différentes époques dans la nébuleuse présolaire. Ces chondres peuvent donc être considérés en ce qui concerne le B (et aussi probablement le Li et le Be) comme des "fossiles" de la nébuleuse présolaire. Ces résultats démontrent l'existence d'une nucléosynthèse importante du Bore mais aussi du Lithium (et du Béryllium) dans le nuage présolaire.



Variations du rapport isotopique  $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$  à l'intérieur d'un chondre de la météorite Semarkona: ces variations s'expliquent par un mélange entre du bore interstellaire ayant un rapport de 2.5 et du bore fraîchement synthétisé dans la nébuleuse proto-solaire avec un rapport isotopique entre 4.2 et 4.5. (Chaussidon et Robert, 1995).

### I.1.2. le mécanisme d'apparition de l'eau dans le système solaire

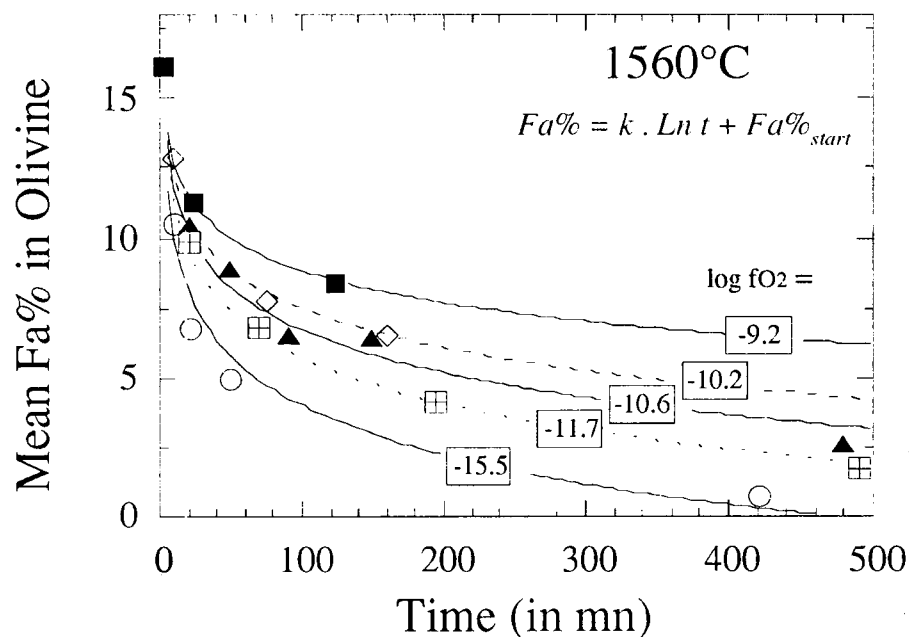
Nous avons récemment identifié, à la sonde ionique, la présence dans une météorite "d'argile" dont les rapports isotopiques en hydrogène montrent clairement l'origine interstellaire de l'eau qu'elle renferme. Cette signature isotopique remarquable semble aussi présente dans les chondres de cette météorite. Cette observation semblerait indiquer que les premiers silicates, fondus rapidement à haute température dans la nébuleuse solaire, ont piégé des argiles - ou de la glace d'eau - d'origine interstellaire. Si cette hypothèse se vérifie, ce scénario changerait profondément les conceptions quant à l'origine de l'eau dans le système solaire, qui serait un mélange entre de l'eau interstellaire et de l'eau "solaire" comme le montre la figure ci-dessous.



Modélisation de l'évolution du rapport D/H de l'eau dans la nébuleuse solaire. L'eau des météorites Renazzo et Semarkona est un mélange entre de l'eau interstellaire et de l'eau condensée lors des premiers stades de formation du système solaire. (Deloule et Robert, 1995)

### I.1.3. les premiers processus de différenciation métal-silicate

Deux approches sont utilisées pour mieux comprendre les premiers processus de différenciation métal-silicate. D'une part, des études systématiques sont faites par sonde ionique sur les chondres des météorites primitives et s'intéressant à la distribution du C et de l'H<sub>2</sub>O, deux agents réducteurs et oxydants respectivement. D'autre part, des études expérimentales sont faites pour simuler les processus de réduction à basse pression et haute température. Les résultats concernant la distribution du C dans les chondres des météorites (thèse de P. Hannon) montrent qu'il y a un lien très fort entre la teneur globale en C et l'état d'oxydo-réduction du chondre (i.e. la teneur en Fe de l'olivine). Cela suggère fortement que des grains riches en C, probablement des molécules carbonées, étaient présents parmi les minéraux précurseurs des chondres et ont contrôlé la réduction des silicates lors de la fusion à haute température des chondres. Les études expérimentales de réduction permettent d'apporter des précisions sur la vitesse des réactions de réduction, les changements de composition du métal et des silicates dus à ces réactions et sur les causes de ces réactions. L'effet de la  $fO_2$  et du temps de réaction sur la composition de l'olivine est par exemple montré dans la figure suivante :



*Effets de la pression partielle d'oxygène et du temps sur la teneur en Fe de l'olivine au cours d'expériences de réduction d'une olivine de San Carlos à 1560°C (Libourel et al., in prep).*

## I.2. la Terre primitive

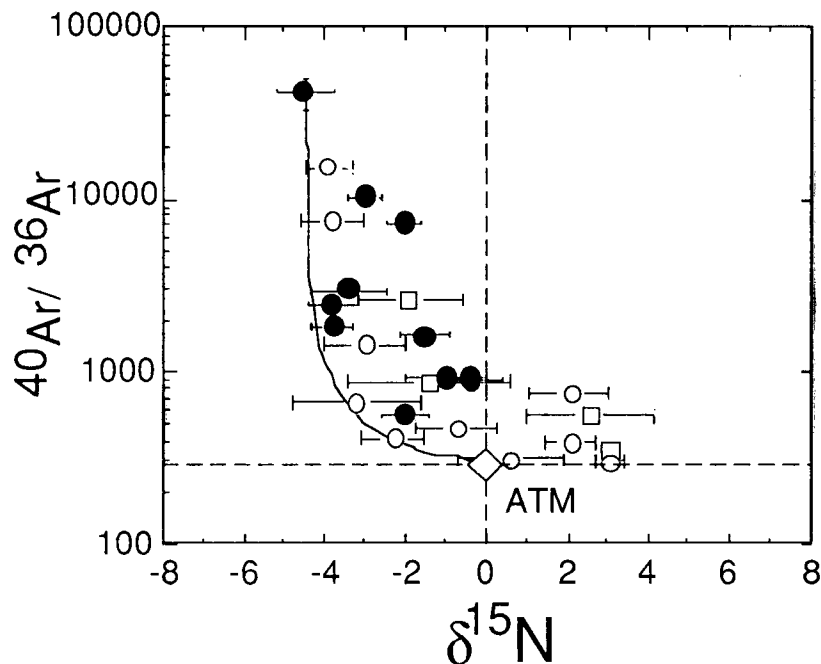
### I.2.1. Solubilité de l'azote dans les liquides silicatés sous $fO_2$ variable : implications sur l'origine de l'atmosphère terrestre

Bien que l'azote constitue la majorité de l'atmosphère terrestre, il n'existe pas de données fiables concernant la solubilité de l'azote dans les liquides basaltiques. Ce type de données est essentiel pour comprendre, d'une part, le processus de dégazage actuel du manteau, et d'autre part, le comportement de l'azote lors de la formation de la Terre, notamment en présence probable d'océan magmatique. Dans ce dernier cas, il est impératif d'étudier en même temps la spéciation de N sous  $fO_2$  réductrice. Le travail de thèse de F. Humbert vise à pallier ce manque de données de deux façons. Tout d'abord, en atmosphère oxydante, les abondances de N dans le liquide sont très faibles et il a été nécessaire de mettre au point une nouvelle technique dans laquelle de l'azote 15 pur est utilisé comme traceur. F. Humbert a mis au point une technique analytique des isotopes de l'azote sur des micro-quantités par extraction laser et spectrométrie de masse en mode statique. Ensuite, en conditions réductrices, les quantités plus importantes sont analysées par infra-rouge et pyrolyse.



### I.2.2. Analyse isotopique de He, Ar, C et N dans les roches du manteau : basaltes océaniques et inclusions magmatiques dans les komatiites archéennes

Les basaltes océaniques constituent la meilleure lucarne permettant l'accès à la composition des volatils du manteau. La connaissance de cette composition est essentielle pour comprendre le comportement des volatils lors de la différenciation terrestre et de la formation de l'atmosphère. Une nouvelle méthode permettant l'analyse isotopique couplée des gaz rares et de N, C a été développée au CRPG. Le résultat majeur est la première détermination de la composition isotopique de N dans le manteau convectif, qui est appauvri en  $^{15}\text{N}$  par rapport à l'atmosphère. Les  $\delta^{15}\text{N}$  des basaltes océaniques ayant des volatils les plus primitifs d'après leur haut rapport  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  sont en effet de l'ordre de  $-4\text{‰}$ , l'atmosphère étant par définition à  $0\text{‰}$  (cf. figure ci-dessous). Un tel contraste reflète la différenciation primitive atmosphère-Terre silicatée (voir plus bas). De plus, cette étude permet la détermination des rapports He/Ar/N/C dans le manteau, critères essentiels pour une bonne description du cycle géologique des volatils terrestres. Le travail en cours permet d'acquiesir une base de données comprenant diverses sections de rides océaniques et des domaines de points chauds océaniques.



Variations de la composition isotopique de l'azote des basaltes océaniques (N-MORB en noir et E-MORB en blanc), permettant d'établir la valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  du manteau. (Marty et al., 27<sup>th</sup> LPSC).

L'analyse de la composition isotopique de l'hélium dans les inclusions magmatiques piégées dans les olivines de komatiites archéennes (2.7 Ga) a permis de contraindre l'évolution temporelle du manteau ancien (DEA de D. Richard, collab. N. Arndt, CAESS Rennes). Ces inclusions ont, en effet, un rapport isotopique  $^3\text{He}/^4\text{He}$  très élevé qui est aussi une évidence pour un lien entre les komatiites archéennes et le volcanisme de type point chaud.

### I.2.3. Etudes de modélisation concernant les gaz rares dans le système solaire et le cycle de l'azote sur Terre

Le premier aspect de ces études de modélisation concerne les processus d'acquisition des gaz rares dans le système solaire et les précurseurs terrestres et est réalisé en collaboration avec M. Ozima, R. Wieler (ETH Zurich) et F. Podosek (Washington Univ., St. Louis). Le but de ce travail est d'établir une relation génétique entre les gaz rares du Soleil, témoins de la nébuleuse proto-solaire, les gaz rares météoritiques, et les gaz rares terrestres. Le deuxième aspect concerne la modélisation couplée gaz rares-azote (réalisée en collaboration avec I.N. Tolstikhin) de l'accrétion à la Terre différenciée. Dans ce cas, les flux de volatils (notamment N) lors de l'accrétion terrestre, de la formation de l'atmosphère et de son fractionnement, et de la différenciation du manteau sont déterminés en utilisant les limites fournies par les isotopes des gaz rares.

### **I.3. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème I**

Chercheurs permanents: M. Chaussidon (50%), E. Deloule (50%), C. France-Lanord (10%), G. Libourel (50%), B. Marty (50%).

Chercheurs-visiteurs étrangers : M. Ozima (Université de Tokyo), I.N. Tolstikhin (Université de Cambridge, UK, et Académie des Sciences de Kola, Russie).

Thésards : P. Hanon, F. Humbert. .

### **I.4. Liste des 5 publications les plus significatives du thème I**

Chaussidon M. & Robert F. (1995) Nucleosynthesis of  $^{11}\text{B}$ -rich boron in the pre-solar cloud recorded in meteoritic chondrules. *Nature* **374**, 337-339.

Deloule E. & Robert F. (1995) Interstellar water in meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **59**, 4695-4706.

Hanon P., Chaussidon M. & Robert F. (1996) High C and H contents of chondrules. *Lunar Planet. Sci. Conf.* **27**, 485-486.

Marty B. (1995). Nitrogen content of the mantle inferred from  $\text{N}_2$ -Ar correlation in oceanic basalts. *Nature* **377**, 326-329.

Marty B., Zimmermann L. & Humbert F. (1996) Nitrogen Isotopic composition of the silicate Earth and its bearing on Earth-Atmosphere evolution. *Lunar Planet. Sci. Conf.* **27**, 819-820.

**Terre solide : dynamique et évolution du manteau  
et de la lithosphère - Thème II**

## **Thème II**

# **Terre solide: dynamique et évolution du manteau et de la lithosphère**

Ce thème reflète un des domaines de recherche "traditionnel" du CRPG. Cependant, en raison de l'arrivée au CRPG de J. Ludden et du départ de A. M. Boullier et de J. M. Bertrand, des changements s'imposent dans les orientations des travaux relevant de ce thème. Le but est, en effet, de développer des projets de recherche multidisciplinaires concernant la formation et la stabilisation de la lithosphère à la limite croûte-manteau, en faisant appel à des études géophysiques, géochimiques, pétrologiques, structurales et de modélisation. Ces nouveaux projets seront développés en association avec plusieurs projets internationaux. En raison de l'évolution importante prévue de ce thème, les paragraphes suivant combinent des projets à développer dans les quatre prochaines années ainsi que des rapports d'étape sur certains des aspects les plus notables de la recherche concernant la dynamique et l'évolution de la lithosphère conduite depuis janvier 1995.

### **II.1. Structure et cinématique de la lithosphère continentale**

#### **II.1.1 Projet LITHOPROBE**

Ce projet repose sur l'étude de la formation de la croûte précambrienne depuis son accréation et stabilisation sous forme de craton au Sud de la Province Supérieure (2,7 Ga), jusqu'à sa destruction et son recyclage dans la Province de Grenville (1 Ga). J. Ludden, à l'origine de ce projet, en est le coordinateur et le responsable pour la partie archéenne durant la phase de synthèse. Les différentes techniques géophysiques utilisées, les compilations géologiques, le programme de géochronologie U-Pb et l'étude de certains traceurs géochimiques ont permis de réaliser des images uniques de la croûte précambrienne considérées comme des sections crustales types.

La synthèse des données sera entreprise en collaboration avec des scientifiques canadiens et l'équipe de modélisation du CRPG. Ceci comportera une reconstitution sismique, une compilation géologique et géochimique, le développement d'une base de données (GIS), la publication d'un atlas du "transect" et une série de publications. Le projet est financé par LITHOPROBE et les publications des résultats mentionneront le CRPG et l'Université de Montréal.

#### **II.1.2. Les plutons marqueurs de la rhéologie de la croûte anté 2.0 Ga.**

Les plutons sont des marqueurs du comportement rhéologique de la croûte anté-2.0 Ga. Ceci a été démontré dans la croûte juvénile birimienne du Liptako (Niger) où les plutons granitiques se sont mis en place et refroidis sur un laps de temps très court pendant un cisaillement régional.

En ce qui concerne l'évolution de la croûte archéenne, deux types de modèles s'opposent actuellement : modèles actualistes (assemblages de microplaques en contexte d'arc, collision continentale) et modèles verticalistes (interférence de raccourcissement horizontal et de plutons diapiriques). Fernando Althoff a pu montrer, lors de ses travaux de thèse, que la croûte archéenne du craton amazonien (sur l'exemple de la région de Marajoara) aurait évolué suivant une variante de modèle verticaliste dans lequel la croûte chaude se déforme pendant que des plutons se mettent en place.

#### **II.1.3. Le houiller briançonnais, marqueur cinématique de l'orogénèse alpine**

La signification et la localisation du Front Pennique (FP) en Savoie (entre les vallées de l'Arc et de l'Isère) ont été précisées à travers l'étude du seul marqueur continu : la Zone Houillère Briançonnaise (ZHB), une unité lithologique qui peut être suivie sur environ 200 km. Le FP lui-même est défini comme marquant la limite entre les domaines pennique et dauphinois. Les formations briançonnaises (mésozoïque à cénozoïque inférieur du domaine pennique) contrastent fortement, par la stratigraphie et la tectonique, avec celles du domaine dauphinois, le sub-briançonnais présentant une évolution structurale intermédiaire, encore mal connue.

Cette étude, menée par Laurent Aillères (thèse INPL Janv.1996), avait pour but de confronter les données cartographiques et structurales existantes des deux cotés du FP avec les définitions classiques des unités tectoniques basées jusqu'à présent sur leur stratigraphie et sur des

reconstitutions paléogéographiques. L'interprétation des principaux réflecteurs sismiques du profil ECORS-CROP ainsi que l'étude structurale de la ZHB suggèrent une nouvelle interprétation du contraste entre les pendages à dominante ouest de la ZHB et ceux vers l'Est des unités sub-briançonnaises. Un événement néoalpin responsable de l'enroulement des structures tectoniques précoces contre le FB, pourrait expliquer la géométrie actuelle et la linéarité des réflecteurs sismiques (FB et FP). Des observations néotectoniques préliminaires de la zone du FP fournissent un début de test pour cette interprétation.

#### **II.1.4. Exemples de témoins de la cinématique de la croûte continentale.**

Les marqueurs microstructuraux ont permis de proposer une nouvelle interprétation d'un chaînon des Corbières (Lagrasse). Leur étude a montré que la direction de raccourcissement aurait changé durant l'histoire tectonique du chaînon et que la schistogenèse, commencée précocément, s'est poursuivie durant toute la déformation. L'ensemble des structures traduit l'existence d'un chevauchement majeur au front de la plaine des Corbières.

L'étude des xénolites de restites peralumineuses désilicifiées dans un sill de vaugnérîte de Loubaresse (Ardèche) a montré que le magma mafique s'est mis en place précocément, avant la culmination de la phase métamorphique M3 dans une ambiance mésozonale. L'étude géochronologie U/Pb, en cours d'achèvement (thèse H. Ait Malek), des différentes intrusions de vaugnérîtes permettra de caler dans le temps cet important magmatisme basique.

### **II.2. Fractionnement et cristallisation des liquides silicatés**

#### **II.2.1. Magmatisme et géodynamique**

En complément des analyses structurales, la reconstitution géotectonique des orogènes anciens, fait souvent appel aux caractéristiques du magmatisme. C'est ainsi que les deux suites agpaïtiques et miaskitiques de syénites néphéliniques de Los Archipelago, mises en place autour de 104 Ma et auxquelles sont associées des monchiquites, sont interprétées comme les marqueurs des premiers stades de l'ouverture de l'Atlantique central.

Une synthèse du plutonisme hercynien du Maroc a permis de montrer que trois types d'associations s'individualisent: calco-alkaline, subalkaline monzonitique et peralumineuse. Ces magmatismes se télescopent dans un même massif. Aucune polarité magmatique ni chronologique n'a pu être établie transversalement à la chaîne. Le contexte géodynamique est à dominante transcurrente pendant la mise en place des intrusions. Ces magmas ont pour origine la fusion de protolithes crustaux variés induite par la remontée de magmas mantelliques.

#### **II.2.2. Cristallochimie**

Le rapport volatils/teneur en alcalins peut être utilisé comme indicateur d'environnement. Des études spectroscopiques sur le comportement des molécules H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> des canaux structuraux de beryls pauvres en alcalins et riches en volatils ont montré qu'il n'existe pas de relation directe entre les alcalins et les teneurs en H<sub>2</sub>O type-II.

L'étude des microtextures à biotite, OPX, ilménite et feldspaths potassique observées dans les laves dacitiques d'Algérie septentrionale a montré qu'elles résultent d'une résorption de la biotite pendant une phase de décompression rapide contemporaine l'ascension des magmas. Ces transformations s'effectuent entre 800 et 900°C et autour de 4kb.

Les étapes de l'évolution des magmas spécialisés en éléments rares (Li, Sn, Rb, F, Cs, Be) sont enregistrées par la zonation chimique des micas blancs. Les différences de composition ne se traduisent cependant pas par des différences de structures marquées, vraisemblablement en raison de l'insuffisance de résolution des méthodes disponibles.

#### **II.2.3. Pétrologie et cinétique de cristallisation**

A partir d'une étude extensive sur les teneurs en H<sub>2</sub>O de magmas boninitiques, il est montré que les teneurs en H<sub>2</sub>O, d'origine primaire, augmentent dans le verre résiduel au cours de la cristallisation. D'autre part, la richesse en eau inhiberait la cristallisation des phases minérales.

Il a été démontré que les granophyres observés aux joints de grains dans des enclaves granitiques et gneissiques présentes dans des filons de microdiorites des Jebilet (Maroc) avaient pour

origine une surfusion des enclaves au contact du magma filonien.

Les rubanements magmatiques observés dans le Massif de Brignogan-Pouescat (Bretagne) ont pour origine une dispersion d'injections tonalitiques à granodioritiques dans le monzogranite principal alors que ce dernier était peu cristallisé. Les injections ultérieures dans le magma monzogranitique, de plus en plus cristallisé, ont conduit à la formation des nombreux essais d'enclaves observés.

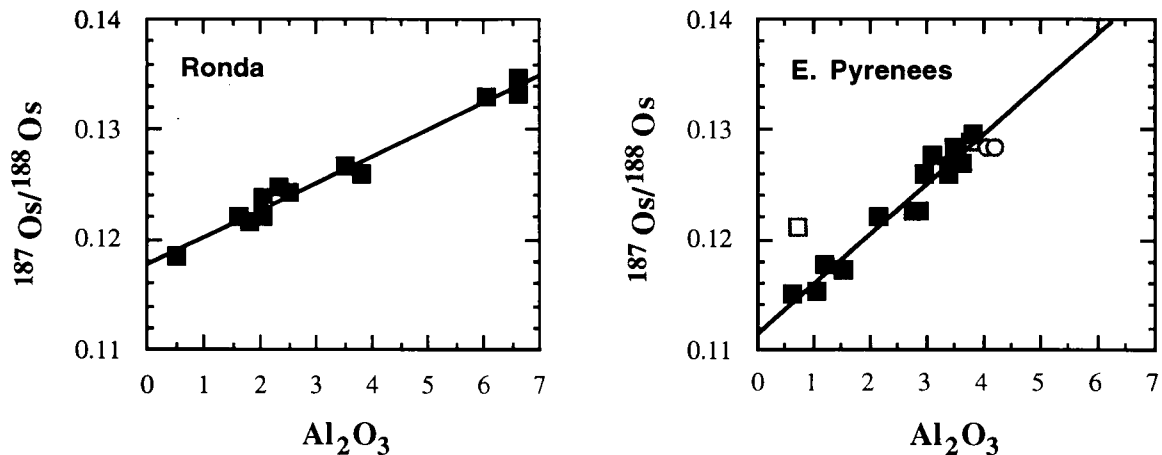
#### II.2.4. Géochronologie U-Pb et structure

Notre objectif est l'analyse de très petites fractions ( $\pm 100\mu\text{g}$ ) avec recherche de blancs minimum (actuellement 25 pg) pour pouvoir dater précisément, grâce à des mesures quasi ponctuelles, des épisodes de déformation ou de métamorphisme, en s'appuyant sur l'observation systématique des microstructures internes des minéraux accessoires au MEB.

Depuis Mars 1994, près de 250 fractions de zircon et de monazite ont été préparées et analysées par J.M. Bertrand et J. Leterrier. Ces données correspondent à un potentiel de publications important mais ont, pour la plupart, été réalisées sous contrat privé (ANDRA) ou de coopération. La publication des résultats est en cours mais dépend, pour certains projets, des délais de confidentialité ou de la participation active des maîtres d'oeuvre.

### II.3. Evolution de la Lithosphère Mantellique

Le système Re-Os est l'outil le plus puissant pour dater les événements magmatiques liés à la formation et l'évolution du manteau lithosphérique sous-continentale. Les études sur les lherzolites orogéniques menées récemment au CRPG (Reisberg and Lorand, 1995) ont montré que ce comportement peut produire, après le passage d'un temps suffisant, des corrélations entre les rapports  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  des péridotites et les éléments majeurs indicatifs des taux de fusion partielle, comme illustré sur les figures suivantes. Ces corrélations peuvent être utilisées pour estimer l'âge de la formation de la lithosphère mantellique.



*Corrélations entre  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  et teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans les lherzolites orogéniques.  
Données du CRPG (Pyrénées) et de l'IPGP (Ronda).*

La comparaison entre les âges modèles Re-Os des péridotites pyrénéennes avec les âges modèles Sm-Nd de la croûte sus-jacente, a montré que la genèse du manteau lithosphérique et celle de la croûte inférieure dans cette région étaient plus ou moins contemporaines. Cette observation peut contraindre des modèles de formation de la lithosphère. L'étude du système Re-Os des pyroxénites des massifs des Pyrénées Orientales, en collaboration avec J-P Lorand (MNHP), peut fournir des informations temporelles beaucoup plus fiables que celles des autres systèmes isotopiques (Kumar et al., 1996). Les données que nous avons actuellement montrent que les pyroxénites anhydres sont les témoins d'un magmatisme très ancien.

Les péridotites du manteau se trouvent aussi en enclaves dans des basaltes alcalins et des kimberlites. Les études antérieures sur des enclaves dans les kimberlites (e.g. Walker et al., 1989,

Pearson et al., 1995) ont montré que le système Re-Os peut aussi être utilisé pour dater la lithosphère mantellique dans ce contexte, quoique les corrélations entre les rapports isotopiques d'Os et les éléments majeurs soient souvent moins nettes que dans les lherzolites orogéniques. Actuellement nous étudions des xénolithes ultrabasiques provenant de deux endroits: le Bassin Panonien de Roumanie (en collaboration avec H. Downes de l'Université de Londres) et la partie occidentale du Canada. Les données actuelles sur les péridotites du Bassin Panonien suggèrent que la lithosphère dans cette région a un âge de plus de deux milliards d'années.

L'étude Re-Os des xénolithes canadiens fait partie d'un projet de collaboration internationale financé par le CRSNG Canada, en 1995, pour une période de 4 ans, auquel J. Ludden est associé en tant que participant français. Le projet est multidisciplinaire et il a pour objectif la compréhension de l'origine et de l'évolution de la lithosphère sous continentale au Canada. Deux cibles sont visées (i) la province des Esclaves aux Cordillères, et (ii) la région entre le bouclier de la province Supérieure et la province de Grenville. Les xénolithes sont présents soit dans les laves alcalines soit dans les kimberlites le long de ces deux sections ; la lithosphère d'âges différents, de composition et propriétés physiques différentes, a été échantillonnée par ses magmas. L'analyse pétrographique et chimique des échantillons est couplée à l'analyse des caractéristiques physiques ainsi qu'aux études de la tomographie mantellique au moyen d'expériences de sismique passive.

Dans le contexte de ce projet, J. Ludden dirige deux thèses (avec J. Carignan, CRPG et D. Francis à McGill Univ. Montréal), dont l'une sera réalisée en partie au CRPG par Anne Peslier pour ce qui concerne les mesures de Re-Os. Elle projette également de faire des analyses isotopiques du Pb, du Sr et du Nd. Elle compte également utiliser la sonde ionique afin de caractériser les phases métasomatiques dans ces xénolithes.

#### **II.4. Evolution comparative des cratons Précambriens.**

En collaboration avec une équipe de recherche française et d'autres groupes internationaux, le CRPG participera à une série d'études à l'échelle lithosphérique associant plusieurs thèmes: évolution structurale, régimes des flux de fluides, régimes thermiques, formation de bassins et formation des cratons post-archéens. Une cartographie récente des cratons de Dharwar et Pilbara a permis de définir des traits structuraux faisant appel à une tectonique verticale incluant diapirisme et "sagduction". Ces types de structures contrastent fortement avec ceux de la Province Supérieure (projet Lithoprobe) où de nombreux arguments plaident en faveur d'une tectonique tangentielle lors du processus d'accrétion. Est-ce que la déformation au centre des cratons diffère de celle des marges ?

Nous proposons un modèle de l'évolution comparative des différents stades tectoniques de la Province Supérieure et de ceux du craton Dharwar. Est-ce que la proposition est réaliste ? Les progrès analytiques de la géochimie de haute précision ont démontré la possibilité de réaliser de rapides analyses sur monozircons à la sonde ionique et à l'ICP-MS laser. L'analyse par ICP-MS en mode solution et par laser est rapide et nous pouvons maintenant analyser des éléments clés tels que Zr, Nb, Ta et des Terres rares avec une limite de détection de quelques ppb et une précision de 2-3%.

L'application généralisée d'analyses sismiques crustales et profondes, devrait permettre, durant la prochaine décennie, de résoudre de nombreux problèmes sur la formation de la protocroûte terrestre. Suite aux expériences LITHOPROBE nous avons démontré qu'il était possible d'obtenir des images d'excellente qualité dans le socle. Des études par voie marine sont maintenant possibles (ACCRETE) pour un coût raisonnable. Les Australiens sont en train de proposer des études de sismique réflexion dans le craton Yilgan, et les Américains, avec la coopération de l'Afrique du Sud, vont compléter une expérience de sismique passive sur le craton Kaapvaal.

Est-ce que les images sismiques du craton Dharwar vont être très différentes de celles de la Province Supérieure ? Avons-nous "sur-interprété" les anomalies La/Nb dans les komatiites archéennes ? Les âges in-situ auront-ils la résolution nécessaire afin de résoudre les problèmes autres que la géochronologie régionale. Pour connaître l'origine des fluides, serons-nous limités à n'appliquer que les âges par TIMS qui donnent des précisions de l'ordre de  $\pm 1$  Ma ?

## II.5. Cartographie et métallogénie 3D du Massif Central: le chantier "Limousin" (Projet GéoFrance 3D)

Les premiers travaux, entrepris en collaboration avec le CREGU (M. Cuney) et Montpellier (S. Scaillet) ont pour objet de lever une ambiguïté sur des résultats de datation obtenus sur le massif du Limousin par la méthode  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , montrant des âges variant entre 309 et 302 Ma, alors que la datation par Rb/Sr indiquait une mise en place de 315 Ma. Cette incohérence apparente est parfaitement expliquée par une mise en place de l'ensemble de l'édifice en deux étapes: (i) mise en place à 10 km de profondeur du granite du Limousin à 315 Ma, refroidissement de l'ensemble du batholite à 350°C; (ii) remontée rapide vers 4 km de profondeur et fracturation en deux blocs vers 305 Ma. Les différences observées sur les âges  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  seraient dûes au fait que les différentes roches traversent l'isotherme 300°C à différentes époques, compte tenu des vitesses ascensionnelles et de refroidissement du batholite.

Les travaux se poursuivent, en collaboration avec de nombreux organismes de recherches et universités, en vue d'aboutir: (1) à une image 3D réaliste des structures géologiques régionales sur une épaisseur de 3 à 5 km et (2) à une reconstitution des circulations de fluides à l'échelle régionale dans la tranche de temps située autour de 300 Ma ( $\pm 25$  Ma), replacées dans le cadre de cette image 3D. Les résultats attendus sont une meilleure compréhension de la genèse des districts minéralisés, en particulier ceux qui contiennent de l'or, et la définition de critères de prospection stratégique ainsi qu'une meilleure compréhension (appuyée sur des chemins P-T-t quantifiés) de l'évolution de la chaîne de collision varisque à la fin du Carbonifère et au début du Permien.

## II.6. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème II

Chercheurs permanents: P. Barbey (100%), W. Brown (100%), J.M. Bertrand (100%), A.M. Boullier (50%), F. Chalot Prat (100%), M. Champenois (100%), B. Charoy (50%), A. Cheilletz (30%), J. Desmons (100%), D. Gasquet (100%), C. Le Carlier de Veslud (30%), J. Leterrier (100%), J.N. Ludden (50%), J. Macaudière (100%), C. Marignac (50%), D. Ohnenstetter (100%), L. Reisberg (100%), J.J. Royer (30%), J.M. Stussi (50%), J.L. Zimmermann (50%).

Thésards: M. Adou, D. Aissa, H. Aït Malek, F. Arnaud, Y. Branquet, A. Dereje, B. Gérard, O. Kolli, C. de Mesquita Barros, C. Valle Pinto-Coelho

## II.7. Liste des 5 publications les plus significatives du thème II

- Bouloton J. & Gasquet D. (1995) - Melting and undercooled crystallisation of felsic xenoliths from minor intrusions (Jebilet massif, Morocco). *Lithos*, **35**, 201-219.
- Calvert, A., Sawyer, E.W., Davis, W.J., and Ludden, J.N. (1995) Archaean subduction inferred from a mantle suture in the Superior Province. *Nature*, **375**, 670-674
- Ohnenstetter D, Brown WL (1996) Compositional variation and primary water contents of differentiated interstitial and included glasses in boninites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **123**, 117-137.
- Pons J. , Barbey P., Dupuis D., Léger J.M. (1995) - Mechanisms of pluton emplacement and structural evolution of a 2.1 Ga juvenile continental crust: the Birimian of southwestern Niger. *Precambrian Res.*, **70**, 281-301.
- Reisberg, L. and J-P. Lorand (1995) Correlations between osmium isotopic ratios and major elements compositions indicating old (>1 b.y.) model ages in orogenic lherzolite massifs. *Nature*, **376**, 159-162.



**Terre - eau : les fluides dans le système croûte-bassin-océan - Thème III**

# Thème III

## Terre-eau : Les fluides dans le système croûte-bassin-océan

Deux questions fondamentales s'étaient dégagées lors de l'élaboration du projet de restructuration du C.R.P.G. en 1994 comme étant des problématiques importantes et fédératrices dans le domaine des fluides:

- Quelles sont les caractéristiques physiques, géométriques et mécaniques, à différentes échelles, du milieu naturel traversé par les fluides ? Comment évoluent ces propriétés dans le temps et quelles en sont les conséquences ?

- Quels sont les processus de transferts, les interactions fluides-roches et les réservoirs sources de ces fluides ? Quels sont les temps de transferts, les bilans de masse et énergétique dans un système géologique ?

Les points ci-dessous reprennent ces deux thèmes de recherche généraux en donnant le détail des principaux projets menés dans ce domaine, durant les deux dernières années.

### III.1. Géométrie des circulations fluides et propriétés des réservoirs: de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique

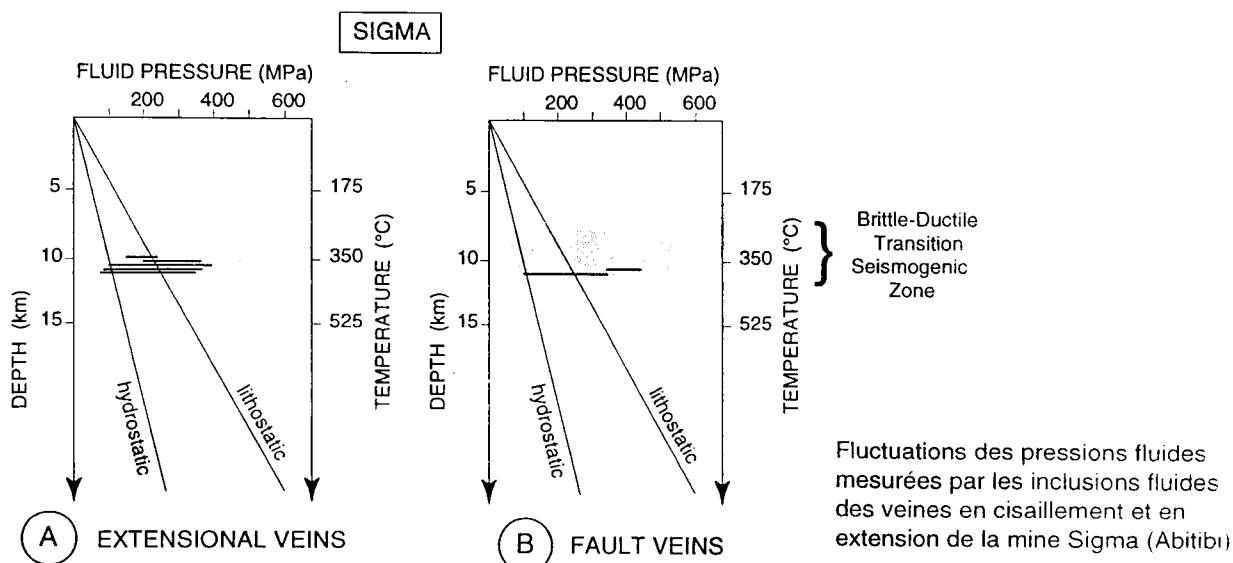
#### III.1.1 Géométrie et comportement des milieux insaturés (sols).

Les milieux insaturés, et tout particulièrement les sols, jouent un rôle fondamental dans les problèmes d'érosion et les bilans de matière en sub-surface (transport des argiles), dans les bilans hydriques et la dispersion des polluants. Afin de caractériser la géométrie et les échelles aux quelles ces processus agissent dans les sols, plusieurs méthodes ont été utilisées suivant l'échelle d'étude considérée: (i) approche fractale; (ii) caractérisation spatiale par géostatistique; (iii) traitement d'image. A l'échelle micro et macroscopique, la porosité, la perméabilité et les structures d'un sol ont un comportement fractal auto similaire, ce qui permet de proposer un modèle des courbes de rétention d'eau dans les sols et de déterminer les fonctions de pédo-transfert à partir des courbes de distribution granulométrique des sols.

#### III.1.2. Perméabilité des zones de cisaillement

*Zones à forte circulations fluides: cas de l'Abitibi*

Ce travail a permis de comparer les champs de veines aurifères archéennes à quartz-tourmaline-carbonates de la région de val d'Or (Abitibi) aux régions sismiques actuelles: dimension de la zone de répartition des aftershocks autour d'une surface de rupture principale, importance des séismes précurseurs ou des aftershocks (magnitude 3-4 ou moins). Les fluctuations de la pression fluide, présentées sur les figures suivantes et qui sont les déclencheurs des séismes, ont atteint des valeurs de 200 MPa (thèse de K. Firdaous, 1995).



### Zones à circulations fluides modérées: cas de l'Aar.

Dans le massif de l'Aar, la foliation régionale alpine subverticale se développe par un mécanisme de dissolution-cristallisation. La taille du système clos (du point de vue des transferts) évolue depuis le mm ou cm (naissance de la foliation) vers le m puis le km (connexion des bandes de dissolution par la fracture des objets durs). Les inclusions fluides dans les minéraux syntectoniques et les cavités alpines tardives montrent, à température décroissante, l'arrivée de fluides carboniques dans le système auparavant dominé par des fluides aqueux peu salés. Ce changement marque le début d'une circulation fluide à l'échelle de la croûte (projet DBT, "Fluides et Failles").

### III.1.3. Modélisation de la géométrie et des propriétés physiques des milieux géologiques

#### Caractérisation des propriétés physiques des roches à partir de leur réponse sismique :

Ces travaux, en collaboration avec l'IFP, ont pour objectif de mettre au point une méthode de prévision géostatistique des propriétés d'un réservoir sédimentaire à partir de sa réponse sismique. Une méthode de prévision des lithologies a été mise au point à partir d'une technique de simulation par cokrigage.

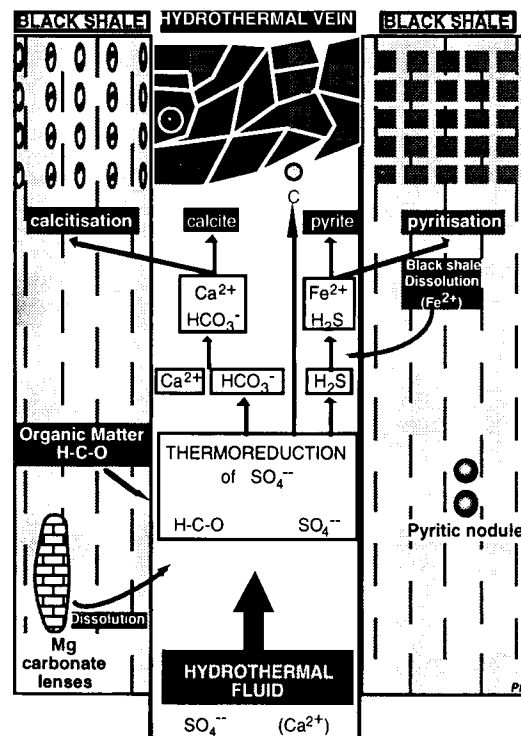
#### Modélisation et simulation de corps géologiques complexes:

Des modèles nouveaux ont été développés dans le cadre du projet GOCAD permettant la représentation d'objets géologiques complexes (grilles stratigraphiques prenant en compte les anisotropies locales). Des méthodes géostatistiques ont été développées pour simuler les propriétés physiques des roches en fonction des données disponibles (forages, sismique, variogrammes,...).

La confrontation de modèles géométriques évolutifs avec les observations disponibles est utilisée pour prédire la maturation et la migration des hydrocarbures au cours de la déformation.

### III.2. Processus et bilan des transferts

#### III.2.1: Fluides chauds dans les bassins: origine et interactions eaux-roches



Mécanisme de thermoréduction des sulfates, responsable de la précipitation des carbonates et de la pyrite dans les veines hydrothermales à émeraude de Colombie

La minéralisation à émeraude encaissée dans les schistes noirs riches en matière organique (MO) du Crétacé inférieur sur les bordures est et ouest du bassin de la Cordillère orientale de Colombie, ont été choisies pour caractériser les fluides chauds ( $T=300^{\circ}\text{C}$ ) et les interactions fluides-roches dans les bassins.

Plusieurs questions restent posées sur les mécanismes géochimiques responsables de la genèse de ces gisements notamment l'origine du carbone des carbonates et le mécanisme responsable de la précipitation de la pyrite dont l'origine évaporitique du soufre a déjà été démontrée (Giuliani et al., 1995; Banks et al., 1995). La thermoréduction des sulfates (TRS) par interaction avec la matière organique est le mécanisme mis en évidence pour la précipitation des carbonates et des sulfures (cf figure ci-dessus). L'oxydation de la matière organique est démontrée par l'étude des isotopes stables du carbone qui prouvent que les carbonates cristallisent en équilibre avec le carbone organique aux températures déterminées par la microthermométrie.

La composition isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , D/H a été mesurée dans les émeraudes de 16 gisements colombiens. Les valeurs obtenues révèlent un fort enrichissement en  $^{18}\text{O}$  et mettent en évidence une contribution d'eaux de bassin. D'autre part, la composition globale des fluides associés aux émeraudes est à dominante aqueuse (spectrométrie quadripolaire des gaz permanents).

### **III.2.2. Circulation dans les aquifères: origine et temps de résidence des espèces dissoutes**

Ces travaux s'inscrivent dans la continuité de la recherche de B. Marty à Paris. Deux actions significatives ont eu lieu :

- Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie de Mlle Maria Clara Castro : Transfert des gaz rares dans les eaux de bassins sédimentaires : exemple du Bassin de Paris (B. Marty co-directeur).

- Valorisation de la thèse de D.L. Pinti par deux articles. L'un reporte la première étude complète des gaz rares dans le pétrole ayant utilisé ces gaz comme traceurs de la migration des huiles et des interactions huile-eau, dans le cas des huiles du Bassin de Paris. Le deuxième article propose l'utilisation des abondances de gaz rares atmosphériques dans les eaux profondes de bassin comme indicateurs des paléotempératures de recharge, ce qui permet un calage temporel des circulations de ces fluides.

### **III.2.3. Bilan d'échanges entre une couverture sédimentaire et le socle: l'exemple du rift continental du Rhin.**

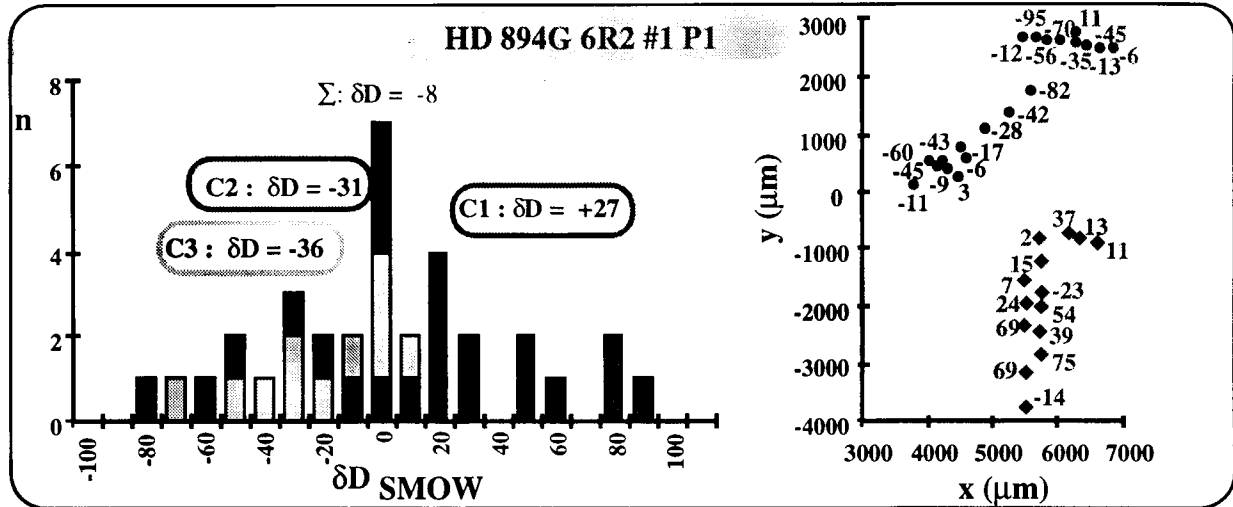
Ces travaux ont été conduits dans le cadre du programme DBT "fluides dans la croûte" et du projet géothermique de Soultz, en collaboration avec le CREGU, les Universités de Lille et de Leeds (GB). Ils ont permis de démontrer que le graben du Rhin est le siège de circulations fluides importantes entre une couverture sédimentaire et le socle granitique jusqu'à des profondeurs supérieures à 3500m. L'étude pétrographique des minéraux hydrothermaux (quartz, sulfates, carbonates) a montré l'existence de cinq phases fluides de salinité et de température d'homogénéisation différentes. La géochimie des inclusions fluides (compositions chimiques et isotopes stables des quartz) ainsi que les données microthermométriques montrent que ces différentes phases peuvent s'expliquer par un modèle de mélange entre un pôle d'eau de bassin à salinité élevée et un pôle d'eau de surface à salinité faible. Ces processus de mélange sont mis en relation avec les circulations à grande échelle (convection) observées actuellement dans la zone de Soultz.

### **III.2.4. Diagenèse de la croûte océanique**

Pour essayer de quantifier l'altération hydrothermale dans les niveaux profonds de la croûte océanique, nous avons utilisé la micro-sonde ionique pour mesurer les rapports D/H in situ dans des minéraux hydroxylés de la croûte océanique inférieure (Leg ODP 894, Hess Deep, Ride Est-Pacifique). Des hornblendes magmatiques et des actinolites réactionnelles, y sont observées.

Les valeurs de  $\delta\text{D}$  mesurées sur ces deux types d'amphiboles sont très variables et très inhabituelles (cf figure ci-avant), avec des  $\delta\text{D}_{\text{smow}}$  allant jusqu'à + 50‰. La meilleure explication pour ces valeurs positives, est un enrichissement des fluides hydrothermaux en D par réduction de l'eau et production de  $\text{H}_2$  au cours de son interaction avec la croûte océanique (Ding K. and Seyfried W.E. Jr, 1994). Ces résultats sont importants parce qu'ils montrent d'une part, qu'en mesurant in situ

les rapports D/H, on peut observer l'oxydation de la croûte océanique par les fluides hydrothermaux, et d'autre part, que ces réactions peuvent avoir un effet non négligeable sur le bilan des isotopes de l'hydrogène entre le manteau et la surface. Sur les mêmes minéraux, nous avons analysé les éléments traces, pour tenter de distinguer les phases primaires, héritées des épisodes magmatiques, et les phases secondaires, formées au cours des réactions hydrothermales. Au stade actuel, il n'est pas évident de trouver une logique simple entre les signatures isotopiques D/H et les signatures en éléments traces.



Distribution et répartition spatiale des rapports D/H mesurés par microsonde ionique sur trois amphiboles d'une section polie (Hess Deep). Les valeurs moyennes obtenues sont de +27, -31 et -36 pour chaque grain, alors que par analyse conventionnelle des mêmes grains, elles sont respectivement -31.8 et -40.4 pour C1 et C2. L'écart observé sur C1 entre les deux méthodes montre que les mesures effectuées sur un seul plan du grain ne donnent pas sa valeur moyenne en 3D. Cependant la différence entre la moyenne générale des mesures par microsonde (-8) et celle des analyses globales (-36) semble raisonnable, comparée à la dispersion des valeurs mesurées sur cet échantillon (figure de droite).

### III.2.5: Modélisation numérique des transferts dans les bassins: cinétique, bilans de masse et d'énergie

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre des études des bilans thermiques, fluides et de masse des formations de la lithosphère, avec un intérêt particulier porté aux bassins sédimentaires compte tenu de leurs ressources naturelles. Ils se rattachent pour la plupart à des programmes nationaux ou européens (GPF - projet Balazuc, CEE -Analogues Naturels, Géofrance 3D). Deux types de résultats ont été obtenus:

- la mise au point d'outils numériques (logiciels), notamment en 3D, pour l'étude des phénomènes de transferts couplés (convection, thermo-mécanique, interaction fluides-roche) ; la thèse de B. Gérard a pour objectif la modélisation des processus de transferts dans les corps géologiques. Le logiciel THERMASS interfacé avec le logiciel GOCAD, permet de résoudre un ensemble d'équations de transferts couplées (Darcy, Fourier, mécaniques) pour des objets naturels complexes (structures faillées, déformées, plissées).

- l'application de ces outils à des études de cas particulièrement choisis, pour lesquels la quantification des transferts apportent une meilleure connaissance des processus mis en jeu.

#### Caractérisation de l'évolution thermique de la marge Ardéchoise

Ces travaux conduits dans le cadre d'un programme GPF, avaient pour objet la reconstitution de l'état thermique et des circulations fluides éventuelles au cours de l'histoire géodynamique de la marge ardéchoise (collaboration avec le CREGU). La partie Ouest de la marge a été le siège de circulations hydrothermales intenses avec des échanges de fluides entre les formations de surface et le socle profond, notamment au Trias, alors que la partie Est du bassin est restée en régime purement conductif sans circulation de fluides majeure entre les différentes formations, à l'exception des zones de failles. Ces circulations cessent au Crétacé, alors que la couverture maximale du bassin est estimée à  $1800 \pm 200$  m, compte tenu des différentes contraintes disponibles (traces de fission, données

microthermométries), et associée à un flux géothermique régional de  $80 \pm 5 \text{ mWm}^{-2}$

L'étude de cette marge océanique va se poursuivre puisqu'elle constitue une des cibles du projet GéoFrance 3D, orientée vers les transferts de matière et les interactions fluides-roches sur une paléomarge distensive. Le CRPG prendra part à l'estimation des bilans de transfert thermiques et fluides grâce à la mise au point et à l'utilisation de méthodes de modélisation numérique.

### III.3 Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème III

Chercheurs permanents : A.M. Boullier (50%), A. Cheilletz (20%), E. Deloule (25%), C. France-Lanord (30%), G. Giuliani (50%), P. Jacquemin (50%), C. Le Carlier de Veslud (40%), J.N. Ludden (50%), J.L. Mallet (50%), B. Marty (25%), J.J. Royer (40%), J.L. Zimmermann (50%).

Thésards: Y. Branquet, B. Gérard, A. M. Ribeiro-Althoff, C. Valle Pinto-Coelho.

### III.4. Liste des 5 publications les plus significatives du thème III:

Robert F., Boullier A.M. & Firdaus K. (1995) Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting. *J. Geophys. Res.* 100, pp. 12861-12879.

Dubois M., Ayt Ougougdal M., Meere P., Royer J.J., Boiron M.C. & Cathelineau M. - Temperature of paleo-to Modern self sealing within a continental rift basin: the fluid inclusion data (Soultz-sous-Forêts, Rhine Graben, France). *Eur. J. Min.* (accepté)

Giuliani G., Cheilletz A., Arboleda C., Rueda, F., Carillo V. & Baker J. (1995): An evaporitic origin of the parent brines of Colombian emeralds: fluid inclusion and sulfur isotopic evidence. *Eur. J. Min.* 7, 151-165.

Pinti D.L. & Marty B. (1995) Noble gases in crude oils from the Paris Basin, France : Implications for the origin of fluids and constraints on oil-water-gas interactions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 3389-3404

Scaillet S., Cuney M., Le Carlier de Veslud C., Cheilletz A. & Royer J.J. Cooling pattern and mineralization history of the Saint Sylvestre and Western marche leucogranite pluton, French Massif Central II. Thermal modelling and implications for the mechanism of U-mineralization. *Geochim. Cosmochim. Acta* (accepté).

**Micro-marqueurs isotopiques des environnements  
et des paléoenvironnements - Thème IV**

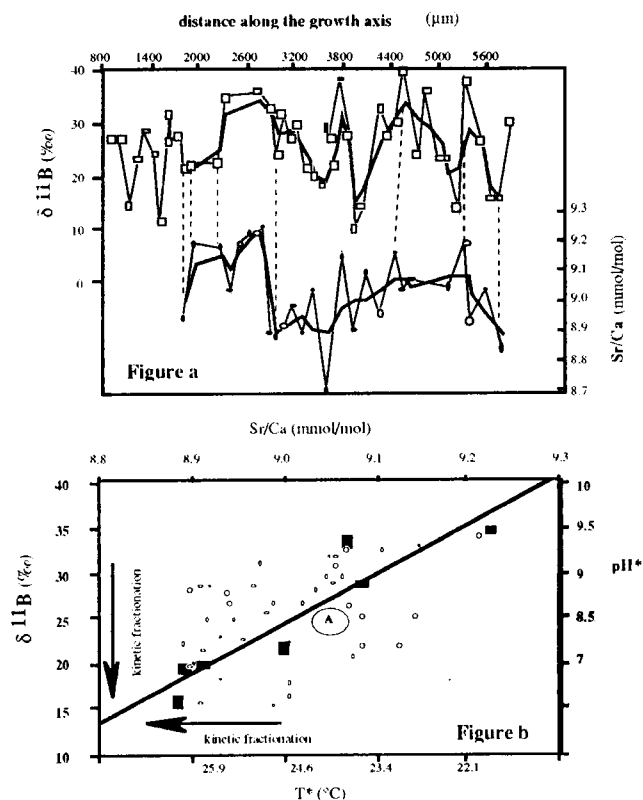
# Thème 4

## Micro-marqueurs isotopiques environnements et paléoenvironnements.

Ce thème a pour objectif de développer l'analyse des isotopes stables (H, B, C, O) à des fins de reconstitution des conditions environnementales. L'utilisation de la sonde ionique 1270 doit permettre d'appliquer les analyses des isotopes stables sur des objets géologiques jusque là trop petits pour être analysés (e.g. argiles, microfossiles individuels). Les retards accumulés sur la livraison de la sonde ionique n'ont pas permis de débiter réellement les projets envisagés il y a deux ans pour ce thème. Cependant, des résultats ont été obtenus, d'une part, sur des travaux préparatoires utilisant la sonde ionique ims3f du CRPG et, d'autre part, sur les programmes supports de ces projets, en particulier sur l'étude de l'érosion himalayenne. Au cours des deux dernières années, *Albert Galy (thèse BDI)* et *Kay Beets (CCE)* sont venus au CRPG pour développer des projets impliquant la sonde ionique 1270 et ont du réorienter leurs activités vers ces programmes parallèles.

### IV.1. Enregistrement des conditions paléoenvironnementales océaniques par les coraux

Ce projet engagé par *Kay Beets et Etienne Deloule* a été réorienté vers l'analyse isotopique du bore à la sonde ionique ims3f. La composition isotopique du bore des carbonates dépend du pH du milieu de précipitation et donc, les carbonates biogéniques représentent potentiellement un



a : Valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  et rapports Sr/Ca mesurées sur des profils adjacents de coraux *Porite sp.* du golfe d'Aqaba. Sur des périodes de croissances de 4 mois ( $\approx 5 \text{ mm}$ ) le  $\delta^{11}\text{B}$  varie de 30‰ et les rapports Sr/Ca de 0.4 (nmol/mol).

b : La covariation de  $\delta^{11}\text{B}$  avec Sr/Ca sur 7 spots d'analyse parfaitement superposés (carrés) est forte ( $R=0.93$ ) et indique que les deux traceurs sont contrôlés par le même processus. Sur  $\delta^{11}\text{B}$ , une variation de 30‰ dépasse d'un ordre de grandeur les variations attendue pour les seules variations de pH du milieu. Il est donc probable que l'organisme exerce lui même une influence dominante sur les valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  et de Sr/Ca. Les taux de calcification et les déséquilibres cinétiques associés peuvent expliquer une incorporation préférentielle de  $^{10}\text{B}$  dans le squelette durant des intervalles de croissance rapide. Dans le même temps, le rapport Sr/Ca diminue probablement par l'action d'un enzyme spécialisé dans la catalyse du Ca.



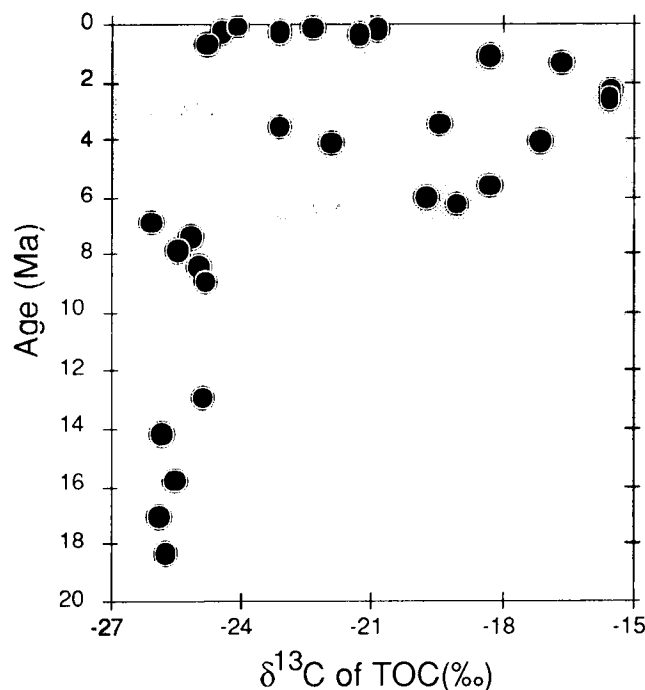
moyen de tracer le pH océanique au cours du temps. Un enregistrement des pH océaniques serait un apport considérable à la connaissance des variations de l'alcalinité des océans.

Des coraux ont été mesurés parallèlement et perpendiculairement à l'axe de croissance, avec des pas d'analyses de 50 à 200 $\mu\text{m}$ , le spot d'analyse ayant un diamètre de 20 à 35  $\mu\text{m}$ . Cette résolution spatiale équivaut à des périodes de croissance de quelques jours. Les mesures obtenues ont révélé des variations de  $\delta^{11}\text{B}$  d'une ampleur surprenante. Ces résultats démontrent, qu'à l'échelle de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ , les compositions isotopiques du bore sont modifiées, soit par des processus vitaux liés aux vitesses de croissance, soit par des évolutions en système localement fermé (pH différents du pH externe). Un autre développement analytique a été effectué, en parallèle, sur les coraux avec l'analyse des rapports Sr/Ca, pour reconstituer les températures de surface lors de la cristallisation. Comme pour le bore, les effets vitaux semblent modifier profondément ces rapports et altérer l'interprétation qui pourrait être faite de rapports Sr/Ca en terme de paléo-températures.

Ces travaux à l'échelle micrométrique sont fondamentaux pour comprendre les traceurs géochimiques et établir la validité de leurs messages paléoenvironnementaux. L'ensemble des études réalisées sur carbonates biogéniques est encourageant et constitue une base appréciable pour les futurs développements envisagés avec la sonde 1270.

## IV.2. L'érosion de l'Himalaya

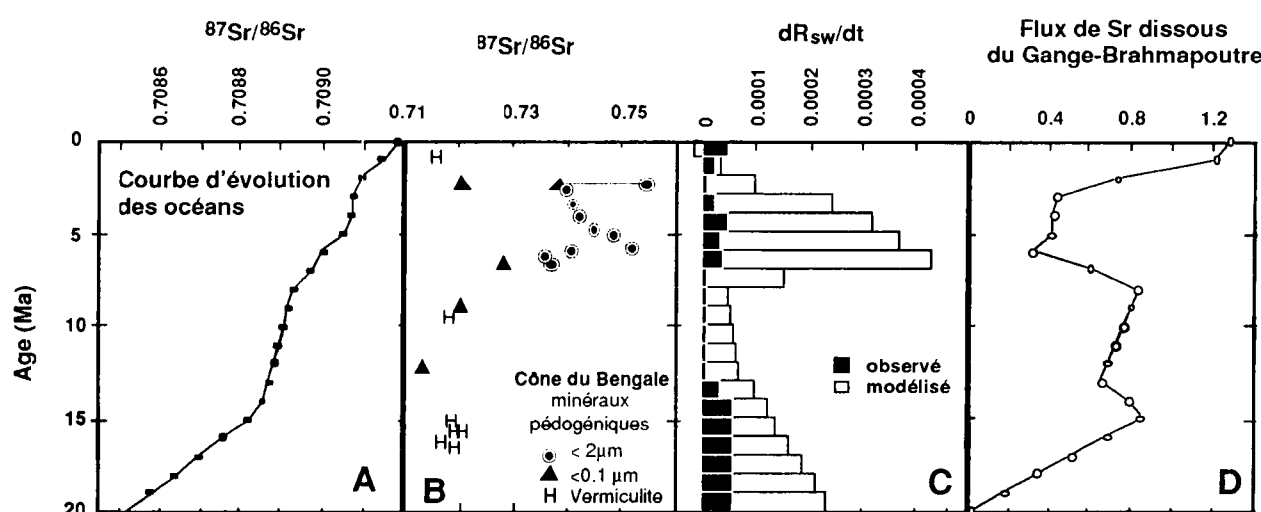
Un ensemble d'études sur l'érosion himalayenne est engagé au CRPG depuis 1993 dans le cadre du programme DBT "Érosion de l'Himalaya" (coordinateur C. France-Lanord). L'objectif est de reconstituer les variations passées du régime d'érosion à partir de l'étude des accumulations sédimentaires syn-tectoniques et du système d'érosion actuel. L'approche est basée sur l'utilisation de l'ensemble des traceurs géochimiques et isotopiques pour reconstituer les conditions d'altération, les vitesses d'érosion ou même le couvert végétal. Les principaux résultats acquis depuis deux ans sont :



Variations des compositions isotopiques de carbone du carbone organique total dans les sédiments du cône du Bengale Leg 116 (France-Lanord and Derry, 1994). Cette matière organique est très majoritairement d'origine terrigène et nous renseigne sur la végétation de la zone source des sédiments. Les végétaux de type C3 (forêt) ont des valeurs autour de -25‰ et C4 (savane, herbes) autour de -12‰.

- la mise en évidence d'un changement majeur de végétation C3 à C4 (de forêt à savane) à 7Ma (Fig. 2). Ce changement est strictement synchronisé d'un changement de régime d'érosion et a un impact global sur la composition isotopique du carbone des océans (France-Lanord et Derry, 1994; Derry et France-Lanord, 1996). Il implique un changement des conditions environnementales attribué soit à la mise en place de la mousson soit à un processus global en réponse à une variation de la PCO<sub>2</sub> atmosphérique.

- l'augmentation très importante du rapport <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr des océans depuis 50 Ma est classiquement attribuée à l'altération des roches silicatées liée à l'érosion de l'Himalaya. L'étude menée sur le système d'érosion actuel (thèse A. Galy) a permis de situer les zones d'altération des silicates. Dans le cône du Bengale, les minéraux pédogéniques (smectites, vermiculites) enregistrent les compositions isotopiques de Sr des eaux de la plaine Indo-Gangétique. Nous avons ainsi mis en évidence, une variation considérable des rapports <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr à 7 Ma dont les effets sur la composition océanique de Sr sont tels qu'ils doivent être compensés par une baisse des flux de Sr des rivières himalayennes. Ces résultats impliquent une diminution sensible des vitesses d'érosion de la chaîne entre 7 et 1 Ma (Derry et France-Lanord, 1996).



**A :** Évolution des compositions isotopiques de Sr dissous dans les océans depuis 20Ma. **B :** Variation des composition isotopiques de Sr des minéraux pédogéniques dans le cône du Bengale; ces variations impliquent une évolution parallèle des compositions isotopiques du Gange et du Brahmapoutre (GB). **C :** Modélisation de l'effet de l'augmentation des <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr des rivières GB sur la composition isotopique des océans et comparaison avec les variations observées. L'augmentation de <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr des rivières GB à 7 Ma doit être compensée par une diminution des flux de Sr de ces rivières (**D**).

Actuellement, l'effort est poursuivi dans le domaine de l'étude des accumulations sédimentaires, car la traduction des variations observées dans les différents compartiments du système (Siwaliks, Delta du Bangladesh, cône du Bengale) permettra d'établir les processus intervenant dans la modification du régime d'érosion (thèse Albert Galy);. De plus, nous avons engagé un programme sur le cycle isotopique du bore dans l'érosion himalayenne et son impact sur le bilan océanique du bore(thèse E.Rose);.

### IV.3. L'avenir

L'avenir est en premier lieu tourné vers l'arrivée de la sonde ionique 1270. Celle-ci permettra d'entamer les projets de développements d'analyses des isotopes stables sur micro-particules (argiles, pollens, microfossiles). Claire Rollion (thèse BDI) débutera une thèse en octobre 96 sur ce sujet et sera au centre des développements dans ce domaine. L'étude des systèmes d'érosion sera poursuivie avec un projet destiné à déterminer et quantifier les transferts d'Os radiogéniques vers l'océan sur l'exemple himalayen pour lequel une thèse devrait débuter en 96. Enfin un projet de

datation des temps d'exposition aux rayonnements cosmiques par la méthode  $^3\text{He}$  sur grenat sera engagée fin 96. D'autres projets, tournés vers l'étude de conditions environnementales seront engagés. Un projet d'analyse de lichens utilisés comme pièges naturels d'aérosols et permettant de quantifier les mouvements et les origines des aérosols sera engagé par J. Carignan. Enfin le développement analytique d'un couplage chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse pour l'analyse isotopique de l'hydrogène, en collaboration avec le CREGU, ouvrira la porte vers l'analyse isotopique d'hydrogène sur micromarqueurs organiques.

#### IV.4. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème IV

Chercheurs permanents : M. Chaussidon (50%), E. Deloule (25%), C. France Lanord (60%), B. Marty (25%).

Chercheur post-doctorant : C. Beets

Thésards : A. Galy, E. Rose.

#### IV.5. Liste des 5 publications les plus significatives du thème IV

Beets, C.J. & Deloule, E., soumis *EPSL*,  $\mu\text{m}$ -scale variations in boron isotopic composition of corals: implications for the role of biological control over boron isotope fractionation.

Derry L.A., & France-Lanord C (1996) Neogene Himalayan weathering history and river  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  : impact on the marine Sr record. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **142**, 59-74.

Derry, L. A., & France-Lanord, C., (1996) Neogene Growth of the Sedimentary Organic Carbon Reservoir. *Paleoceanography*, **11**, 267-275.

France-Lanord, C., & Derry, L. A. (1994)  $\delta^{13}\text{C}$  of organic carbon in the Bengal fan: source evolution and transport of C3 and C4 plant carbon to marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58** : 4809-4814.

Galy, A., France-Lanord, C., & Derry, L. A. (1996) Tectonometamorphic evolution of the central Karakorum (Balistan, northern Pakistan) *Tectonophysics*, **260**, 109-118.

**Terre et activités anthropiques (des ressources aux déchets) - Thème V**

# **Thème V**

## **Terre et activités anthropiques (des ressources aux déchets).**

Un des enjeux majeurs de notre société est de pouvoir répondre à la demande croissante en ressources minérales et conjointement de pouvoir maîtriser l'effet des activités anthropiques sur l'environnement. Ce dernier aspect notamment, est un champ en pleine expansion du fait de la nécessité de plus en plus pressante de pouvoir traiter, inerte, stocker ou recycler les déchets de l'activité humaine. Le CRPG a choisi d'élargir son champ d'investigation et de mobiliser ses chercheurs sur des questions pressantes posées par notre société. Ces activités de recherche finalisée portent sur deux programmes principaux: (1) un programme de métallogénie destiné à préserver une recherche performante dans ce domaine et (2) un programme de transfert de connaissances sur les problèmes actuels de la société. Souvent engagés à la demande de partenaires extérieurs, le plus souvent du monde industriel, ou dans le cadre d'action CNRS coordonnée comme le PR "Analyse et Inertage des déchets", ces projets à plus ou moins long terme, seront un axe fort du CRPG dans les années à venir.

### **V.1. Ressources minérales et métallogénie**

La mise en évidence des facteurs qui, de la source des métaux à leur piégeage, conditionne la genèse des gîtes métalliques, constitue l'axe des recherches en métallogénie du CRPG. La modélisation des mécanismes de concentration, de transport et de dépôt des substances utiles s'élabore à partir d'une étude pluridisciplinaire de cibles à caractère exemplaire, la plupart du temps non accessibles dans l'hexagone. Quatre thèmes de recherche majeurs ont conduit à proposer des modèles génétiques appliqués à la mise en place des minéralisations aurifères, des éléments du groupe du platine (Rh, Pt, Pd) et des métaux rares (Be, Sn, Li, Nb, Ta) en contexte péritholitique ou au sein de bassins profonds, notamment pour Be.

#### **V.1.1. Les zones de cisaillement aurifères**

La source de l'or des gisements situés dans la zone faillée panafricaine est-ouzzalienne au Hoggar a été identifiée sans ambiguïté ainsi que les conditions de sa remobilisation et de sa concentration. L'or est lessivé dans le socle archéen granitique de l'In Ouzzal (IOGU) par des saumures issues de bassins molassiques tardi-panafricains et mobilisées par l'intrusion des batholites liés aux granites "Taourirt" ; drainées dans la zone de cisaillement, ces saumures y rencontrent des fluides superficiels froids et le mélange anisotherme déclenche la précipitation de l'or. La minéralisation aurifère est tardive par rapport au fonctionnement majeur ductile "mésothermal" de la zone de cisaillement qui a structuré les formations panafricaines

Le modèle proposé est susceptible de remettre en cause la liaison implicite, actuellement admise, entre fonctionnement de zones de cisaillement et dépôt des minéralisations aurifères.

#### **V.1.2. Les systèmes magmatiques à métaux précieux**

Un modèle de mise en place des minéralisations platinifères pauvres en sulfures de métaux de base, situés dans les complexes mafiques-ultramafiques a été proposé, suite aux travaux réalisés dans le cadre d'un projet de la communauté européenne: "New exploration methods for platinum and rhodium deposits poor in base-metal sulphides", achevé fin 95. Le modèle montre l'importance des magmas résiduels pour concentrer et déposer les éléments du groupe du platine dans les interstices situés entre les minéraux primaires cumulus à plusieurs niveaux de la pile cumulative dès les minéralisations chromifères supérieures. Deux intrusions pan-africaines de Madagascar et deux massifs ophiolitiques d'Albanie, hôtes de minéralisations platinifères de type varié, ont été étudiés au moyen d'une approche multidisciplinaire visant à détecter la présence d'un halo formé lors du passage du fluide minéralisant.

### V.1.3. Les systèmes péribatholitiques

Un modèle pétrologique original mettant en évidence une évolution polyphasée avec dépôt tardif des minéralisations lié à la formation des faciès pegmatitiques a été proposé et appliqué à la coupole granitique d'Argemela au Portugal (Be, Sn, Li, Nb, Ta). Ce modèle a été élaboré à partir de l'étude successive de plusieurs cibles, dont celles portant sur les granites à métaux rares de l'orogène varisque ouest-européen, notamment le granite de Beauvoir.

### V.1.4. Les circulations profondes dans les bassins

Les travaux poursuivis ont permis de détecter les mécanismes de circulation des fluides hydrothermaux au sein d'un bassin à partir de l'étude des minéralisations en Be (émeraude) de Colombie. Datations ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ), études structurales et données géochimiques convergent pour faire apparaître un lien entre l'inversion tectonique d'un bassin de lutites noires et la minéralisation, selon le modèle en deux temps : d'abord drainés dans les zones de décollement, les fluides hydrothermaux (saumures du bassin réchauffées à 300°C) sont finalement focalisés dans les structures distensives mineures associées à des structures en duplex au sein desquelles les gemmes se sont développées.

Quelles que soient les minéralisations étudiées, situées en contexte purement magmatique, métamorphique ou sédimentaire, le but recherché est de déterminer la nature des fluides porteurs des substances utiles, leur origine ainsi que les voies de collection et de circulation des fluides. L'origine hydrothermale de la plupart des gisements conduit à déterminer le rôle de la tectonique, ductile à fragile, qui contrôle la formation des bassins sédimentaires, et la structuration des coupoles granitiques et des complexes mafiques à ultramafiques. Dans ce contexte, des travaux en cours s'attachent, d'une part, à caractériser les circulations hydrothermales dans les granites du massif du Ment (Maroc) dont l'originalité réside en l'absence de source magmatique pour les métaux, et d'autre part, à relier la mise en place des minéralisations péribatholitiques (Sn-W-Au) au fonctionnement d'une faille de détachement majeure, à partir de l'exemple du "metamorphic core complex" alpin de l'Edough (Algérie).

Dans les gisements d'or associés à la ceinture de roches vertes archéennes (gisement de Crixas au Brésil), dont l'originalité est d'être associée à des sulfures disséminés métasomatiques, les fluides responsables de la minéralisation sont indiscutablement d'origine métamorphique. Cette étude a permis de dresser par ailleurs un inventaire des phases fluides dans une évolution P-T-t-X et de dater les gisements à 500 Ma (K-Ar et  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ).

### V.1.5. Perspectives

Dans les deux années à venir, la recherche en métallogénie au CRPG va être largement conditionnée par le démarrage de deux grands projets nationaux, à la conception desquels ses chercheurs ont largement contribué : le projet "Géofrance 3D" et le GDR "Métallogénie".

#### (i) le volet "Métallogénie 3D du Limousin" du projet Géofrance 3D

Il s'agit, ici, de reconsidérer la mise en place des gisements du Limousin dans une vision globale des circulations hydrothermales à l'échelle de la croûte supérieure, autour de  $300 \pm 25$  Ma ; le pas de temps choisi, permet de prendre en compte aussi bien les minéralisations péribatholitiques (U, Sn, W) que les gisements d'or.

#### (ii) Le GDR "Métallogénie"

Il s'agit, là encore, d'un programme multidisciplinaire ambitieux (non encore accepté), où le CRPG intervient :

- pour l'étude du célèbre gisement de platinoïdes du Bushveld, au moyen d'une approche méthodologique nouvelle. On se propose de mettre en évidence, suite au modèle proposé, les processus de fractionnement du liquide intercumulus riche en métaux nobles, et ceci à partir de la variation des paragenèses et de l'évolution cryptique de la composition des minéraux au travers d'un banc minéralisé (0,30 à 2 m) ;

- pour la datation ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) des gisements d'or épithermaux et des manifestations associées ;

- pour la recherche des sources de métaux (essentiellement l'or) grâce au traçage isotopique, utilisant en particulier les isotopes du plomb, appliqué aux minéraux sulfurés associés à la minéralisation.

## V.2. Activités de transfert

Né lors de la restructuration du CRPG fin 1994 et du transfert nécessaire de nos compétences académiques aux domaines industriels et culturels, ce thème fédère des travaux effectués sur 1) la caractérisation et la stabilité des matériaux anthropiques mal organisés, et 2) la simulation numérique et l'expertise des matériaux appliquées à l'environnement.

A ce jour, 5 thèses et 3 DEA sont en cours sur ces thématiques. Les partenaires impliqués dans ces recherches, autres que les organismes de tutelle, sont les suivants: ADEME, ANDRA-CREGU, BRGM, CEA, DAUM, EDF, INRA, IRSID, SITA, TREDI.

### V.2.1. Caractérisation et stabilité des matériaux anthropiques mal organisés

#### V.2.1.1. Les déchets ultimes...

Dans le cadre du PR CNRS-SITA, un travail de caractérisation texturale, chimique et minéralogique a été entrepris sur les résidus d'épurations des fumées issus de l'incinération des ordures ménagères (REFIOM). Sur un ensemble représentatif de 60 échantillons, issus de divers centres d'incinération français, et grâce à un protocole de séparation granulométrique et densimétrique, il a été possible de déterminer non seulement la composition chimique de ces REFIOM et leur variabilité saisonnière et géographique, mais également leur concentration en éléments polluants (As, Cd, Pb, Zn, Cr, etc...). En couplant une étude minéralogique (DRX, MEB et MET) et chimique (ICP-AES, ICP-MS et microsonde), il a également été possible d'obtenir une minéralogie détaillée de ces cendres ainsi que les proportions modales de chacune des phases en présence. Cette étude unique à ce jour (*Thèse L. Le Forestier*) a montré l'importance des phases amorphes dans ces produits et jeté les premières bases concernant la localisation des éléments polluants dans les REFIOM.

Dans le cadre d'une collaboration avec la société TREDI, filiale du groupe EMC, une caractérisation minéralogique et chimique des boues de neutralisation des fumées d'incinération de déchets industriels (REFIDI) est actuellement en cours (*Thèse N. Charoy*). Le but est également de déterminer la toxicité réelle de ces matériaux. Les résultats, à ce jour, montrent qu'une partie des métaux lourds contenus dans ces résidus, tels que le plomb, le zinc sont présents dans des phases cristallisées stables (spinelles, apatites). Ces boues sont, donc, en partie déjà stabilisées.

#### ... les produits de stabilisation/solidification...

Pour être en conformité avec l'arrêté du 18 février 1994 (stockage de résidus ultimes de catégorie A en CET de classe I), ces résidus ultimes doivent subir un procédé de stabilisation et de solidification. Plusieurs procédés ont été (et sont) étudiés. Il s'agit de la technique à bases de liants hydrauliques, de la vitrification et de la cristallisation.

##### *Les liants hydrauliques*

En utilisant deux types de ciments, les buts sont : i) de déterminer les interactions existant entre les constituants du déchet et la matrice cimentière, ii) de déterminer le liant hydraulique ou le mélange de liants aboutissant à la meilleure stabilisation du déchet et à la meilleure solidification, iii) de déterminer la quantité optimale de liant à ajouter aux déchets afin de satisfaire à la fois les critères de stabilisation/solidification et les critères économiques en cours (*Thèse N. Charoy*).

##### *La vitrification*

Cette étude avait pour but d'étudier le comportement à haute température des REFIOM, et notamment les rendements de "solubilisation" des différents éléments polluants dans un verre de stabilisation. Il a été montré (*Thèse L. Le Forestier*) qu'à l'exception du chlore, du cadmium et du mercure, très volatils, les autres éléments polluants sont piégés de façon satisfaisante dans une matrice vitreuse.

##### *La cristallisation*

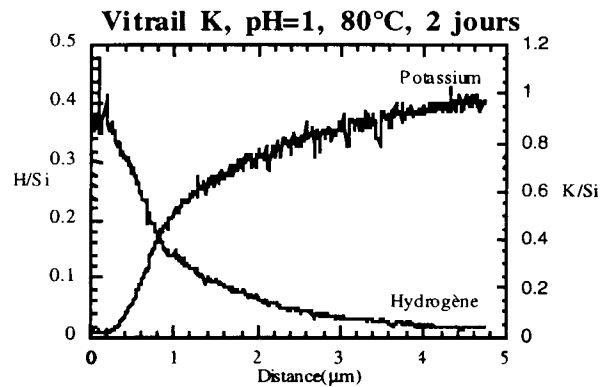
Il a également été montré que le piégeage des éléments polluants peut être optimisé par la réalisation de vitrifiats : verre + cristaux (*Thèse L. Le Forestier*). La fabrication de roches artificielles holocristallines, similaires à celles pouvant exister dans la nature (et dont la stabilité à l'échelle géologique est éprouvée ou éprouvable), a été la stratégie adoptée pour faire une proposition de

procédé de stabilisation à chaud de déchets industriels spéciaux (*Thèse L. Febvay-Choffel et brevet "TREDI THERM"*).

### ... et leur comportement à long terme

#### Approche expérimentale

Pour juger de la durabilité des produits de stabilisation, différents essais de lixiviation sont menés. Ces tests sont menés sur les ciments (*Thèse N. Charoy*) ou sur les verres de stabilisation (*thèses L. Le Forestier et J. Sterpenich*). L'originalité de ses travaux réside dans le fait que l'effort de caractérisation porte aussi bien sur le lixiviat (ICP-AES et ICP-MS) que sur les produits de stabilisation après altération (MEB, MET, IR, sondes électronique et ionique).

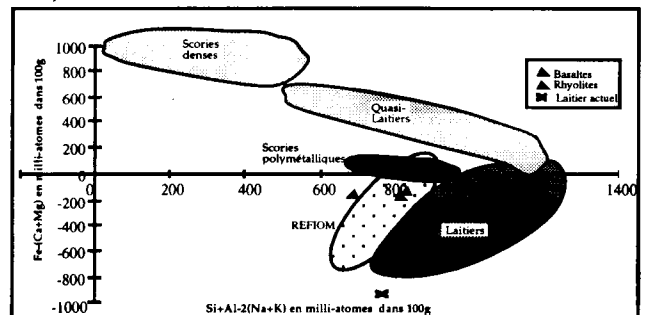


A titre d'exemple, l'utilisation de la sonde ionique permet d'obtenir des profils élémentaires en profondeur avec une résolution nanométrique (Fig. ci-dessus) qui sont ensuite modélisés.

#### Approche analogique

Elle consiste à étudier des objets historiques, ayant subi une altération en milieu naturel, et se rapprochant, par leur état et leur composition chimique, des produits de stabilisation. Ici, sont étudiés les vitraux médiévaux comme analogue de verres de stabilisation de REFIO (Thèse J. Sterpenich). Ces vitraux (IX<sup>ème</sup>-XVI<sup>ème</sup> siècle) permettent de suivre le comportement des éléments de transition et des métaux lourds (c'est à dire les éléments colorants) lors de l'altération d'un verre dans différentes conditions. Les déchets paléométallurgiques sont également utilisés comme analogue de mâchefers et vitrifiats de déchets actuels (Thèse C. Mahé-Le Carlier).

Ces déchets paléométallurgiques (laitiers et scories issus de divers procédés, ferreux et non-ferreux) permettent de suivre le comportement à l'altération des éléments majeurs ou en traces, notamment les éléments de transition et métaux lourds sur une échelle séculaire. Les spécimens utilisés sont âgés de 100 à 1700 ans et sont à dominante vitreuse. Les résultats acquis montrent un fonctionnement de type milieu confiné et l'importance de la fissuration pour cette altération.



Analogie entre les scories paléométallurgiques et les vitrifiats de REFIO du point de vue de la composition chimico-minéralogique

#### V.2.1.2. Les verres et les laitiers

Les cristalleries et l'industrie sidérurgique représentent des activités importantes pour la Lorraine. Des recherches fondamentales ont donc été entreprises sur les matériaux amorphes que sont le cristal (DAUM) et les laitiers des haut-fourneaux (IRSID). Il s'agit de quantifier l'influence des conditions d'oxydo-réduction sur la coloration des pâtes de verre DAUM (Thèse C. Roumet), et d'optimiser les propriétés physico-chimiques des laitiers des haut-fourneaux pour augmenter le piégeage en alcalins (DEA P. Georges).

### V.2.2. Simulation numérique et expertise des matériaux appliquées à l'environnement

#### V.2.2.1. Simulation numérique

La modélisation numérique joue aujourd'hui un rôle de plus en plus important pour quantifier les phénomènes intervenants dans les problèmes d'environnement (estimations de réserves,



quantification des transferts, zones d'influence,...). Deux applications sur des cas réels ont été étudiées :

#### *Site géothermique de Soultz (projet CEE).*

Une modélisation du champ de température du site avant exploitation montre que l'anomalie thermique observée peut être expliquée par des remontées de fluide, impliquant des échanges entre le socle et les sédiments. Cette hypothèse est en bon accord avec les températures mesurées sur forage et les données géochimiques. Ces résultats, associés à une modélisation 3D des directions de fractures du site, ont servi à choisir l'emplacement d'un nouveau forage de 3700m (puit GPK2) destiné à créer un doublet géothermique. Un modèle à plus petite échelle a été construit. Il permet de simuler le champ de perméabilité créé par la fracturation hydraulique et d'estimer les quantités d'énergie mises en jeu au cours du fonctionnement du site.

#### *Réacteur d'Oklo comme analogue naturel d'un dépôt de déchet (projet CEE).*

Ces travaux montrent que: (i) la température de l'encaissant du réacteur reste normale au-delà d'une dizaine de mètres, bien que des températures supérieures à 500 °C soient atteintes au centre du réacteur; (ii) le réacteur n'induit pas de mouvement convectif de fluide à grande échelle; (iii) la montée en température de l'ensemble de l'édifice est rapide (inférieure 1an) créant des surpressions autour et à l'intérieur du réacteur; (iv) la surpression due à la dilatation thermique des fluides peut créer une fracturation hydraulique des roches encaissantes. Cet effet est, toutefois, limité autour du réacteur (quelques dizaines de mètres).

### **V.2.2.2. Expertise des matériaux**

#### *Sensibilité des écosystèmes forestiers à l'acidification*

L'évolution d'un écosystème induite par les facteurs extérieurs (pollution atmosphérique directe ou drainée par les précipitations), peut être tamponnée par la présence de cations neutralisants présents dans les différents niveaux de la chaîne. Les Vosges cristallines ont servi de prototype d'étude à l'analyse spatiale de la sensibilité des écosystèmes forestiers à l'acidification en vue d'une application à la cartographie des charges critiques. La cartographie des cations à capacité tampons et les données sur profils pédologiques montrant une survivance d'une signature géochimique des roches-mères dans les sols, permet la référence à la composition chimique des roches-mères en vue d'une évaluation préliminaire de la probabilité de sensibilité à l'acidification des écosystèmes forestiers par les agents polluants atmosphériques. (Projet INRA - ADEME, responsable E. Dambrine, INRA-Nancy).

#### *Expertise pétrologique du site de la Vienne*

La reconnaissance géologique du futur site intragranitique d'implantation du laboratoire souterrain d'étude de stockage des résidus radioactifs, a donné lieu à l'expertise pétrologique des matériaux reconnus par forage sous couverture sédimentaire (site de la Vienne). Cette expertise a des implications directes sur la détermination des caractéristiques lithologiques intrinsèques du site. Elle présente également d'importantes conséquences scientifiques, d'une part par la nature des matériaux identifiés, d'autre part par l'accès direct à des éléments de socle non affleurants et constituant des jalons nouveaux entre deux segments importants de l'orogène varisque français.

### **V.3. Chercheurs et étudiants impliqués dans le thème V**

Chercheurs permanents : M. Arnold (100%), B. Charoy (50%), A. Cheilletz (50%), G. Giuliani (50%), P. Jacquemin (50 %), C. Le Carlier de Veslud (30 %), G. Libourel (50 %), J.L. Mallet (50%), C. Marignac (50 %), M. Ohnenstetter (100 %), A. Ploquin (100 %), J.J. Royer (30 %), J.M. Stussi (50 %).

Thésards : N. Charoy, J. Conraud, P. Georges, B. Gérard, C. Mahé, C. Roumet, J. Sterpenich

### **V.4. Liste des 5 publications les plus significatives du thème 5.**

Charoy B.& Noronha F. (1996). Multistage growth of a rare-element, volatile-rich microgranite at Argemela (Portugal). *J. Petrol.*, **37**, 73-94.  
Cheilletz A. & Giuliani G. (1996). The genesis of colombian emeralds: a restatement. *Mineral. Deposita*, **31**, 359-364.

- Marignac C., Semiani A., Fourcade S., Boiron M.-C., Joron J.-L., Kienast J.-R. & Peucat J.-J. (1996). Metallogenesis of the late Panafrikan gold-bearing East-Ouzzal shear-zone (Hoggar, Algeria). *J. Metam. Geol.*, sous presse.
- Ploquin A., Mahé C., Leroy M., Dieudonne-Glad N., Jarrier C. (1996) Reconstruction of ironmaking procedure: a progress report about petrographical studies of slaggy wastes from archaeo-ironmaking sites. in *The importance of ironmaking, technical innovation and social change*. Gert Magnusson Ed. vol. II, 105-119.
- Sterpenich J, Le Forsetier L., Libourel G., Chaussidon M., Barbey P. (1994) Medieval stained glass: a model for leaching of vitrified wastes. *Min. Mag.* vol.58A, 877-878.

**C - Liste des publications 1995 - 1996**

## 1995

### A

Aillères L, Bertrand JM, Macaudière J, Champenois M (1995) Structure de la zone houillère briançonnaise (Alpes françaises), tectonique néoalpine et conséquences sur l'interprétation des Zones Penniques frontales. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 321, 247-254.

Aillères L, Champenois M, Macaudière J, Bertrand JM (1995) Use of image analysis in the measurement of finite strain by the normalized Fry method : geological implications for the "Zone houillère" (Briançonnais zone, french Alps). *Mineral. Mag.*, 59, 179-187.

Ait Malek H, Gasquet D, Marignac C, Bertrand JM (1995) Des xénolites à corindon dans une vaugnérite de l'Ardèche (Massif Central français) : implications pour le métamorphisme ardéchois. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 321, 959-966.

Albarède\* F, Semhi K (1995) Patterns of elemental transport in the bedload of the Meurthe River (NE France). *Chem. Geol.*, 122, 129-145.

Barbey P, Allé P, Brouand M, Albarède F (1995) Rare-earth patterns in zircons from the Manaslu granite and Tibetan slab migmatites (Himalaya) : insights in the origin and evolution of a crustally-derived granite magma. *Chem. Geol.*, 125, 1-17.

Bartoli F, Burtin G, Royer JJ, Gury M, Gomendy V, Philippy R, Leviander T, Gafrej R (1995) Spatial variability of topsoil characteristics within one silty soil type. Effects on clay migration. *Geoderma*, 68, 279-300.

Blanc P, Baumer A, Cesbron F, Ohnenstetter D (1995) Les activateurs de cathodoluminescence dans des chlorapatites préparées par synthèse hydrothermale. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 321, 1119-1126.

Bottero M, Gaucher A, Wang C, Chaussidon M, Yvon J (1995) Dental abnormalities in early diagnosis of hyperphosphatasemia. *Scanning Microsc.*, 9, 1179-1191.

Bouloton J, Gasquet D (1995) Melting and undercooled crystallisation of felsic xenoliths from minor intrusions (Jebilet massif, Morocco). *Lithos*, 35, 201-219.

Brueckner HK, Elhaddad ME, Hamelin B, Hemming S, Kröner A, Reisberg L, Seyler M (1995) A Pan African origin and uplift for the gneisses and peridotites of Zabargad Island, Red Sea : a Nd, Sr, Pb and Os isotope study. *J. Geophys. Res.*, 100, 22283-22297.

Calvert AJ, Sawyer EW, Davis WJ, Ludden\* JN (1995) Archaean subduction inferred from seismic images of a mantle suture in the Superior Province. *Nature*, 375, 670-674.

Chalot-Prat F (1995) Genesis of rhyolitic ignimbrites and lavas from distinct sources at a deep crustal level : field, petrographic, chemical and isotopic (Sr, Nd) constraints in the Tazekka volcanic complex (Eastern Morocco). *Lithos*, 36, 29-49.

Charland A, Francis D, Ludden J (1995) The relationship between the hawaiiites and basalts of the Itcha Volcanic complex, central British Columbia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 121, 289-302.

Charoy B, Chaussidon M, Noronha F (1995) Lithium zonation in white micas from the Argemela microgranite (central Portugal) : an *in-situ* ion-, electron-microprobe and spectroscopic investigation. *Eur. J. Mineral.*, 7, 335-352.

Chaussidon M (1995) Isotope geochemistry of boron in mantle rocks, tektites and meteorites. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 321, 455-472.

Chaussidon M, Koeberl C (1995) Boron content and isotopic composition of tektites and impact glasses: constraints on source regions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 613-624.

Chaussidon M, Marty B (1995) Primitive boron isotope composition of the mantle. *Science*, 269, 383-386.

Chaussidon M, Robert F (1995) Nucleosynthesis of  $^{11}\text{B}$ -rich boron in the pre-solar cloud recorded in meteoritic chondrules. *Nature*, 374, 337-339.

Deloule E, Paillat O, Pichavant M, Scaillet B (1995) Ion microprobe determination of water in silicate glasses : methods and applications. *Chem. Geol.*, 125, 19-28.

Deloule E, Robert F (1995) Interstellar water in meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 4695-4706.

Dunphy JM, Ludden\* JN, Parrish RR (1995) Stitching together the Ungava Orogen, northern Quebec : geochronological (TIMS AND ICP-MS) and geochemical constraints on late magmatic events. *Can. J. Earth Sci.*, 32, 2115-2127.

Dunphy JM, Ludden\* JN (1995) Geochemistry of mafic magmas from the Ungava orogen, Quebec, Canada and implications for mantle reservoir compositions at 2.0 Ga. *Chem. Geol.*, 120, 361-380.

Dupuy C, Michard\* A, Dostal J, Dautel\* D, Baragar WRA (1995) Isotope and trace-element geochemistry of Proterozoic Natkusiak flood basalts from the northwestern Canadian shield. *Chem. Geol.*, 120, 15-25.

Fortes PTFO, Giuliani G (1995) Les phases fluides associées aux corps sulfurés du gisement d'or Mina III, ceinture de roches vertes de Crixás, Etat de Goiás, Brésil. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 320, 1171-1178.

Francis D, Ludden\* J (1995) The signature of amphibole in mafic alkaline lavas, a study in the northern Canadian Cordillera. *J. Petrol.*, 36, 1171-1191.

Gasquet D, Fernandez A, Mahé C, Boullier AM (1995) Origine des rubanements dans les granitoïdes : exemple du monzogranite de Brignognan-Plouescat (NW du massif armoricain). *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 321, 369-376.

Giuliani G, Cheilletz A, Arboleda C, Carrillo V, Rueda F, Baker JH (1995) An evaporitic origin of the parent brines of Colombian emeralds : fluid inclusion and sulphur isotope evidence. *Eur. J. Mineral.*, 7, 151-165.

Govindaraju K (1995) 1995 Working values with confidence limits for twenty-six CRPG, ANRT and IWG-GIT geostandards. *Geostandard Newslett*, XIX, 1-32.

Govindaraju K (1995) Update (1984-1995) on two GIT-IWG geochemical reference samples: albite from Italy, AL-I and iron formation sample from Greenland, IF-G. *Geostandard. Newslett.*, XIX, 55-96.

Gurenko A, Chaussidon M (1995) Enriched and depleted primitive melts included in olivine from Icelandic tholeiites : origin by continuous melting of a single mantle column. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 2905-2917.

Hammouda T, Pichavant M, Barbey P, Brearley AJ (1995) Synthesis of fluorophlogopite single crystals. Applications to experimental studies. *Eur. J. Mineral.*, 7, 1381-1387.

Henry\* P (1995) Etude chimique et isotopique (Nd) de formations ferrifères (banded iron formations ou BIFs) du Craton ouest-africain. *Bull. Soc. géol. France*, 166, 3-13.

Hoxha M, Boullier AM (1995) The peridotites of the Kukës ophiolite (Albania) : structure and kinematics. *Tectonophysics*, 249, 217-231.

Kimura G, Ludden\* J (1995) Peeling oceanic crust in subduction zones. *Geology*, 23, 217-220.

Laumonier B, Marignac C, Gasquet D (1995) Cinématique d'un front de chevauchement : l'avant-pays de la nappe des Corbières aux environs de Lagrasse (Aude, France). *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 321, 1195-1201.

Ludden\* JN, Feng R, Gauthier G, Stix J, Shi L, Francis D, Machado N, Wu GP (1995) Applications of LAM-ICP-MS analysis to minerals. *Can. Mineralog.*, 33, 419-434.

Mareschal M, Kellett RL, Kurtz RD, Ludden\* J, Ji S, Bailey RC (1995) Archaean cratonic roots, mantle shear zones and deep electrical anisotropy. *Nature*, 375, 134-137.

Marty B (1995) Comment on "Helium isotope fluxes and groundwater ages in the Dogger aquifer, Paris Basin" by B.Marty, T. Torgersen, V. Meynier, RK O'Nions, G. de Marsily. Reply. *Water Resour. Res.*, 31, 2119-2121.

Marty B (1995) Nitrogen content of the mantle inferred from N<sub>2</sub>-Ar correlation in oceanic basalts. *Nature*, 377, 326-329.

Marty B, Lenoble M, Vassard N (1995) Nitrogen, helium and argon in basalt : a static mass spectrometry study. *Chem. Geol.*, 120, 183-195.

Matsuda JI, Marty B (1995) The  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  ratio of the undepleted mantle; a reevaluation. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1937-1940.

Merino E, Yifeng, Wang, Deloule E (1995) Genesis of agates in flood basalts : twisting of chalcedony fibers and trace-element geochemistry. *Amer. J. Sci.*, 295, 1156-1176.

Moktari A, Gasquet D, Rocci G (1995) Les tholéiites de Tagmout (Jbel Saghro, Anti-Atlas, Maroc) témoins d'un rift au Protérozoïque supérieur. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 320, 381-386.

Pinti DL, Marty B (1995) Noble gases in crude oils from the Paris Basin, France : Implications for the origin of fluids and constraints on oil-water-gas interactions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 3389-3404.

Pons J, Barbey P, Dupuis D, Léger JM (1995) Mechanism of pluton emplacement and structural evolution of a 2.1 Ga juvenile continental crust : the Birimian of southwestern Niger. *Precambrian Res.*, 70, 281-301.

Reisberg L, Lorand JP (1995) Longevity of sub-continental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs. *Nature*, 376, 159-162.

Robert F, Boullier AM, Firdaous K (1995) Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting. *J. Geophys. Res.*, 100, 12861-12879.

Sano Y, Marty B (1995) Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chem. Geol.*, 119, 265-274.

Scaillet B, Pêcher A, Rochette P, Champenois M (1995) The Gangotri granite (Garhwal Himalaya) : Laccolithic emplacement in an extending collisional belt. *J. Geophys. Res.*, 100, 585-607.

Snow JE, Reisberg L (1995) Os isotopic systematics of the MORB mantle : results from altered abyssal peridotites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 133, 411-421.

Stix J, Gauthier G, Ludden\* JN (1995) A critical look at quantitative laser-ablation ICP-MS analysis of natural and synthetic glasses. *Can. Mineralog.*, 33, 434-444.

Trull TW, Brown ET, Marty B, Raisbeck GM, Yiou F (1995) Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^3\text{He}$  accumulation in Pleistocene beach terraces in Death Valley, California, U.S.A. : Implications for cosmic-ray exposure dating of young surfaces in hot climates. *Chem. Geol.*, 119, 191-207.

Verpaelst P, Péloquin AS, Adam E, Barnes A, Ludden\* JN, Dion DJ, Hubert C, Milkereit B, Labaie M (1995) Seismic reflection profiles across the "Mine Series" in the Noranda Camp of the Abitibi belt, Eastern Canada. *Can. J. Earth Sci.*, 32, 167-176.

Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick JC, Spiegel W (1995) Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandard. Newslett.*, 19, 1-23.

## 1995 B

Aïssa DE, Cheilletz A, Gasquet D, Maignac C (1995) Alpine metamorphic core complexes and metallogenesis : the Edough case (NE Algeria). In : *"Mineral Deposits : From their origin to their environmental impacts"*. Third Biennial SGA Meeting, Praha, August 28-31, 1995, Pasava J, Kribek B, Zak K (Eds.), Balkema : Rotterdam, 23-26.

Almeida A, Leterrier J, Noronha F (1995) Estudo dos minerais acessórios dos granitos de duas micas do complexo de Cabeceiras de Basto. In : *IV Congresso Nacional de Geologia*, Porto, 12-17 décembre 1995, Sodré-Borges F, Marques MM (Eds.), Universidade do Porto, 609-612.

- Almeida A, Noronha F, Leterrier J (1995) Estudo geoquímico do complexo granítico de Cabeceiras de Basto : implicações petrogenéticas e metalogénicas. In : *IV Congresso Nacional de Geologia*, Porto, 12-17 décembre 1995, Sodré-Borges F, Marques MM (Eds.), Universidade do Porto , 687-691.
- Banks DA, Yardley BWD, Giuliani G, Cheillett A, Rueda F (1995) Chemistry and source of the high temperature brines in the Colombian emerald deposits. In : *"Mineral Deposits : From their origin to their environmental impacts". Third Biennial SGA Meeting*, Praha, August 28-31, 1995, Pasava J, Kribek B, Zak K (Eds.), Balkema : Rotterdam, 557-560.
- Bardinet C, Dubois JE, Caliste JP, Royer JJ, Oppeneau JC (1995) Data processing for the environment analysis : a multiscale approach. In : *9th International Symposium on Computer Science for Environmental Protection*, Berlin, 1995, Kremers H, Pillmann W (Eds.), Metropolis-Verlag : Marburg, 38-46.
- Barnes AE, Bellefleur G, Ludden JN, Milkereit B (1995) Appraisal of the parameters of the LITHOPROBE Abitibi-Grenville seismic reflection survey. *Geosci. Can.*, 21, 49-57.
- Cabboi S, Dunikowski C, Barbanson L, Delépine J, Merluzzo P, Ploquin A, Solari ME (1995) Du minerai au métal. In : *La sidérurgie chez les Sénon : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérinois (Yonne)*, Dunikowski C, Cabboi S (Eds.), Editions de la Maison des Sciences de l'Homme : Paris, 143-147, 151-152, 158-168.
- Cabboi S, Dunikowski C, Mangin M, Ploquin A (1995) Production et évolution des ateliers. In : *La sidérurgie chez les Sénon : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérinois (Yonne)*, Dunikowski C, Cabboi S (Eds.), Editions de la Maison des Sciences de l'Homme : Paris, 120-131.
- Caruba R, Baumer A, Ohnenstetter D, Cesbron F, Rouer O, Blanc P (1995) The hydrothermal synthesis of molybdenum, sulfur-doped zircon : a study of charge compensation mechanisms. *Neue. Jahrb. Miner. Monatsh.*, 6, 241-254.
- Charoy B (1995) Spectroscopic refinements on an alkali-poor beryl from Brazil. In : *"Mineral Deposits : From their origin to their environmental impacts". Third Biennial SGA Meeting*, Praha, August 28-31, 1995, Pasava J, Kribek B, Zak K (Eds.), Balkema : Rotterdam, 565-567.
- Cheillett A, Giuliani G, Zimmermann JL, Ribeiro-Althoff AM, Féraud G, Rueda F (1995) Ages, geochemical signatures and origin of Brazilian and Colombian emerald deposits : a magmatic versus sedimentary model. In : *"Mineral Deposits : From their origin to their environmental impacts". Third Biennial SGA Meeting*, Praha, August 28-31, 1995, Pasava J, Kribek B, Zak K (Eds.), Balkema : Rotterdam, 569-572.
- Dias G, Leterrier J (1995) Estudo isotópico Sr-Nd de encaves microgranulares máficos associados a granitóides tardi-hercínicos da região de Braga-Vieira do Minho (Norte de Portugal) : origem e composição dos magmas parentais. In : *IV Congresso Nacional de Geologia*, Porto, 12-17 décembre 1995, Sodré-Borges F, Marques MM (Eds.), Universidade do Porto , 711-715.
- Dubois M, Flores EL, Royer JJ (1995) Numerical evaluation of pressure and temperature effects on thermal conductivity : implications for crustal geotherms. *Geofis. Int.*, 34, 377-384.
- Giuliani G, Cheillett A, Rueda F, France-Lanord C (1995) The genesis of Colombian emerald deposits : an unique example of beryllium mineralization developed in a black shale environment. In : *"Mineral Deposits : From their origin to their environmental impacts". Third Biennial SGA Meeting*, Praha, August 28-31, 1995, Pasava J, Kribek B, Zak K (Eds.), Balkema : Rotterdam, 943-946.
- Giuliani G, Cheillett A, Vidal P (1995) La datation isotopique des gemmes. *Analisis*, 23, M34:M37.
- Homand-Etienne F, Belem T, Sabbadini S, Shtuka A, Royer JJ (1995) Analysis of the evolution of rock joints morphology with 2-D autocorrelation (variograms). In : *Applications of statistics and probability. Civil engineering reliability and risk analysis*, Lemaire M, Favre JL, Mebarki A (Eds.), Balkema : Rotterdam, 1229-1236.
- Jarrier C, Domergue C, Pieraggi B, Ploquin A, Tollon F (1995) Caractérisation minéralogique, géochimique et métallurgique des résidus de réduction directe, d'épuration et de forge du centre sidérurgique romain des martyrs (Aude, France). *Rev. Archéom.*, 19, 49-61.
- Le Carlier de Veslud C, Gérard B, Royer JJ (1995) GOcad as an input generator for P.D.E. modelling. In : *11th GOcad Meeting*, Nancy-Vandoeuvre, June 1995, , 1-17.

Le Forestier L, Libourel G, Brown WL (1995) A new method to characterize the complex mineralogy of ultimate wastes. In : *Proceedings of the International Symposium on Environmental Technologies : Plasma Systems and Applications*, Atlanta, USA, October 8-11, 1995, Georgia Institute of Technology , 149-156.

Le Fort P, France-Lanord C (1995) Granites from Mustang and surrounding regions (Central Nepal). *J. Nepal geol. Soc.*, 11, 53-57.

Leal-Gomes C, Leterrier J (1995) Tipologia composicional e evolução geoquímica em sistemas pegmatóides graníticos - tendências primárias do sistema de Arga - Minho - N de Portugal. In : *IV Congresso Nacional de Geologia*, Porto, 12-17 décembre 1995, Sodré-Borges F, Marques MM (Eds.), Universidade do Porto , 735-740.

Moreau C, Ohnenstetter D, Diot H, Demaiffe D, Brown WL (1995) Emplacement of the Meugueur-Meugueur cone-sheet (Niger, West Africa), one of the world's largest igneous ring-structures. In : *Third International Dyke Conference*, Jerusalem, 4-8 september 1995, Baer G, Heimann A (Eds.), Balkema : Rotterdam, 41-49.

Noronha F, Leterrier J (1995) Complexo metam rfico da Foz do Douro. Geoqu mica e geocronologia. Resultados preliminares. In : *IV Congresso Nacional de Geologia*, Porto, 12-17 décembre 1995, Sodr -Borges F, Marques MM (Eds.), Universidade do Porto , 769-774.

Rezig M, Marty B (1995) Geothermal study of the Northeastern part of Algeria. In : *Proceedings of the World Geothermal Congress*, Florence, 18-31 May, 1995, .

Royer JJ, Gérard B, Le Carlier de Veslud C (1995) Modeling heat and fluid transfers during natural nuclear reaction in the Oklo uranium deposit (Gabon). In : *4th Joint Oklo Group CEC-CEA and final Meeting of the "Oklo as a natural analogue"*, Programme 1991-1995, Saclay, June 22-23, 1995, Blanc PL, Von Maravic H (Eds.), Institut de Protection et de Suret  Nucléaire , 73-99.

Royer JJ, Gérard B, Le Carlier de Veslud C (1995) Modeling PDE using GOCAD. In : *11th GOCAD Meeting*, Nancy-Vandoeuvre, June 1995, , 1-19.

Sa JM, McCreath I, Leterrier J (1995) Petrology, geochemistry and geodynamic setting of Proterozoic igneous suites of the Or s fold belt (Borborema Province, northeast Brazil). *J. S. Amer. Earth Sci.*, 8, 299-314.

Saup  F, Genkin A, Amstutz GC (1995) Preliminary account on the sulfur isotope geochemistry of sulfides from the Olimpiada and Veduga gold deposits, Siberia, Russia. In : *"Mineral Deposits : From their origin to their environmental impacts"*. *Third Biennial SGA Meeting*, Praha, August 28-31, 1995, Pasava J, Kribek B, Zak K (Eds.), Balkema : Rotterdam, 183-186.

Saup  F, Kolli O, Jacquier B, Cheillett A, Marignac C (1995) Sulfur isotope geochemistry of the barite and sulfide occurrences of Greater Kabylia, N. Algeria. In : *"Mineral Deposits : From their origin to their environmental impacts"*. *Third Biennial SGA Meeting*, Praha, August 28-31, 1995, Pasava J, Kribek B, Zak K (Eds.), Balkema : Rotterdam, 319-321.

Shtuka A, Royer JJ (1995) IMGEO : Interactive image processing software for geological and geophysical data. In : *3rd CODATA Conference on Geomathematics and geostatistics*, Fabbri AG, Royer JJ (Eds.), Sci de la Terre, S r. Inf. : Nancy, 32, 539-552.

Sterpenich J, Le Forestier L, Libourel G (1995) Ageing of vitrified wastes : an experimental and analogical approach. In : *International Symposium on Environmental Technologies : Plasma Systems and Applications*, Atlanta, USA, October 8-11, 1995, Georgia Institute of Technology , 173-181.

Sterpenich J, Le Forestier L, Libourel G (1995) Les vitraux médiévauX : un modèle pour le vieillissement des déchets vitrifiés. In : *Actes du Premier Symposium International "Inertage et Valorisation des déchets ultimes"*, Bordeaux, 12-14 septembre 1995, Université Bordeaux I , 2-9.

Vuaillet D, Santallier D, Ploquin A, Floc'h JP (1995) Les haches néolithiques limousines. Etude géochimique des matériaux méta-doléritiques. Conséquences archéologiques et géologiques. *Rev. Arch om.*, 19, 63-78.

\* Les publications marquées d'un astérique ont été réalisées en partie dans le laboratoire d'origine du Chercheur et en partie au CRPG



## 1996 (Janvier - Octobre)

### A

Auffret GA, Richter T, Reyss J-L, Organo C, Deloule E & al. (1996) Enregistrement de l'activité hydrothermale dans les sédiments de la dorsale médio-atlantique au sud des Açores. *C. R. Acad. Sci. (Paris), série II*, 323, 583-590.

Barbey P, Brouand M, Le Fort P, Pécher A (1996) Granite-migmatite genetic link : the exemple of the Manalu granite and Tibetan Slab migmatites in central Nepal. *Lithos*, 38, 63-79.

Bertrand JM, Aillères L, Gasquet D, Macaudière J (1996) The Pennine front zone in Savoie (western Alps), a review and new interpretations from the Zone Houillère Briançonnaise. *Eclogae geol. Helv.*, 89, 297-320.

Blichert-Toft J, Arndt NT, Ludden JN (1996) Precambrian alkaline magmatism. *Lithos*, 37, 97-111.

Charoy B, Donato (de) P, Barres O, Pinto-Coelho C (1996) Channel occupancy in an alkali-poor beryl from Serra Branca (Goias, Brazil) : spectroscopic characterization. *Amer. Mineral.*, 81, 395-403.

Charoy B, Noronha F (1996) Multistage growth of a rare-element, volatile-rich microgranite at Argemela (Portugal). *J. Petrol.*, 37, 73-94.

Chaussidon M, Robert F (1996) Boron and lithium isotope variations in chondrules : the signature of presolar nucleosynthesis. In : *27th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, March 18-22, 1996, Abstracts, 207-208.

Cheilletz A, Giuliani G (1996) The genesis of Colombian emeralds : a restatement. *Miner. Depos.*, 31, 359-364.

Danis M, Gobbé C, Royer JJ (1996) Procédures d'utilisation d'un conductivimètre à barre divisée pour des échantillons grenus : application au cas des granites. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39, 2183-2187.

Debon F, Zimmermann JL, Le Fort P (1996) Upper Hunza granites (north Karakorum, Pakistan) : a syn-collision bimodal plutonism of mid-Cretaceous age. *C. R. Acad. Sci. (Paris), série II*, 323, 381-388.

Deloule E, Robert F (1996) Origin of water in the solar system : ion-probe determinations of d/H ratios in chondrules. In : *27th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, March 18-22, 1996, Abstracts, 307-308.

Demars C, Pagel M, Deloule E, Blanc P (1996) Cathodoluminescence of quartz from sandstones : interpretation of the UV range by determination of trace element distributions and fluid-inclusion *P-T-X* properties in authigenic quartz. *Amer. Mineral.*, 81, 891-901.

Derry LA, France-Lanord C (1996) Neogene Himalayan weathering history and river  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  : impact on the marine Sr record. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 142, 59-74.

Engrand C, Deloule E, Hoppe P, Kurat G, Maurette M, Robert F (1996) Water contents of micrometeorites from Antarctica. In : *27th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, March 18-22, 1996, Abstracts, 337-338.

Fougnot J, Pichavant M, Barbey P (1996) Biotite resorption in dacite lavas from northeastern Algeria. *Eur. J. Mineral.*, 8, 625-638.

Galy A, France-Lanord C, Derry L. A. (1996) Tectonometamorphic evolution of the central Karakorum (Balistan, northern Pakistan). *Tectonophysics*, 260, 109-118

Gasquet D, Stussi JM, Nacht H (1996) Les granitoïdes du Maroc dans le cadre de l'évolution géodynamique régionale. *Bull. Soc. géol. France*, 167, 517-528.

Govindaraju K (1996) Tutorial notes on GeoStan series of Databases, version 2. *Geostandard. Newslett.*, 20, 3-28.

Hanon P, Chaussidon M (1996) High C and H contents of chondrules. In : *27th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, March 18-22, 1996, Abstracts, 485-486.

Laumonier B, Marignac C (1996) Les effets respectifs de la compression puis de l'extension tardi-orogéniques hercyniennes dans l'évolution structurale du synclinal de Rosis et de l'anticlinal du caroux (Est de la zone axiale de la Montagne Noire, France). *C. R. Acad. Sci. (Paris), série II*, 323, 427-434.

Laumonier B, Branquet Y, Lopès B, Cheilletz A, Giuliani G & al. (1996) Mise en évidence d'une tectonique compressive Eocène-Oligocène dans l'ouest de la Cordillère orientale de Colombie, d'après la structure en duplex des gisements d'émeraude de Muzo et de Coscuez. *C. R. Acad. Sci. (Paris), série II*, 323, 705-712.

Marty B, Zimmermann L, Humbert F (1996) Nitrogen isotopic composition of the silicate earth and its bearing on earth-atmosphere evolution. In : *27th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, March 18-22, 1996, Abstracts, 819-820.

Michel D, Giuliani G (1996) Habit and composition of gold grains in quartz veins from Greenstone belts : implications for mechanisms of precipitation of gold. *Can. Mineralog.*, 34, 513-528.

Moreau C, Ohnenstetter D, Demaiffe D, Robineau B (1996) The Los Archipelago nepheline syenite ring-structure : a magmatic marker of the evolution of the central and equatorial Atlantic. *Can. Mineralog.*, 34, 281-299.

Nachit H, Barbey P, Pons J, Burg JP (1996) L'Eburnéen existe-t-il dans l'anti-atlas occidental marocain ? L'exemple du massif du Kerdous. *C. R. Acad. Sci. (Paris), série II*, 322, 677-683.

Ohnenstetter D, Brown WL (1996) Compositional variation and primary water contents of differentiated interstitial and included glasses in boninites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123, 117-137.

Péloquin AS, Verpaest P, Ludden JN (1996) Spherulitic rhyolites of the Archaean Blake River Group, Canada: implications for stratigraphic correlation and volcanogenic massive sulfide exploration. *Econ. Geol.*, 91, 343-354.

Richard D, Marty B, Chaussidon B, Arndt N (1996) Helium isotopic evidence for a lower mantle component in depleted Archean komatiite. *Science*, 273, 93-95.

Sobolev AV, Chaussidon M (1996) H<sub>2</sub>O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges : implications for H<sub>2</sub>O storage and recycling in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 137, 45-55.

Stussi J M and Cuney M (1996) Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas by Abdel-Fattah M. Abdel-Rahman : a comment. *J. Petrol.*, 37, 1025-1029.

Zimmermann JL, Moretto R (1996) Release of water from halite crystals. *Eur. J. Mineral.*, 8, 413-422.

## 1996 B

Branquet Y, Laumonier B, Lopes B, Cheilletz A, Giuliani G, Rueda F (1996) Evidences of compressive structures in the Muzo and Coscuez emerald deposits, eastern Cordillera of Colombia. In : *Third International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 96)*, St Malo, 17-19 September, 1996, 675-677.

Casarotto J-T, Leroy M, Merluzzo P, Ploquin A (1996) L'utilisation du minerai oolithique et le développement de la sidérurgie ancienne avant le haut fourneau. In : *Lorraine du Feu, Lorraine du fer. Révolutions industrielles et transformations de l'espace mosellan (XIIIe - XIXe siècles)*, Archives Départementales de la Moselle : Metz, 59-71.

Dall'Agnol R, de Souza ZS, Althoff FJ, Buenano Macambira MJ, da Silva Leite AA (1996) Geology and geochemistry of the Archaean Rio Maria granite-greenstone Terrain, Carajás Province, Amazonian Craton. In : *Symposium "Archaean Terranes of the South American Platform"*, Brasilia, April 15-17, 1996, Abstracts, 29-30.

Derry LA, France-Lanord C (1996) Neogene growth of the sedimentary organic carbon reservoir. *Paleoceanography*, 11, 267-275.

Giuliani G, Cheilletz A, France-Lanord C, Rueda F (1996) The role of organic matter in high temperature hydrothermal regimes. In : *Third International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 96)*, St Malo, 17-19 September, 1996, 683-686.

Gomendy V, Bartoli F, Pechard-Presson B, Vivier H, Petit V, Bird N, Niquet S, Perrier E, Royer JJ, Leviandier T (1996) Fractals, théorie de la percolation et structures des sols : une approche physique unifiée pour la modélisation des courbes de rétention d'eau et des transferts. In : *Journées du programme Environnement, Vie et Sociétés*, Paris, 15-17 janvier 1996, 175-180.

Le Carlier-Mahé C, Ploquin A, Le Carlier C, Royer JJ, Arnold M (1996) Use of archaeometallurgical slags as natural analogues for municipal/nuclear/Industrial slagged wastes : from database to applications. In : "*Scientific data in the age of networking*", *15th International CODATA Conference*, Tsukuba, Japan, 29/9-3/10 1996, Abstracts, 4p.

Ploquin A, Mahé C, Leroy M, & al. (1996) Reconstruction of ironmaking procedure : a progress report about petrographic studies of slaggy wastes from archaeo-ironmaking sites. In : *The importance of Ironmaking. Technical innovation and social change. Proceedings of the Norberg Conference, May 8-13, 1995*, G. Magnusson (Ed.), Jernkontorets Bergshistorika Utskott , II, 105-119.

Ritz M, Brown WL, Moreau C, Ohnenstetter D (1996) An audiomagnetotelluric study of the Meugueur-Meugueur ring structure, Aïr, Niger: ring dyke or cone sheet ? *J. Appl. Geophys.*, 34, 229-236.

Robert F, Boullier AM, Firdaous K (1996) Geometric aspects of a large extensional vein, Donalda deposit, Rouyn-Noranda, Quebec. *Geological Survey of Canada, Current Research C*, 147-155.

Royer JJ, Gérard B, Le Carlier de Veslud C, Shtuka A (1996) 3D modeling of complex natural objects. In : *Modeling complex data for creating information*, Dubois JE, Gershon N (Eds.), Springer : Berlin, 155-169.

Royer JJ, Gérard B, Le Carlier de Veslud C (1996) Virtual tools for investigating real complex 3D objects in Geoscience. In : "*Scientific data in the age of networking*", *15th International CODATA Conference*, Tsukuba, Japan, 29/9-3/10 1996 , Abstracts, 2p.

Souza de ZS, Dall'Agnol R, Althoff FJ, da Silva Leite AA, de Mesquita Barros CE (1996) Carajás mineral Province : geological, geochronological and tectonic contrasts on the Archaean evolution of the Rio Maria granite-greenstone Terrain and the Carajás block. In : *Symposium "Archaean Terranes of the South American Platform"*, Brasilia, April 15-17, 1996, Abstracts, 31-32.

**D - Les services analytiques**

**Le Service d'Analyses des Roches et des Minéraux (SARM)**

# I - Service d'Analyse des Roches et Minéraux (SARM)

## I.1. Introduction

Ce rapport présente l'activité du SARM des deux dernières années en ce qui concerne la quantité et la nature des échantillons analysés dans les deux laboratoires du service, soit chimie et spectrochimie. Figurent aussi dans ce rapport les changements d'ordre structural, au niveau de l'embauche de personnel, de l'acquisition d'appareillage et de l'orientation analytique.

Depuis le départ en retraite de K. Govindaraju il y deux ans jusqu'en début d'année 1996, le service était dans l'attente d'un nouveau directeur. L'intérim fut assuré par G. Mevelle (IE1), responsable du laboratoire de spectrochimie. Monsieur Mevelle a su maintenir la réputation nationale et internationale du SARM, tant au point de vue service qu'au point de vue développement analytique.

## I.2. Intégration du nouveau chef de service

Mr. Jean Carignan (Ph.D. - IR1) fut recruté par le CNRS en fin d'année 1995 afin de succéder à K. Govindaraju comme chef de service du SARM au CRPG. J. Carignan a occupé ses fonctions le 1<sup>er</sup> février 1996. Dans un premier temps, le comité de sélection du CNRS a confié à J. Carignan la responsabilité du laboratoire de spectrochimie. Pendant quelques années, J. Ludden, directeur du CRPG, conservera la direction officielle du laboratoire de chimie. Par contre, le fonctionnement journalier de tout le SARM relève de J. Carignan.

## I.3. Réunion du comité CNRS du SARM (février 1996)

Cette réunion avait pour but de présenter le nouveau président du comité (Mireille Polvé) et le nouvel ingénieur recruté pour la direction du SARM (Jean Carignan). Des discussions sur l'avenir du SARM en ce qui concerne les départs à la retraite et l'embauche de personnel, la gestion budgétaire du SARM par rapport à l'INSU et le rôle du SARM au sein du CNRS en tant que service national d'analyse ont eu lieu. Des propositions concernant toutes ces questions seront faites lors d'une prochaine réunion du comité à l'automne 1996. De par la nature des activités du laboratoire des rayons-X, le comité décida, à l'unanimité, que ce laboratoire ne ferait désormais plus partie du SARM.

## I.4. Les échantillons analysés au SARM

Le nombre d'échantillons analysés au SARM depuis 1994 est de l'ordre de 400 à 450 par mois. Le nombre d'analyses faites sur un échantillon n'est pas pris en compte. Sur le tableau 1 figure le détail du nombre d'échantillons enregistrés par mois depuis janvier 1994 jusqu'à juin 1996 avec le total annuel pour 1994 et 1995. L'origine des demandeurs est exprimée sous forme de pourcentages pour les années 1994 et 1995 à la figure 1. Peu de changements sont observés entre les deux années. On y voit qu' environ 85% des demandes d'analyses sont faites par des organismes français, dont 10% venant du secteur privé, ±10% du secteur public (ORSTOM, IFREMER, ...) et ±65% du secteur universitaire et CNRS. Près du quart des échantillons analysés au SARM proviennent du CRPG et autant proviennent des autres laboratoires de l'Institut Lorrain de Géosciences (ILG).

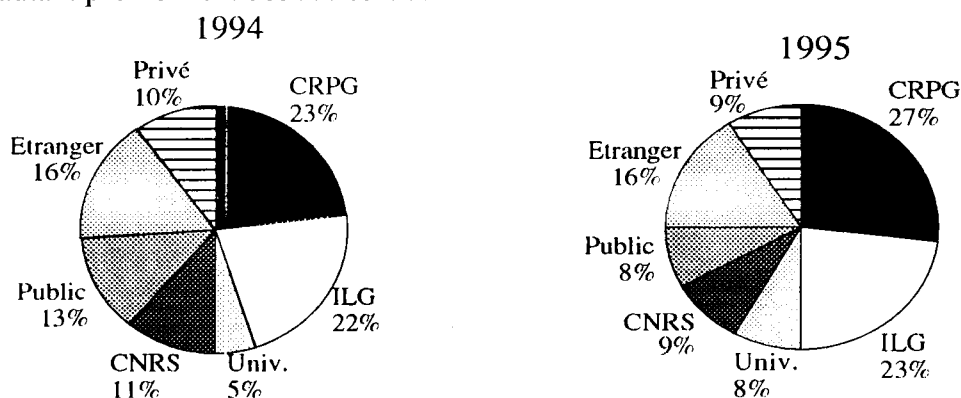


Fig. 1. Diagrammes illustrant la source des demandeurs pour les analyses effectuées au SARM pour les années 1994 et 1995.

**Tableau 1. Nombre d'échantillons total et à caractère environnemental enregistrés par mois depuis janvier 1994**

Mois	1994					1995					1996				
	Ech.	Cumul	envir.	Cumul	% envir.	Ech.	Cumul	envir.	Cumul	% envir.	Ech.	Cumul	envir.	Cumul	% envir.
01	569	569	18	18	3.2	273	273	55	55	20.1	336	336	121	121	36.0
02	399	968	3	21	2.2	327	600	36	91	15.2	541	877	101	222	25.3
03	530	1498	4	25	1.7	549	1149	59	150	13.1	600	1477	168	390	26.4
04	224	1722	36	61	3.5	558	1707	210	360	21.1	636	2113	143	533	25.2
05	324	2046	5	66	3.2	285	1992	110	470	23.6	607	2720	157	690	25.4
06	515	2561	26	92	3.6	449	2441	105	575	23.6	450	3170	142	832	26.2
07	420	2981	17	109	3.7	393	2834	98	673	23.7					
08	287	3268	17	126	3.9	31	2865	53	726	25.3					
09	307	3575	13	139	3.9	472	3337	16	742	22.2					
10	289	3864	21	160	4.1	440	3777	83	825	21.8					
11	605	4469	106	266	6.0	413	4190	52	877	20.9					
12	494	4963	18	284	5.7	395	4585	122	999	21.8					
Total	4963		284		5.7	4585		999		21.8	3170		832		26.2

Si la proportion de l'origine des demandeurs reste approximativement constante depuis plus de 2 ans, la nature des échantillons à analyser a évolué quelque peu. En effet, la demande pour l'analyse d'échantillons à caractère "environnemental" est de plus en plus forte. Ces échantillons, qui peuvent être des sols contaminés, des ciments, des verres, des cendres et résidus d'incinération, des lixiviats, etc... possèdent des teneurs en certains éléments souvent extrêmes comparativement à la moyenne des roches et nécessitent, parfois, des traitements particuliers. La figure 2 visualise le pourcentage que représente ces échantillons, par rapport au nombre total par mois depuis trente mois. On note une augmentation très importante du pourcentage d'échantillons "environnementaux" en 1995, passant de 5.7% en 1994 à une moyenne de près de 22% en 1995. Bien que les données disponibles pour 1996 ne représentent que les six premiers mois, on constate que la tendance se maintient avec une moyenne de plus de 26% de janvier à juin.

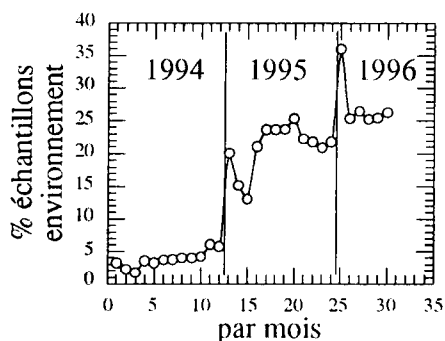


Fig. 2. Diagramme illustrant l'augmentation du pourcentage d'échantillons à caractère environnemental analysés au SARM au cours des 30 derniers mois.

## I.5. Les géostandards

Les principales activités du SARM sont la préparation, la caractérisation et la promotion de matériaux de référence pour l'analyse géochimique. Le journal "Geostandards Newsletter", fondé et actuellement publié par K. Govindaraju, est le seul véhicule d'information en ce qui concerne les matériaux de référence pour l'analyse géochimique. En 1997, le format du journal ainsi que les éditeurs en chef et régionaux vont être modifiés et/ou changés. Tous les détails de ces changements apparaissent dans la note préparée par Phil Potts (dans ce rapport), un des prochains éditeurs en chef.

Le SARM continue son activité en matière de préparation et caractérisation chimique de géostandards. En effet, outre sa participation à l'analyse de futurs géostandards préparés par d'autres organismes, le SARM est actuellement en négociation avec une société française pour la préparation et la caractérisation de 2 matériaux de référence. Ces matériaux ne sont pas des roches mais plutôt des résidus d'incinération d'ordures ménagères. Ces matériaux vont nécessiter un traitement particulier par rapport aux roches et, s'il y a lieu, cette étude augmentera le savoir-faire du SARM en matière de préparation de matériel de référence.

Avec la venue de l'ICP-MS dans de nombreux laboratoires de géochimie, la reproductibilité des mesures sur des échantillons à faible teneur en éléments traces a augmenté de façon sensible. Des études préliminaires au SARM ont démontré que les résultats obtenus sur certains géostandards par ICP-MS sont beaucoup plus reproductibles, tout en se situant dans les intervalles de valeurs déterminées par les études antérieures. Par contre, la moyenne des résultats obtenus n'est pas nécessairement identique aux valeurs actuellement recommandées pour les géostandards en question. Ceci est peut-être dû au fait que les valeurs recommandées prennent en compte les résultats obtenus par différentes techniques analytiques, introduisant ainsi une erreur causée par un biais possible entre les méthodes. Quoi qu'il en soit, le SARM aimerait monter un réseau international de laboratoires utilisant l'ICP-MS afin de recalibrer certains géostandards.



## **I.6. Recherche et développement analytique**

### **I.6.1 Une salle propre**

Outre l'analyse chimique de routine des roches et minéraux, le SARM (en particulier le laboratoire de spectrochimie) développe deux axes. L'analyse de matériaux environnementaux et l'analyse des roches et minéraux à très faible teneur en éléments traces. De par leur nature, certains échantillons environnementaux peuvent être très enrichis en métaux ou autres éléments. Le traitement de tels échantillons au laboratoire a pour effet de faire augmenter les blancs de préparation, ce qui est incompatible avec l'analyse d'ultra-traces. Comme les demandes d'analyses d'échantillons environnementaux n'a cessé d'augmenter au cours des dernières années, il est devenu impératif que le traitement des échantillons pour l'analyse des ultra-traces soit fait dans une salle propre destinée à cet usage. Une des salles du laboratoire de spectrochimie, actuellement servant d'entrepôt de petit matériel, sera transformée en salle "propre" exclusivement réservée à la fabrication du fondant (métaborate de lithium) et au traitement des échantillons à faibles teneurs.

### **I.6.2. Préconcentration d'éléments sur résine**

Le laboratoire de spectrochimie met actuellement au point des procédures de préconcentrations de certains éléments à l'aide de résines échangeuses d'ions avant l'analyse par ICP-MS. Cette technique permet d'analyser des solutions concentrées mais possédant une charge faible car la solution est dépourvue des éléments majeurs (Si, Al, Fe... et Li et B du fondant). Ceci limite aussi les interférences isobariques des autres éléments, sous forme d'oxydes ou autres. Les éléments à l'étude actuellement sont: les Terres Rares et U-Th; les platinoïdes et Cd-Au-Ag; Pb et Sr. Des tests de justesse et de reproductibilité des rapports isotopiques de Sr et de Pb sont prévus avant la fin de l'hiver 1997.

### **I.6.3. Le Robot Lab-Séparateur**

De février à mai 1996, le SARM a accueilli M. Fabien Commeret, stagiaire en Maintenance et Gestion des Systèmes Automatisés (MAS). Sous la responsabilité de G. Mévelle (IE1) et avec l'assistance de P. Hild (AI), F. Commeret a réalisé un robot complètement contrôlé par ordinateur. Ce robot passe des échantillons liquides sur colonne échangeuse d'ions afin de préconcentrer les éléments voulus avant l'analyse à l'ICP-MS. Ce robot sera installé dans une hotte fermée avec circulation d'air au travers d'un filtre HEPA, permettant ainsi son fonctionnement dans un environnement propre, à l'abri des poussières. Cette hotte sera placée dans la nouvelle salle propre du SARM.

### **I.6.4. Un nouveau nébuliseur pour l'ICP-MS**

En juin 1996, le SARM a testé un nouveau nébuliseur pour les systèmes ICP. Ce DIN (Direct Introduction Nebulizer) fonctionne avec une pompe à haute pression (100 - 500 psi) et permet l'analyse de micro-échantillons (de 30 à 100 µl). Le DIN ne possède pas de chambre de nébulisation. Ainsi, la dépollution de l'appareil entre deux échantillons est beaucoup plus rapide et beaucoup plus efficace qu'avec un nébuliseur "classique" à chambre. Le temps d'analyse d'un échantillon, auparavant près de trois minutes, passe maintenant à tout juste une minute, ce qui représente presque un facteur trois en économie de temps et donc d'argon.

## **I.7. Personnel**

### *Ingénieurs:*

Carignan, J. (IR1) - responsable  
Vernet, M. (IR1 - retraite en septembre 1996)  
Mévelle, G. (IE1)  
Marin, L. (EI2)  
Morel, J. (IE2)

### *Techniciens:*

Hild, P. (AI)  
Boulmier, S. (T1Prov.)  
Lhomme, J. (T1Prov.)  
Gaude, C. (TCN)  
Noel, M.T. (AJTP)  
Raigue, C. (AJTP)  
Blanchard, C. (AJT)

**Geostandards newsletter**

## *Geostandards Story*

My geostandards story began, without my being aware of it, in the Spring of 1957 when I came to the CRPG as a "stagiaire" in the "Laboratoire de Spectrographie". By a series of unexpected hazards, soon I found myself in charge of the Laboratory. The two persons who provoked these hazards are the Founder of the CRPG and his successor: Prof. Marcel Roubault who founded the CRPG in 1953 and Dr. H. de La Roche who came as the Deputy Director in 1958. It is not easy to imagine today all the tremendous help and constant support, both financial and material, that I benefited under their directorships.

Even before my coming, Prof. Roubault had already prepared four in-house rock standards, three granites and one serpentine from the Vosges Mountains and was getting them analysed for major and minor elements. In addition to this start in geostandards programs, he had the foresight to order a Direct Reader with the idea of developing high-speed rock analysis. Thus, the scene and background were already set up for direct-reading spectrochemical rock analysis so common today. It was at that time I developed lithium borate fusion of rock samples and their dissolution in dilute acids; further developments in rock analysis, particularly automation of sample preparation, led to the creation of the "Service d'Analyse des Roches et Minéraux du CNRS".

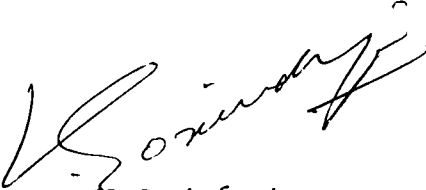
During the years 1958 to 1966, six rock and mineral standards were prepared (GR, GA, GH, BR, Mica-Fe, Mica-Mg) all of them, except GR, are still available. This local action became a national one with the formation of an ANRT working group; six reference samples (DR-N, UB-N, BX-N, DT-N, GS-N, FK-N) were processed in amounts varying from 600 to 1300 Kg; ten kg of a glass standard (VS-N) with 28 trace elements was also prepared. In February 1976, the ANRT members decided to transform the group into an International Working Group (IWG) starting in 1977. At the same time, I suggested starting a journal as a support for the IWG which, in its turn, prepared 13 geostandards (AN-G, BE-N, MA-N, AL-I, IF-G, AC-E, CHR-Pt+, CHR-Bkg, ZW-C, WS-E, PM-S, MDO-G, ISH-G).

The Journal was named Geostandards Newsletter; the first issue was released in February 1977. It took a

year to prepare and publish it. Remember that in those days word processing and page-set-up software were not easily accessible. I recall that I had to develop a page-set-up program with our laboratory minicomputer PDP/11 which was available to me only during Saturdays and Sundays. Finally, the first issue was published in the same format as it is today. More difficult was to muster the help of specialists in contributing papers to the first issue of an unknown journal. The specialists understood the need for a "journal devoted to the study and promotion of geochemical reference samples". Five hundred and fifty authors have contributed 482 papers for the 20 volumes (1977-1996), with 41 normal issues and four special issues. The impact factor of Geostandards Newsletter, despite its appellation "Newsletter" has resulted in ranking it, for most years, among the first ten geoscience journals. In short, Geostandards Newsletter has become a primary international journal in the field of geostandards

Officially, I retired in October 1994; however, I continued to work benevolently to manage the Journal and keep running the IWG. Now, with the release of the last issue (October 1996) of the 20th volume and its Supplement (Author and reference Index for the 20 volumes), I have decided to step down as the Editor-in-Chief, Managing Editor and the "Directeur de la Publication"; at the same time, the IWG, which I can no longer manage, is dissolved. I thank, gratefully and with an indelible emotion, the IWG Members, Journal Subscribers, Authors, Referées and the Regional Editors without all of whom neither the Journal could have progressed nor would the IWG have promoted the use, processing and the study of geostandards.

So ends my geostandards story, after nearly four decades, with a feeling of "something attempted, something done".



R. Govindaraju

Founder  
Editor-in-chief

K. Govindaraju

# geostandards newsletter

## *Guest Editorial*

### **Letter from the new Editors-in-Chief :**

#### **Geostandards Newsletter: *The Journal of Geostandards and Geoanalysis***

There can be no doubt as to the success of Geostandards Newsletter and its influence on the Geoanalytical Sciences. As Founding Editor, Raj Govindaraju can be justifiably proud of his achievement in editing no less than 20 volumes of the Journal and so stimulating the characterisation and development of geological reference materials to a point where arguably this branch of science is better provided for than any other. However, as Raj stands down as Editor-in-Chief, we are planning important developments designed to build on the success of the Journal. Starting from the April 1997 issue, Geostandards Newsletter will be sub-titled 'The Journal of Geostandards and Geoanalysis' to signify our vision that the Journal should develop into the premier medium whereby research contributions in geoanalytical techniques as well as more traditional reference materials studies will be published. We aim to do this by recruiting a new editorial team and revising the refereeing policy. We cannot achieve these ambitions without your continuing support in both subscribing to the Journal and offering your research developments for publication. We look forward to a partnership with the geoanalytical community that will carry 'Geostandards Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis' through into the next millennium.

*Phil Potts*

*Gérard Manhès*

*Editors-in-Chief*

## *Geostandards Newsletter:* *The Journal of Geostandards and Geoanalysis*

As of the April 1997 issue, "Geostandards Newsletter" will become "**Geostandards Newsletter: *The Journal of Geostandards and Geoanalysis***" with an expanded scope that will include research contributions in the development of geoanalytical techniques as well as more traditional reference material studies.

**Editorial Office:** The editorial office of the Journal will remain at the Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Nancy, France.

**Editorial Team:** The Editors-in-Chief are Phil Potts (Open University, UK) and Gerard Manhès (Institut de Physique du Globe, Paris), who will be aided by a group of six regional editors and a group of associate editors, the names of whom will be announced in the near future.

### **Editorial Policy and Instructions to Authors:**

**Scope:** Geostandards Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis welcomes any research contribution that complies with the new editorial policy listed below. A detailed set of instructions to authors is available from the Editorial Office on request.

'Geostandards Newsletter: *The Journal of Geostandards and Geoanalysis*' is an international journal dedicated to advancing the science of reference materials, analytical techniques and data quality relevant to the chemical analysis of geological samples. Papers are accepted for publication following peer review if they fall into one of the following categories:

- (a) Original research papers that make a significant contribution to advancing scientific knowledge in any of the following fields:
  - (i) Developments in analytical techniques including methods suitable for the bulk, isotopic and microprobe analysis of geological samples.
  - (ii) The results of studies of geological reference materials and analytical methods.
  - (iii) Developments in the statistical analysis of reference material, and other geoanalytical data, including aspects supporting the concept of "fitness for purpose".
  
- (b) Data compilations that represent the results of:
  - (i) New collaborative studies on analytical methods.
  - (ii) New certification studies on reference samples
  - (iii) New results from proficiency testing trials of laboratories.
  - (iv) Revisions of previously published reference material data that demonstrate a significant improvement in the quality of specified reference values or present values for additional constituents.
  - (v) Revisions of previously published reference material data that extend the use of the reference material to new areas of application (e.g., to microanalysis or speciation studies).

Compilations must be accompanied by an evaluation of data to demonstrate an improvement compared with previously published data. In particular, compilations of previously published data must demonstrate that there is a statistically significant difference between new and previous

compiled values with evidence that the new compiled value is a better estimate of the true value. If these criteria cannot be demonstrated, reference should be made to the earlier compilation and source data omitted from the new compilation.

(c) Reviews that discuss progress or topical developments in any area that is of general interest to the geoanalytical community. Authors considering offering such contributions should first contact the Editors-in-Chief.

**Refereeing policy:** To maintain the highest standards, all manuscripts offered for publication will normally be reviewed by two independent referees who will be asked to judge the paper by the criteria set out above. The comments and recommendations of the referees will be reviewed by the Editors-in-Chief who will decide whether or not to accept the paper for publication. The decision of the Editors-in-Chief in judging the merit of a contribution is regarded as final. The Journal is committed to as rapid a possible publication schedule of high quality contributions. Every effort will be made to minimise delays.

**Submission requirements:** Manuscripts (the original and two copies) should be sent to either (i) One of the Editors-in-chief or Regional Editors or (ii) the Editorial Office, at the CRPG in Nancy, France. Papers should be typed on one side of A4 (or US letter or equivalent size) and accompanied by a separate copy of the original of any diagrams suitable for direct photographic reproduction. To simplify typesetting, it is strongly recommended that an electronic copy of the manuscript text be submitted along with the typescript. The following disc formats can be read: 3.5 inch exchangeable disc in PC or Macintosh format to 0.7 or 1.4 Mb. and the following word processing packages can be accepted: Microsoft Word (v 5-7), Word Perfect (v 5-6), Interchange Format (RTF) or Excel. To ensure maximum dissemination of information, the recommended language of contributions is English. As an alternative, papers in French or German will be accepted.

**Terminology:** Manuscripts should use SI units throughout and comply with the latest ISO and IUPAC approved terminology. In particular, contributors should use analytical terms and definitions published in "International vocabulary of basic and general terms in metrology" (VIM) which is published in three parts: Part 1, Basic and general terms (international); Part 2, Vocabulary of legal metrology - fundamental terms; Part 3, Guide to the expression of uncertainty in measurement, published in 1995 by the International Organisation for Standardisation (ISO).

Authors should also consult the following references for guidance:

The international system of units (6th edition): 1991. Bureau International de Poids et Mesures (Sèvres, France).

ISO Guide (1993)	Guide to the expression of uncertainty in measurement (1st edition).
ISO Guide 30:1992	Terms and definitions used in connection with reference materials.
ISO Guide 31:1981	Contents of certificates of reference materials.
ISO Guide 33:1989	Uses of certified reference materials.
ISO Guide 34:1996	Quality system guidelines for the production of reference.

**Copyright:** To prevent mis-use of published material and ensure the maximum dissemination of information, authors are asked to transfer copyright to the Publishers, unless this action would contravene Government restrictions placed on an author.

**Editorial Office:** Geostandards, CRPG, B.P. 20, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy, France.

**Implantation de la sonde ionique CAMECA IMS 1270**

## **II - Implantation de la sonde ionique Cameca IMS 1270 au CRPG**

La microsonde IMS 1270 sera livrée à Nancy durant la semaine du 16 au 20 décembre 1996. L'échéancier le plus optimiste prévu par la société Cameca est ensuite de 2 semaines d'assemblage et de pompage début janvier puis d'environ 3 mois de réglages et de tests conduits par un ingénieur Cameca. La livraison de l'instrument connaîtra donc un retard de 8 mois puisque la commande de la troisième et dernière tranche de l'IMS 1270 a été signée par l'INSU en juillet 1995, ce qui engageait Cameca à la livrer 8 mois plus tard, donc en avril 1996. Fin mai 1996, l'IMS 1270 n°5, qui sera livrée à Nancy, commençait à fonctionner en mono-collection chez le fabricant, mais les tests sur la multi-collection, dont il s'agit du premier exemplaire, ont subi des retards.

### **II.1. Développement de l'IMS 1270 N°5 chez CAMECA.**

A la fin du mois de mai 1996, l'IMS 1270 N°5 était entièrement montée à Courbevoie, avec la physique du système de multicollection installée et câblée (avec les 5 collecteurs et multiplicateurs d'électrons sur chariots mobiles). Les tests effectués en monocollection avaient déjà permis d'obtenir un alignement satisfaisant de l'ensemble des faisceaux primaires et secondaires et de vérifier le fonctionnement des différentes parties (faisceaux primaires, faisceaux secondaires, secteurs électrostatiques et magnétiques). Sur la multicollection elle-même, les tests effectués à cette date (octobre 1996) ont montré que le système de pompage permettait d'obtenir en un temps raisonnable des conditions d'ultra-vides et que le déplacement des chariots portant les collecteurs était parfaitement contrôlé par le logiciel. Les tests en cours actuellement concernent la calibration des chaînes électroniques de mesure. Deux séries de tests de mesure isotopique sont prévues courant novembre avec des chercheurs du CRPG.

### **II.2. Installation de l'IMS 1270 au CRPG**

Le bâtiment destiné à accueillir l'IMS 1270 est complètement achevé depuis l'automne 1995. La "petite" sonde ionique IMS 3f du CRPG est installée dans la pièce de ce bâtiment qui lui a été réservée depuis le début de l'année 1996, ce qui nous a permis de commencer à bénéficier pour l'utilisation de cet instrument d'un environnement bien plus fonctionnel et agréable.

### **II.3. Organisation du comité National de la sonde 1270**

Une première réunion du comité scientifique de la sonde 1270 a eu lieu le 3 mai 1995 à Nancy, en présence de G. Manhès (président), J.N. Ludden (secrétaire), G. Aubert, C. Mevel, F. Albarède, M. Chaussidon, E. Deloule, P. Vidal, et P. Allé. S'étaient excusés : M. Javoy, B. Hamelin, A. Hofmann, J. Lancelot M. Slodzian et J.M. Cases.

Au cours de cette réunion, il a été décidé d'organiser des groupes de travail pour assurer les développements analytiques nécessaires à la mise en oeuvre de l'instrument dans le cadre du service national et d'assurer sa promotion dans la communauté nationale. Trois groupes de travail ont été proposés, l'un sur les isotopes radiogéniques, l'un sur les isotopes stables et le troisième sur l'analyse des particules.

Le comité s'est mis d'accord pour considérer que les deux premières années de fonctionnement de l'IMS 1270 seront consacrées au développement d'applications, assurées par les chercheurs nancéiens et les groupes de travail, pour évoluer ensuite vers une utilisation liée aux programmes de recherche soutenus par l'INSU, l'Europe ou des demandes extérieures.



**E - Points forts des activités de recherche**  
(chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs)

A la suite des noms de chaque chercheur, enseignant-chercheur et ingénieur, la **rubrique 1)** indique l'équipe à laquelle ils appartiennent (**DLM** : Dynamique de la Lithosphère et Modélisation, **GI** : Géochimie Isotopique, **MME** : Minéraux, Matériaux et Expérimentation) ainsi que leurs grands thèmes de recherche et la **rubrique 2)** les points forts de leur recherche actuelle.

## Chercheurs CNRS

### **ARNOLD Michel**

54ans  
CR1

- 1) MME. Cristallographie et minéralogie appliquée.
- 2) Synthèse de matériaux cristallins et application à l'inertage des déchets industriels toxiques.

### **BERTRAND Jean-Michel**

56 ans  
DR2

- 1) DLM. Structure et géochronologie U-Pb
- 2) Production de données U-Pb sur zircons, sphène et monazite. Mise au point d'un projet GéoFrance 3D.

### **BOULLIER Anne-Marie**

46 ans  
DR2

- 1) DLM. Interactions fluides et déformation dans la croûte.
- 2) Mise en évidence de fluctuations de la pression fluide dans une zone sismogénique fossile archéenne (Abitibi, Québec). Caractérisation structurale de cette zone.

### **BROWN William**

66 ans  
DR1

- 1) MME. Cristallographie, minéralogie et études texturales. Feldspaths et roches partiellement vitreuses,
- 2) Inertage des déchets (REFIOM) par vitrification. Rédaction d'un deuxième volume d'un livre sur les feldspaths..

### **CHAUSSIDON Marc**

35 ans  
CR1

- 1) GI. Géochimie isotopique et Cosmochimie
- 2) Etudes de la composition isotopique du Li et du B dans les chondres des météorites. Conséquences sur les processus de nucléosynthèse présolaires. Géochimie isotopique du bore dans le manteau terrestre.

### **DELOULE Etienne**

40 ans  
CR1

- 1) GI. Géochimie isotopique et Cosmochimie
- 2) Etudes des rapports isotopiques D/H dans les chondrites carbonnées. Conséquences sur la condensation de la nébuleuse pré-solaire.

### **DESMONS Jacqueline**

60 ans  
CR1

- 1) DLM. Métamorphismes. Alpes : cinématique, cartographie métamorphique, Vanoise
- 2) Cadre tectonostructural des Alpes au Tertiaire. Nomenclature des roches métamorphiques.

### **FRANCE-LANORD Christian**

39 ans  
CR1

- 1) GI. Isotopes stables et érosion
- 2) Isotopes stables. Enregistrement sédimentaire de l'érosion himalayenne. Relations tectonique-climat-composition de l'eau de mer.

### **GIULIANI Gaston**

42 ans  
CR1 ORSTOM

- 1) DLM. Genèse minéralisations aurifères et à béryllium
- 2) Géochimie interactions fluides et minéraux. Inclusions fluides. Isotopes stables.

### **LETERRIER Jacques**

59 ans  
CR1

- 1) DLM. Géochimie. géochronologie U/Pb.
- 2) Dynamique de la croûte. Géochronologie U-Pb sur zircon, monazite et sphène de granitoïdes d'âges et de sites géodynamiques variés.

### **LUDDEN John**

44 ans  
DR1

- 1) DLM. Géochimie, pétrologie.
- 2) Evolution géochimique des magmas à travers les temps géologiques. Formation et stabilisation de la lithosphère.

- OHNENSTETTER Daniel***  
49 ans  
CR1
- 1) MME. Pétrologie, Minéralogie et Matériaux  
2) Pétrologie et minéralogie des boninites. Spectrométrie de cathodoluminescence de minéraux naturels et de synthèse. Etude de complexes anorogéniques .
- OHNENSTETTER Maryse***  
47 ans  
DR2
- 1) MME. Pétrologie, Minéralogie et Matériaux  
2) Pétrologie des complexes basiques et ultra-basiques. Minéralisations platinifères atypiques.
- PLOQUIN Alain***  
56 ans  
CR1
- 1) MME. Paléométaballurgie .  
2) Caractérisation des scories et des déchets de forges. Transition des processus de type «bas-fourneau» et de type «haut-fourneau» .
- REISBERG Laurie***  
39 ans  
CR1
- 1) GI. Géochimie isotopique du système Re-Os.  
2) Re-Os des péridotites. Datation de l'évolution de la lithosphère sous-continentale. Re-Os des sédiments et érosion .
- SAUPE Francis***  
62 ans  
CR1
- 1) GI. Géochimie isotopique du soufre.  
2) Mise au point d'une technique d'extraction du soufre de végétaux, substances ligneuses et lignite.
- STUSSI Jean-Marc***  
62 ans  
CR1
- 1) DLM. Pétrologie des granitoïdes.  
2) Minéralisations et évolution géotectonique des orogènes. Expertise des matériaux des sites de stockage. Cartographie géochimique des granitoïdes.
- ZIMMERMANN Jean-Louis***  
60 ans  
CR1
- 1) DLM. Géochimie des gaz. Géochronologie K-Ar.  
2) Fluides associés à la formation des gisements d'émeraudes du Brésil et de Colombie. Etude des relations entre la composition des minéraux et les gaz extraits.

## **Enseignants - Chercheurs UHP-Nancy1 et ENSG-INPL**

- BARBEY Pierre***  
49 ans  
PR 1
- 1) MME. Pétrologie et géochimie.  
2) Evolution de la croûte continentale. Mécanismes de mise en place des magmas. Relations avec la déformation et la recristallisation de l'encaissant. Stabilité des matériaux mal organisés (projet Vitrail).
- CHALOT-PRAT Françoise***  
44 ans  
MC 1
- 1) DLM. Pétrologie et géochimie.  
2) Genèse des magmas acides et basiques : caractérisation des sources et dynamique éruptive.
- CHAROY Bernard***  
55ans  
MC Hcl
- 1) DLM. Métallogénie . Pétrologie . Cristallogénie.  
2) Minéralisations et occurrences de métaux rares de haute technologie. Phases minérales poreuses et altération.
- CHEILLETZ Alain***  
48ans  
MC I
- 1) DLM. Métallogénie - Géochronologie et Thermochronologie K - Ar et  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$   
2) développement méthodologique et analytique. Formation des gisements d'émeraude de Colombie.

***GASQUET Dominique***

44 ans  
MC1

- 1) DLM. Pétrologie structurale, tectonique.
- 2) Relations structures-pétrologie des granitoïdes. Evolution rhéologique des associations plutoniques acide-basique. Cadre géodynamique de mise en place des granitoïdes. Fracturation et néotectonique.

***LIBOUREL Guy***

40ans  
MC

- 1) MME. Minéralogie et pétrologie expérimentale.
- 2) Relations de phases. structure des verres silicatés. Différenciation métal-silicate. Vitrification des résidus ultimes et durabilité des verres de stabilisation.

***MACAUDIERE Jean***

61 ans  
Pr1

- 1) DLM. Pétrologie et géologie structurale.
- 2) Cinématique de la déformation alpine. Application de l'étude de la rupture et de la déformation à des cibles économiques. Cadre géodynamique et structural de minéralisations..

***MALLET Jean Laurent***

52 ans  
Pr

- 1) DLM. Informatique géologique et modélisation 3D.
- 2) Modélisation 3D de la géométrie, la topologie et les propriétés physiques des objets naturels. Direction du projet de modéleur GOCAD.

***MARIGNAC Christian***

53 ans  
MC HC

- 1) DLM. Métallogénie, minéralogie
- 2) Evolution métallogénique des complexes orogéniques. Minéralisations et hydrothermalisme associés.

***MARTY Bernard***

43 ans  
PR 2C

- 1) GI. Géochimie isotopique des gaz rares et géochimie de surface.
- 2) Circulation des fluides dans la Lithosphère. Origine et évolution des magmas, Evolution primitive de la Terre et cycle des volatils terrestres. Paléotempérature des aquifères à partir des gaz rares.

***WEISBROD Alain***

60ans  
PR Cl ex. 2

- 1) MME. Pétrologie expérimentale et minéralogie
- 2) Fluides hydrothermaux. Diagrammes de phases eau-sels.. Equilibres et cinétique des interactions minéraux-fluides. Métamorphisme.

## **Ingénieurs CNRS**

***CARIGNAN Jean***

31 ans  
IR1

- 1) SARM. Géochimie et géochronologie.
- 2) Géochimie isotopique des éléments en traces des aérosols minéraux. Développements analytiques pour le dosage des ultra-traces dans les matériaux géologiques. Responsable du Service d'Analyses des Roches et Minéraux.

***CHAMPENOIS Michel***

38 ans  
IE2

- 1) DLM. Géologie structurale, informatique..
- 2) Quantification de la déformation des roches à l'échelle microscopique au moyen de l'analyse d'images interactive ou numérique.

***JACQUEMIN Pierre***

45ans  
IR1

- 1) DLM. Informatique géologique et modélisation 3D,
- 2) Modélisation de surfaces et volumes complexes. Reconstruction palinspastique de couches géologique, Méthode de dépliage en 3D.

***LE CARLIER DE VESLUD***

***Christian***

32ans  
IR2

- 1) DLM. Informatique géologique et modélisation 3D,
- 2) Modélisation théorique et numérique des transferts de chaleur et de masse dans les corps géologiques. Développement de logiciels et applications à des cas d'études réels (géothermie, stockage).

***LHOTE François***

53ans

IR2

1) Minéralogie.

2) Diffractométrie des Rayons X. Etudes minéralogiques fines. Mesures de cristallinité et d'orientations cristallines..

***ROYER Jean-Jacques***

45 ans

IR1

1) DLM. Informatique géologique et modélisation 3D.

2) Modélisation numérique 3D des transferts dans les milieux naturels . Caractérisation des propriétés physiques de la croûte terrestre. Estimation des ressources et des risques naturels (géostatistiques et stockages).

**F - Contrats de recherche**

## CONTRATS CEE :

Titre : The genesis of Colombian emerald deposits : contribution of the structural geology and geochemistry

Programme : International Cooperation

Responsable scientifique : Alain CHEILLETZ

Montant total : 550 KF

Durée : 01/02/95 au 31/01/97

Titre : New exploration methods for platinum and rhodium deposits poor in base metal sulphides

Programme : BRITE/EURAM

Responsable scientifique : Daniel OHNENSTETTER

Solde venant de la Délégation Régionale d'Orléans - 56,5 KF

Titre : Bourse capital humain et mobilité : sonde ionique

Programme : Contrat bourse

Responsable scientifique : Etienne DELOULE

Montant total : 625 KF

Durée : 10/10/94 au 10/7/96

Titre : Chemical tracing of fluid movement within and between geological reservoirs

Programme : Programme II Joule

Responsable scientifique : Bernard MARTY

Montant total : 658,9 KF

Durée : 01/10/92 au 30/09/95

Titre : Mass and heat transfer from the earth's mantle into the crust : helium isotopes, heat flow and tectonics

Programme : INTAS

Responsable scientifique : Bernard MARTY

Montant total : 30,8 KF

Durée : 01/07/95 au 30/06/97

Titre : Seismic Hazard Zonation with a multidisciplinary approach, using fluid-geochemistry methods

Programme : Environment and Climate 1994/1998

Responsable scientifique : Bernard MARTY

Montant total : 600 KF

Durée : 15/03/96 au 14/03/98

## CONTRATS PRIVÉS :

Titre : Etude et caractérisation d'échantillons fournis par la Société

Responsable scientifique : Michel ARNOLD

Société participante : EMC Services

Montant total : 65 KF

Durée : 02/01/95 au 02/01/96

Titre : Développer, coordonner et promouvoir des recherches dans le domaine de l'inertage des déchets ultimes et de l'analyse de ceux-ci.

Responsable scientifique : Guy LIBOUREL

Société participante : SITA

Montant total : 813,6 KF

Durée : 23/02/93 au 23/02/97

Titre : Etude et caractérisation d'échantillons cristallisés fournis par la Société

Responsable scientifique : Michel ARNOLD

Société participante : TREDI

Montant total : 300 KF

Durée : 01/07/95 au 30/06/97

Titre : Calibrage géologique quantitatif des données sismiques  
Responsable scientifique : Jean-Jacques ROYER  
Société participante : I.F.P.  
Montant total : 221,7 KF  
Durée : 01/01/93 au 31/07/95

Titre : Etude minéralogique fine d'un certain nombre de produits  
Responsable scientifique : François LHOTE  
Société participante : ANALYS  
Montant total : 122,8 KF  
Durée : 13/04/94 au 12/04/97

Titre : Vérification de la qualité de différents types de flux recristallisés avant commercialisation et établissement d'un état précis des anomalies en cas de non conformité  
Responsable scientifique : François LHOTE  
Société participante : SAUVAGEAU  
Montant total : 134,4 KF  
Durée : 13/04/94 au 12/04/97

Titre : Analyse par diffraction aux Rayons X de différents échantillons  
Responsable scientifique : François LHOTE  
Société participante : IRH Environnement  
Montant total : 64 KF  
Durée : 01/03/96 au 28/02/97

Titre : Détermination des éléments constitutifs de carottes de sondage  
Responsables scientifiques : K. GOVINDARAJU et J. MOREL  
Société participante : CREGU  
Montant total : 161 KF  
Durée : 15/09/94 au 15/01/95

Titre : Etude et caractérisation d'échantillons fournis par la société  
Responsables scientifiques : K. GOVINDARAJU et J. MOREL  
Société participante : EMC Services  
Montant total : 400 KF  
Durée : 02/01/94 au 31/12/96

Titre : Etude et caractérisation d'échantillons fournis par la société  
Responsable scientifique : Jacques MOREL  
Société participante : TREDI  
Montant total : 200 KF  
Durée : 01/10/95 au 31/12/95

Titre : Préparation et certification d'échantillons de référence fournis par la société  
Responsables scientifiques : Jean CARIGNAN et Jacques MOREL  
Société participante : SITA  
Montant total : 223,4 KF  
Durée : 01/08/96 au 31/01/97

Titre : Origine des hydrocarbures  
Responsables scientifiques : Bernard MARTY  
Société participante : TOTAL  
Montant total : 150 KF  
Durée : 01/01/96 au 31/12/96



## CONTRATS PUBLICS :

Titre : Evolution dans le temps de l'enregistrement

Responsable scientifique : Etienne DELOULE

Etablissement participant : IFREMER

Montant total : 33,2 KF

Durée : 01/12/94 au 31/03/95

Titre : Etude et caractérisation de 395 échantillons de pierre ou en céramique provenant de différents musées

Responsables scientifiques : K. GOVINDARAJU et G. MEVELLE

Etablissement participant : Ministère de la Culture - Direction des musées de France

Montant total : 126,4 KF

Durée : 17/11/94 au 16/11/95

Titre : Etude et caractérisation de 329 échantillons

Responsables scientifiques : Jacques MOREL avec participation Francis SAUPE

Etablissement participant : Ministère de la Culture - Direction des musées de France

Montant total : 120,3 KF

Durée : 14/12/95 au 31/12/96

Titre : Etude sur la répartition spatiale et spéciation du manganèse dans l'altération des vitraux médiévaux

Responsables scientifiques : William BROWN et Guy LIBOUREL

Programme Franco-Allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques

Montant total : 169,8 KF

Durée : 07/05/91 au 13/08/96

Titre : Processus et dévitrification des vitraux anciens

Responsable scientifique : Guy LIBOUREL

Etablissement participant : Ministère de la Culture et de la Francophonie

Montant total : 126,4 KF

Durée : 02/11/94 au 01/05/96

Titre : Etude de scories paléométallurgiques et de leur altérabilité comme analogues des déchets vitrifiés de classe A

Responsable scientifique : Alain PLOQUIN avec participation Jean-Jacques ROYER

Etablissement participant : CEA/CADARACHE

Montant total : 100 KF

Durée : 05/03/96 au 04/03/97

Titre : Bilan isotopique de l'eau dans les formations argileuses des ouvrages de l'ANDRA - Site EST 104

Responsable scientifique : Christian FRANCE-LANORD

Etablissement participant : ANDRA

Montant total : 150 KF

Durée : 23/02/96 au 30/09/96

Titre : Etudes des gaz rares dans les eaux et roches des ouvrages de l'ANDRA : Interprétation hydrodynamique

Responsable scientifique : Bernard MARTY

Etablissement participant : ANDRA

Montant total : 564 KF

Durée : 06/06/96 au 05/11/97

## ACTIONS THEMATIQUES PROGRAMMEES :

Titre : ATP Dynamique et bilan de la terre 1994  
thème "Erosion et Hydrogéologie"  
Responsable scientifique : Christian FRANCE-LANORD Coordinateur  
Montant total : 210 KF  
Part CRPG : 150 KF  
Durée : 01/04/94 au 31/12/95

Titre : ATP Géosciences Marines - 1995  
thème "Exploitation maximale des données"  
Responsable scientifique : John LUDDEN Coordinateur  
Montant total : 100 KF  
Part CRPG : 50 KF  
Durée : 01/08/95 au 30/06/97

Titre : ATP Dynamique et Bilans de la Terre 96  
Responsable scientifique : Christian FRANCE-LANORD Coordinateur  
Montant total : 153 KF  
Part CRPG : 26 KF  
Durée : 23/07/96 au 31/12/96

Titre : ATP Programme National de Planétologie 1996  
thème "Anomalies Isotopiques dans les météorites"  
Responsables scientifiques : François ROBERT et Marc CHAUSSIDON  
Montant total : 65 KF  
Part CRPG : 32 KF  
Durée : 01/06/96 au 31/12/96

Titre : Programme "Dorsales"  
thème "Effet de l'assimilation et du fractionnement sur la composition des basaltes océaniques"  
Responsable scientifique : John LUDDEN  
Montant : 65 KF  
Durée : 07/07/95 au 31/12/97

Titre : ATP Dynamique et Bilans de la Terre 96  
thème "Etudes isotopiques de l'hélium dans les panaches anciens"  
Responsable scientifique : Bernard MARTY  
Montant total : 19 KF  
Durée : 01/09/96 au 31/08/97

**G - Enseignement**

**Etudiants et chercheurs post-doctoraux**

## Liste des doctorants, au 1er janvier 1997

		Directeur	Début de thèse	Soutenance prévues	Financement	DEA d'origine	Etablissement d'inscription
AISSA Djamal	Algérienne	MARIGNAC	1991	1996	Bourse Fr.Algérie	NANCY	INPL
AIT-MALEK Halima	Marocaine	GASQUET					
		BERTRAND	1993	1996	Bourse Maroc	NANCY	INPL
ARNAUD Florence	Française	BOULLIER	1993	1996	Bourse BRGM	MONTPELLLLIER	NANCY I
BRANQUET Yannick	Française	CHEILLETZ	1995	1998	Bourse MRT	NANCY	INPL
CONRAUD Joel	Française	MALLET	1993	1996	Bourse MRE		INPL
FICHTL Patrick	Française	ROYER	1994	1997	Bourse IFP		INPL
GALY Albert	Française	FRANCE-LANORD	1994	1997	Bourse BDI	NANCY	INPL
		CHAUSSIDON					
GERARD Benoît	Française	ROYER	1993	1996	Bourse MRT	NANCY	INPL
HANON Pascal	Française	CHAUSSIDON	1993	1997	Bourse MRT	NANCY	INPL
		ROBERT					
HUMBERT Franck	Française	LIBOUREL	1994	1997	Bourse MESR	NANCY	NANCY I
		MARTY					
KOLLI Omar	Algérienne	MARIGNAC	1991	1996	Bourse CROUS		INPL
		CHEILLETZ					
MAHE Cécile	Française	PLOQUIN	1993	1997	Bourse ADEME	NANCY	INPL
		ARNOLD					
MARIEZ Olivier	Française	MALLET	1994	1997	Bourse INPL	NANCY	INPL ou NancyI
MESQUITA BARROS Carlos	Brésilienne	BARBEY	1993	1998	Bourse CNPQ	Brésil	NANCY I
		BOULLIER					
PERAZIAN Karen	Russe	MALLET	1995	1998			INPL
RAJABZADEH Ali	Iranienne	OHNENSTETTER M	1994	1997	Bourse Fr.Iran.		INPL
RAKOTOMANANA D.	Malgache	OHNENSTETTER M	1994	1997	B. Min.Coop.Fr.		NANCY I
ROUMET Catherine	Française	LIBOUREL	1995	1998	CDI Daum	NANCY	NANCY I
		DUSSAUSOY					
ROSE Estelle	Française	CHAUSSIDON	1995	1998	Bourse MRES	NANCY	INPL
RIBEIRO ALTHOFF AM	Brésilienne	CHEILLETZ	1992	1996	Bourse CNPq		INPL
STEPERNICH Jérôme	Française	LIBOUREL	1994	1997	Bourse ADEME	NANCY	NANCY I
VALLE PINTO COELHO Cristina	Brésilienne	CHAROY	1991	1995	Bourse CNPQ	NANCY	INPL
VELTEN Wolfgang	Allemande	MALLET	1994	1997	Bourse INPL		INPL
<b>PREMIERES INSCRIPTIONS</b>							
ADOU M'bé	Ivoirienne	GASQUET-BARBEY	1996	1999	Bourse CIES		INPL
BASIRE Christophe	Française	MALLET	1996	1999	Bourse INPL	NANCY	INPL
DECITRE Sylvie	Française	DELOULE-GASQUET	1996	1999	Bourse MRES	NANCY	INPL
DEREJE Ayalew	Ethiopienne	MARTY-BARBEY	1996	1999	Bourse CIES	CLERMONT	INPL
DEWONCQ Sarah	Française	MARTY	1996	1999	ANDRA	NANCY	INPL
GEORGES Peggy	Française	DELOULE-LIBOUREL	1996	1999	Bourse MRES	NANCY	INPL
LECOUR Magali	Française	MALLET	1996	1999	Bourse BDI	NANCY	INPL
PIERSON-WICKMANN AC	Française	REISBERG	1996	1999	Bourse MRES	NANCY	INPL
ROLLION-BARD Claire	Française	FRANCE LANORD- CHAUSSIDON	1996	1999	Bourse BDI	NANCY	INPL

## Liste des thèses soutenues de janvier 1995 à juillet 1996

AILLERES Laurent

"Structure et cinématique de la Zone Houillère Briançonnaise entre Arc et Isère (Alpes françaises) : Apport de l'inversion des données de la déformation finie aux modèles cinématiques classiques". T  
Thèse INPL co-dirigée par J.M. Bertrand et J. Macaudière

AIT ETTAJER Taoufik

"Modélisation de surfaces géologiques complexes sous contraintes géométriques".  
Thèse INPL dirigée par J.L. Mallet

ALTHOFF Fernando

Etude pétrologique et structurale des granitoïdes de Marajoara (Para, Brésil) : leur rôle dans l'évolution archéenne du craton amazonien (2,7 - 3,2 Ga)".  
Thèse INPL co-dirigée par A.M. Boullier et P. Barbey

BOUSHABA Abdellah

"Le massif granitique du Ment (Maroc central hercynien) dans son contexte tectono-magmatique régional et les manifestations hydrothermales associées.  
Thèse INPL co-dirigée par C. Marignac et A. Weisbrod

CASES-COLLET Sylvie

"Gestion automatique des relations entre modules : application à la CAO".  
Thèse INPL dirigée par J.L. Mallet

COGNOT Richard

"La méthode D.S.I. : Optimisation, Implémentation et Applications".  
Thèse INPL dirigée par J.L. Mallet

DIOP-BINETA Catherine

"Structures et circulations de fluides dans un avant-pays schisteux : le système de chevauchements des Mauritanides du Sénégal".  
Thèse INPL co-dirigée par A.M. Boullier et J.P. Burg

FEBVAY-CHOFFEL Laurent

"Etude des machefers résultant de l'incinération des déchets industriels : stabilité et traitement".  
Thèse INPL co-dirigée par M. Arnold et P. Blazy

FIRDAOUS Karima

"Etude des fluides dans une zone sismogénique fossile : les gisements aurifères mésothermaux archéens de Val d'Or, Abitibi, Québec".  
Thèse INPL dirigée par A.M. Boullier

JABBORI Jamila

"Etude pétrographique et structurale des migmatites de la bordure sud-est du dôme anatectique du Velay (Ardèche, Massif Central français)".  
Thèse Nancy 1 co-dirigée par P. Barbey et J. Macaudière

LAVEST Pascal

"Modélisation de la structure interne des réservoirs de type fluviale. Application sur un site de stockage de gaz en aquifère".  
Thèse INPL dirigée par J.L. Mallet

LE FORESTIER Lydie

"Résidus ultimes de l'incinération de déchets ménagers. Caractérisation chimique et minéralogique, essais de stabilisation par vitrification et comportement des verres à la lixiviation".  
Thèse INPL co-dirigée par G. Libourel et W.L. Brown

SAMSON Philippe

"Equilibrage de structures géologiques 3D dans le cadre du projet GOCAD.  
Thèse INPL dirigée par J.L. Mallet

**Liste des visiteurs de longue durée et  
des chercheurs post-doctoraux  
de janvier 1995 à octobre 1996**

BARTH Suzan	Université. de Zurich, Suisse	visiteur
BEETS Cristiaan	Université Amsterdam, Pays-Bas	chercheur post-doctoral
CONSTANTIN Marc	IFREMER Brest	visiteur
DELAPERRIERE Eric	Université de Montpellier	visiteur
DIAS Graciète	Universidade do Minho Portugal	chercheur post-doctoral
FORTES Paulo	Université du Brésil	visiteur
FU Weimin	Institut Technique de Kunning ,Chine	visiteur
KAMGAN Pierre	Université de Yaoundé, Cameroun	visiteur
MALAVERGNE Valérie	IPG, Paris	visiteur
MATSUBARA Kayo	Université d'Osaka, Japon	visiteur
MENDES Anabela	Université de Braga, Portugal	visiteur
OUGIR Hassan	Université de Meknès, Maroc	visiteur
OZIMA Minoru	Université de Tokyo	chercheur haut niveau
PEREGODOVA Anna	Institut Géophysique et Géologique de Novossibirsk, Russie	visiteur
PINTA SIMOES Pedro	Universidade do Minho, Portugal	visiteur
SHTUKA Arben	Université de Nancy 1- INPL	visiteur
TOLSTIKHIN Igor	University of Cambridge, Gde Bretagne	chercheur haut niveau
TOPLIS Mike	Université de Bayreuth, Allemagne	chercheur post-doctoral

PAYS	Nom de l'institution étrangère
------	--------------------------------

**1°) Institutions avec lesquelles le CRPG a des publications communes**

Algérie	Université des Sciences et Techniques H. Boumediene
Algérie	USTHB - Alger
Allemagne	Bayerisches Geoinstitut
Allemagne	Institut de Minéralogie - Université de Heidelberg
Allemagne	Université de Mayence
Brésil	Departamento do Geologia Universidade do Brasilia
Brésil	Université fédérale du R.N. - Natal
Canada	Mc Gill University
Canada	Queen's University - Kingston
Canada	Université de Montréal
Canada	Université du Québec - Chicoutimi
Canada	University of Victoria
Colombie	Université Nationale - Bogota
Espagne	Université de Grenade
Grande Bretagne	Department of Geology and Geophysics - Univervity of Edinburgh
Grande Bretagne	Leicester University
Grande Bretagne	Université de Cambridge
Grande Bretagne	Université de Leeds
Iran	Service Géologique
Japon	Université de Tokyo
Japon	University of Kanazawa
Maroc	Faculté des Sciences d'Agadir
Maroc	IST Univ. Mohamed V - Rabat
Maroc	Université d'Agadir
Maroc	Université de Meknès
Mexique	Université de Sonora - Hermosillo
Pays Bas	T.N.O. - Delft
Portugal	Centro de Geologia do Universidade do Porto (INIC)
Portugal	Faculdade de Ciencias - Porto
Portugal	Université du Minho - Braga
Russie	Inst. Métallogénie. Pétrographie. Mineralogie - Académie des Sciences
Sénégal	ORSTOM Dakar
Suisse	Departement de Minéralogie - Université de Genève
Suisse	Universités de Bâle et Berne
Turquie	Institut des Mines - Université Cukurova
USA	University of Colombia -Lamont-Doherty Earth Observatory - New York
USA	University of Kansas
USA	Woods Hole Oceanographic Inst.

**2°) Institutions avec lesquelles le CRPG a d'autres coopérations suivies**

Allemagne	Université de Bonn
Allemagne	Bayerisches Geoinstitut
Australie	University of Western Australia - Perth
Brésil	Université de Brasilia
Brésil	Université de Natal
Cameroun	Université de Yaoundé
Canada	Dalhousie University - Halifax
Canada	Queen's University
Canada	Université du Québec - Montréal
Espagne	Ecole des Mines - Madrid
Grande Bretagne	Heriot Watt Inst. - Edinburgh
Grande Bretagne	Imperial College
Grande Bretagne	Université de Londres
Italie	Université de Turin
Italie	Université La Sapienza - Rome
Pays Bas	T.N.O. - Delft
Portugal	Service Géologique et Minier
Portugal	Université de Porto
Suisse	Université de Zurich
USA	Université de Princeton
USA	Université de Stanford



**Enseignement dispensé par les chercheurs CNRS**

## UHP-Nancy 1

<i>M. Champenois</i>	2ème cycle, maîtrise «Matériaux», Introduction à la Morphologie mathématique, CM : 4 heures, TP : 6 heures.
<i>M. Chaussidon</i>	Géochimie. Cours : 4 heures
<i>C. France-Lanord</i>	Géochimie, 2ème cycle (Prép. CAPES-Agrégation), Cours.
<i>Ohnenstetter</i>	Cours : 6 heures
<i>L. Reisberg</i>	Géochimie, 2ème cycle, TD : 4 heures.
<i>J. J. Royer</i>	Modélisation, 2ème cycle, Maîtrise physico-chimie des matériaux, 8h CM.

## ENSG - INPL

<i>J. M. Bertrand</i>	Géologie et Géodynamique, Cycle Préparatoire Polytechnique (INPL), 1er et 2ème cycle, Cours, 8 et 15 heures.
<i>M. Champenois</i>	2ème année ENSG, Introduction à la Morphologie mathématique, CM : 6 heures, 3ème année, TP : 6 heures.
<i>M. Chaussidon</i>	Cosmochimie, bilans géochimiques, techniques d'analyse par sonde ionique, Cours, 2 heures, 2ème cycle - 3ème année ENSG.
<i>P. Jacquemin</i>	Informatique - 2ème cycle - TD - 60 heures et 3ème cycle - CM - 20 heures.
<i>J. J. Royer</i>	Géostatistique et traitement d'images, 2ème cycle, 21h CM et TD.
<i>J. M. Stussi</i>	2ème cycle, Cours, 6 heures.
<i>J. L. Zimmermann</i>	Fluides et Minéraux, cours : 6 heures.

## DEA "Physique et chimie de la Terre" UHP-Nancy1 / Strasbourg

<i>A.M. Boullier</i>	Tectonique, Cours, 6 heures.
<i>W. Brown</i>	Méthodes de microscopie électronique, Cours, 4 heures.
<i>J. Carignan</i>	Géochimie analytique, Cours, 9 heures.
<i>E. Deloule</i>	Géochimie, Cours : 8 heures.
<i>C. France-Lanord</i>	Géochimie, Cours, 11 heures.
<i>J. Ludden</i>	Cours 8h, Techniques analytiques. Evolution de la croûte.
<i>M. Ohnenstetter</i>	Métallogénie, cours, 3 heures.
<i>L. Reisberg</i>	Géochimie, TD : 6 heures.
<i>J. J. Royer</i>	Modélisation des transferts, 3ème cycle, Géostatistique, 9h CM + TD

## Autres établissements d'enseignement supérieur

<i>E. Deloule</i>	Lasers et applications, Institut de Physique et d'électronique, DESS Méthodes Avancées d'Analyses Physiques (Univ. de Metz), cours : 6 heures.
<i>A. Ploquin</i>	DESS Archéo-Sciences, Univ. Dijon, Cours, 7 heures.
<i>L. Reisberg</i>	Géochimie, Cours : 2 heures, MNHN, Paris.
<i>J. J. Royer</i>	Probabilités, EMN, Nancy, 2ème cycle, 30h CM+ TD. Géostatistique traitement des données, DESS - CESEV, Ecole de Géologie Nancy, 20h CM + TD Statistiques, ENGEES, Strasbourg, Mastère Maîtrise des Déchets, 12h CM + TD.

**Enseignement dispensé par les enseignants chercheurs**

## UHP-Nancy 1

<i>P. Barbey</i>	DEUG : Géologie Générale 2ème cycle : Pétrologie magmatique et métamorphique Diagrammes de phases et thermobarométrie Partage des éléments
<i>F. Chalot-Prat</i>	DEUG : Géologie Générale 2ème cycle : Pétrologie endogène, genèse des magmas
<i>G. Libourel</i>	DEUG : Géologie Générale 2ème cycle : Pétrologie Thermochimie et thermodynamique Relations de phases
<i>B. Marty</i>	2ème cycle : Géochimie isotopique

## ENSG - INPL

<i>F. Chalot-Prat</i> <i>B. Charoy</i>	Pétrologie endogène. Cristallographie. Minéralogie. Responsable du stage de terrain "Cartographie géologique".
<i>A. Cheilletz</i>	Cartographie, pétrologie, suivi de projets Petrologie-métamorphisme Responsable du stage de terrain "Cartographie des formations de socle".
<i>D. Gasquet</i>	Cartographie, analyse structurale. Pétrographie structurale, néotectonique. Responsable du stage de terrain "Géologie structurale".
<i>G. Libourel</i> <i>J. Macaudière</i>	Géologie générale. Direction des études. Géologie structurale et analyse structurale, structure des roches métamorphiques, étude de la fracturation des roches. Cartographie. Tectonique distensive.
<i>J. L. Mallet</i>	Informatique générale, structure des données, algorithmique. Infographie 3D, modélisation de surfaces et de volumes complexes. Géométrie différentielle
<i>B. Marty</i>	Géochimie générale. Cycles géochimiques. Géochimie des eaux souterraines.
<i>A. Weisbrod</i>	Thermodynamique

## DEA "Physique et Chimie de la Terre" UHP-Nancy1 / Strasbourg

<i>P. Barbey</i> <i>A. Cheilletz</i> <i>G. Libourel</i>	Responsable nancéien du DEA "Physique et Chimie de la Terre". Fluides dans les bassins Structure des liquides silicatés. Pétrologie expérimentale et minéralogie appliquée.
<i>J.L. Mallet</i> <i>B. Marty</i>	Modélisation 3D. Responsable du module "cycles géochimiques".

## **Autres établissements d'enseignement supérieur**

<i>F. Chalot-Prat</i>	<i>IUFM</i>	Formation continue des professeurs du secondaire et préparation au Capes interne.
<i>B. Charoy</i>	<i>CESEV</i>	Hydrothermalisme
<i>A. Cheilletz</i>	<i>CESEV</i>	Les skarns minéralisés Les porphyres cuprifères
	<i>EMN</i>	Géologie générale
	<i>MAFPEN</i>	Formation continue "Le temps en géologie"
<i>D. Gasquet</i>	<i>EMN</i>	Encadrement du stage de terrain "Corbières"
<i>G. Libourel</i>	<i>EMN</i>	Gestion des déchets
	<i>DEA "LISA", Paris</i>	Gestion des déchets et altération des verres.
<i>C. Marignac</i>	<i>EMN</i>	Géologie générale

**Devenir des étudiants (thésards et DEA)**

## Devenir des étudiants

### Thésards ayant soutenu en 1995-1996

Aillères Laurent	Stage post doctoral à Monash University (Melbourne, Australie).
Ait Ettajer Taoufik	Contrat dans le cadre du consortium GOCAD.
Althoff Fernando	Maître de Conférence à l'université de Sao Leopoldo (RS, Brésil).
Boushaba Abdellah	Emploi au Maroc.
Cases-Collet Sylvie	CDI BEICIP, Paris.
Cognot Richard	Contrat dans le cadre du consortium GOCAD.
Diop-Bineta Catherine	Retour au Sénégal.
Febvay-Choffel Laurent	EMC-Services.
Firdaous Karima	Sans emploi.
Jabori Jamila	SAMINE El Hammame, Maroc.
Lavest Pascal	CDI Gaz de France, Paris.
Le Forestier Lydie	ATER à l'UHP-Nancy1.
Samson Philippe	Elf-Aquitaine.

### Etudiants de DEA ayant réalisé leur travail de recherche au CRPG en 1995

Branquet Yannick	Thèse INPL.
Garinet Emmanuelle	IFP.
Lopes Benoit	Service National en Coopération en Arabie Saoudite.
Pairazian Karen	Thèse INPL.
Perruchot Marie-Pascale	IFP.
Richard Denis	Service National.
Roumet Catherine	CDI Cristalleries DAUM.
Tissandier Laurent	Service National.

### Etudiants de DEA ayant réalisé leur travail de recherche au CRPG en 1996

Basire Christophe	Service National en Coopération, ELF, Londres.
Cailly Frédéric	Service National.
Decitre Sylvie	Thèse INPL.
Georges Peggy	Thèse UHP-Nancy1.
Lecour Magali	Thèse INPL.
Pierson-Wickmann Anne-Cath.	Thèse INPL.
Rollion Claire	Thèse INPL.
Seconds David	Thèse IFP.

**H - Rayonnement**



## Au plan local

### **Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL)**

Conseil d'Administration de l'Institut National Polytechnique de Lorraine  
Membres élus : *Bernard Charoy*  
*Christian Marignac*  
En tant qu'invités : *John Ludden* (Directeur du CRPG)  
*Jean Macaudière* (Directeur des études ENSG)  
*Bernard Marty* (Directeur du Laboratoire GEO3  
de l'ENSG)

### **Université Henri Poincaré - Nancy 1 (UHP-Nancy1)**

Responsable «Jeune Equipe» JE249 et co-responsable du DEA "Physique et chimie de la Terre" :  
*Pierre Barbey*  
Membres du Conseil du département des Sciences de la Terre :  
*Pierre Barbey* (directeur-adjoint )  
*Françoise Chalot-Prat*  
*Guy Libourel*  
Membre du Conseil d'Administration de L'UFR STMP (UHP-Nancy1)  
*Guy Libourel*

### **Délégation Régionale Nord- Est du CNRS**

Interface avec le service «Formation Permanente» :  
*Jean-Louis Zimmermann*

### **Institut Lorrain des Géosciences (ILG)**

Membres du Conseil Scientifique de l'Institut Lorrain des Géosciences  
Directeur : *John Ludden*  
Membres élus : *Maryse Ohnenstetter*  
*Alain Ploquin*  
*François Lhote* (suppléant)  
*Jean-Jacques Royer* (suppléant)  
*Jean Laurent Mallet* (mandat ENSG)  
*Bernard Marty* (mandat ENSG)  
*Alain Cheilletz* (suppléant ENSG)  
*Christian Marignac* (mandat EMN)  
*Pierre Barbey* (mandat UHP-Nancy1)  
Responsable «Animation Scientifique»:  
*Marc Chaussidon*  
Responsable du Bulletin d'information interne de l'ILG :  
*Michel Champenois*

### **Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG)**

Conseil d'Administration de l'ENSG  
En tant qu'invités : *John Ludden* (Directeur du CRPG)  
*Jean Macaudière* (Directeur des études ENSG)  
*Bernard Marty* (Directeur du Laboratoire  
GEO3 de l'ENSG)  
Membre du Comité de rédaction du Bulletin d'information interne de  
l'ENSG : *Dominique Gasquet*

### **Ecole des Mines de Nancy (EMN)**

Membre du Conseil d'Administration de l'Ecole des Mines de Nancy  
(EMN) : *Christian Marignac*

## Au plan national

- CNRS** Représentante de l'Administration à la CAP 8 du CNRS :  
*Anne-Marie Boullier*
- Membres élus à la Section 11 du Comité National de la Recherche Scientifique (fin du mandat en 1995) :  
*Christian Marignac*  
*Maryse Ohnenstetter*
- Membre élu à la Section 13 du Comité National de la Recherche Scientifique :  
*Etienne Deloule* (secrétaire de la section)
- INSU** Membre du groupe «Géochimie» de la commission d'équipement mi-lourd :  
*Christian France-Lanord*
- Membre du comité de rédaction «Prospectives en Sciences de la Terre»  
*John Ludden*
- Membre du comité "Géosciences Marines"  
*Bernard Marty*
- Enseignement Supérieur et Recherche** Membre élu à la section 35 du Conseil National des Universités (jusqu'en 1995), puis nommé pour la même section :  
*Alain Cheilletz*
- Membres des Commissions de Spécialistes :
- Sections 35 et 36 - Université de Franche Comté, Besançon :  
*Alain Cheilletz*
- Sections 35 et 36 - INPL :  
*Dominique Gasquet*
- Sections 35 et 36 - UHP Nancy 1 :  
*Pierre Barbey*  
*Françoise Chalot-Prat* (vice-présidente de la commission)  
*Christian Marignac*
- Sections 35 et 36 -ENSG :  
*Bernard Marty*
- Section 35 - 36 Université de Clermont-Ferrand:  
*Christian Marignac*
- Ocean Drilling Program** Membres du Conseil Scientifique ODP-France :  
*Christian France-Lanord*  
*John Ludden*
- Autres** Président du Comité IFREMER-évaluation des programmes de forages océaniques :  
*John Ludden*
- Expert pétrologue pour les sondages du site de stockage de la Vienne, projet ANDRA/CREGU-CRPG :  
*Jean-Marc Stussi*

## Au plan international

### Fonctions dans des organismes internationaux

Membre du Conseil Scientifique de la sonde ionique d'Edinburgh (NERC)	<i>Marc Chaussidon</i>
Représentant français au panel schématique «Sediment and Geochemical Processes» de ODP	<i>Christian France-Lanord</i>
Président du panel «Lithosphère» de ODP ESF Future of Scientific Ocean Drilling Europe - Cochair.	<i>John Ludden</i>
Directeur du groupe de Recherche Géosonde (Univ. Montréal/Ecole Polytechnique de Montréal)	
Membre Comm. on Igneous and Metamorphic Petrology, IUG Directeur du projet Abitibi-Grenville, Lithoprobe Directeur du Consortium International GOCAD	<i>Jean Laurent Mallet</i>

### Participation aux Comités d'organisation de Colloques Internationaux

Colloque PSS «Procédés de Solidification et de Stabilisation des Déchets» (Nancy, 1995)	<i>Guy Libourel</i>
Co-président de la Conférence Precambrian'95 (Montréal)	<i>John Ludden</i>
Organisation bi-annuelle du «GOCAD Meeting» à Nancy (1995 et 1996), à Houston (1995)	<i>Christian Le Carlier</i> <i>Pierre Jacquemin</i> <i>Jean-Laurent Mallet</i> <i>Jean-Jacques Royer</i>
European Union of Geosciences <sup>8</sup> (1995)	<i>Bernard Marty</i>
Third Informal Colloque on Stable Isotopes, CRPG, Nancy, 1996	<i>Christian France-Lanord</i>

### Distinctions

Médaille Houtermans attribuée par l'Association Européenne de Géochimie (1995) à un brillant jeune géochimiste européen	<i>Marc Chaussidon</i>
Médaille de bronze du CNRS (1995)	<i>Guy Libourel</i>
Prix Science et Application de l'Association Professionnelle des Géologues et des Géophysiciens du Québec	<i>John Ludden</i>

### Editions

Editorial board Precambrian Research	<i>John Ludden</i>
Editeur d'un volume spécial «Mafic magmatism through time» Chemical Geology et Lithos	
Editeur d'un volume spécial «The Earth's changing tectonic regime in the Archean», Precambrian Research	
Co-éditeur des actes du congrès «Third Codata on Geomathematics and Geostatistics», Enschede (NL)	<i>Jean-Jacques Royer</i>
Editeur d'un volume spécial «Environmental issues, micro and macro data modelling»	

## Conférences «Grand Public»

- Marc Chaussidon* «Les météorites» à l'occasion du Festival du film scientifique de Nancy à la suite de la projection du film de Michel Morette «Poussières d'étoiles».
- «Datation en archéologie, en géologie et en astrophysique» à l'occasion du Centenaire de la radioactivité dans un lycée de la banlieue lilloise et à l'Ecole des Arts et Métiers de Chalons sur Marne.
- Alain Cheilletz* «Les minéraux du monde» à l'occasion d'une exposition de minéraux à Gondreville (54) organisée par l'ILG.
- Christian France-Lanord* «L'érosion de l'Himalaya» au Pôle de l'Image à Nancy dans le cycle de conférences organisées par le Service Communication de la Délégation Régionale Nord-Est du CNRS
- Bernard Marty* «La saga des éléments», conférence inter-écoles organisée par l'INPL

## Articles dans des organes de presse grand public

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| <i>Marc Chaussidon</i>         | Est Républicain<br>Sciences et Avenir<br>Le Monde                                    |
| <i>Etienne Deloule</i>         | Est Républicain  |
| <i>Christian France-Lanord</i> | Est Républicain  |
| <i>Guy Libourel</i>            | Industrie et Techniques<br>Est Républicain<br>La Recherche                           |
| <i>John Ludden</i>             | New York Times<br>Toronto Globe and Mail<br>Canadian Geographic<br>Macleans Magazine |
| <i>Jean-Laurent Mallet</i>     | Est Républicain  |

## Autres manifestations

- Alain Ploquin* La Science en fête (1995 et 1996) : sur la paléométallurgie à l'occasion de l'ouverture au public de sites anciens
- Reconstitution publique de bas-fourneaux à l'Archéodrome de Beaune (21) et à Neuves Maisons (54).
- Emission de télévision pour la 5 dans la série «Allo, la Terre»
- Alain Cheilletz* Passion Recherche (Action CNRS) : participation à la réalisation d'un didacticiel par des élèves de 1ère S du lycée Poincaré de Nancy, au sujet de la «tectonique des plaques» et des roches constitutives de la croûte océanique.
- Michel Champenois*
- Daniel Ohnenstetter*
- Jean-Marc Stussi*

**Revue de presse**

# nature

INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE

Volume 352, Number 9144, 1995, 24.00 £/Fr44 DM19 Lire 18000

## Meteorite record of light-element synthesis



Consequences of imperfect re-equilibration of the Mesozoic without an...  
A cell adhesion...

Cell Biology  
PRODUCT REVIEW

### Nucleosynthesis of $^{11}\text{B}$ -rich boron in the pre-solar cloud recorded in meteoritic chondrules

Marc Chaussidon\* & François Robert†

\* CRPG-CNRS, BP 20, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy, France  
† Muséum National d'Histoire Naturelle, 61 rue Buffon, 75015 Paris, France

MODELS of the chemical evolution of the Galaxy, in which most elements are created inside stars and distributed by stellar winds and supernovae, cannot produce the observed abundances of boron and beryllium<sup>1</sup>. These elements have been produced continuously since the Big Bang by collisions between Galactic cosmic rays (very energetic protons and  $\alpha$ -particles) and heavier elements, such as carbon and oxygen, in the interstellar medium<sup>2,4</sup>. But models of chemical evolution that include these effects predict a boron isotope ratio ( $^{11}\text{B}/^{10}\text{B} = 2.5$ , ref. 2) that is very different from that observed on Earth and in meteorites ( $^{11}\text{B}/^{10}\text{B} \approx 4.0$ , refs 7-9). Here we present ion-probe measurements of the  $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$  ratio in meteoritic chondrules, which reveal significant variations (3.84-4.25) correlated with the beryllium and boron concentrations. These correlations can be explained by production of  $^{11}\text{B}$ -rich boron in the pre-solar cloud, resulting from collisions between interstellar hydrogen (and helium) and low-energy cosmic rays<sup>10</sup> such as the carbon and oxygen nuclei recently observed in the Orion star-forming complex<sup>11</sup>. Our results also suggest that isotopic heterogeneities have been partially preserved during the process of chondrule formation.



Macmillan Magazines Ltd

◀ Ion-probe measurements of boron isotopes in meteoritic chondrules reveal variations that can be explained by the occurrence of a previously hypothetical nucleosynthetic process in the molecular cloud that predated the Solar System. Cover shows an olivine barred chondrule from the Allende meteorite made of olivine crystals in a glassy matrix. Gold coating deposited for ion-probe analysis can be seen in the cracks (yellow), and the ion-probe analytical spots (20  $\mu\text{m}$  diameter) are still visible. Page 337.

## Archaean subduction Inferred from seismic images of a mantle suture in the Superior Province

A. J. Calvert\*, E. W. Sawyer†, W. J. Davis‡§  
& J. N. Ludden||§

\* Département de Génie Minéral, Ecole Polytechnique, CP 6079, succ. centre-ville, Montréal, Québec H3C 3A7, Canada  
† Département des Sciences Appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec G7H 2B1, Canada  
‡ GEOTOP, Université du Québec à Montréal, CP 6888, succ. centre-ville, Montréal, Québec H3C 3P8, Canada  
§ Département de Géologie, Université de Montréal, CP 6128, succ. centre-ville, Montréal, Québec H3C 3J7, Canada

PLATE tectonics provides the basis for the interpretation of most current terrestrial tectonic activity, and is widely accepted as having been active over much of the Earth's history<sup>1</sup>. Yet the timing of initiation of this process is subject to debate<sup>2,3</sup>. So far, the earliest seismic evidence for plate tectonics has come from a fossil mantle suture in the Svecofennian orogen (1.89 Gyr ago)<sup>10</sup> and

§ Present addresses: Geological Survey of Canada, 601 Booth Street, Ottawa, Ontario K1A 0E8, Canada (W.J.D.); Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, 15 Rue Notre Dame des Pauvres, 54401 Vandœuvre-lès-Nancy, BP 20 Cedex, France (J.N.L.).

NATURE · VOL 375 · 22 JUNE 1995

## Nitrogen content of the mantle Inferred from N<sub>2</sub>-Ar correlation in oceanic basalts

Bernard Marty

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Centre National de la Recherche Scientifique, Rue Notre-Dame des Pauvres, BP 20, 54501 Vandœuvre Cedex, France  
École Nationale Supérieure de Géologie, 94 Avenue De Lattre de Tassigny, 54001 Nancy Cedex, France

RARE gases have proved to be particularly useful in modelling the early evolution of the Earth's atmosphere<sup>1-3</sup>. But it is not straightforward to extend this approach to the main volatile species (such as hydrogen, carbon and nitrogen) that comprise the atmosphere, hydrosphere and sediments, as these elements are chemically reactive and may have experienced different geodynamic histories. A way around this problem is to calibrate major volatile species relative to rare gases<sup>4-8</sup>. Here I use a recently developed static mass spectrometry method that allows simultaneous analysis of nitrogen, carbon, helium and argon<sup>9</sup> to analyse gases trapped in vesicles of mid-ocean-ridge basalt glasses. The results show that the abundances of N<sub>2</sub> and <sup>40</sup>Ar (a radiogenic isotope that has been produced through geological time by the decay of <sup>40</sup>K in the solid Earth) correlate well over several orders of magnitude, suggesting that the N<sub>2</sub>/<sup>40</sup>Ar ratio in the mantle source is near-constant and comparable to the present-day atmospheric value. In contrast, the inferred mantle N<sub>2</sub>/<sup>36</sup>Ar ratio (where <sup>36</sup>Ar is a primordial isotope of argon) is two orders of magnitude higher than the atmospheric ratio. This observation, when combined with argon isotope systematics, allows a better estimate to be made of the nitrogen content of the mantle.

# nature

INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE

## Longevity of sub-continental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs

L. Reilberg\* & J.-P. Lorand†

\* Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG/CNRS), BP 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy, France  
† Laboratoire de Mineralogie, URA CNRS 716, 61 Rue Buffon, Muséum National d'Histoire Naturelle, 75005 Paris, France

ATTEMPTS to understand the formation and evolution of the sub-continental lithospheric mantle (SCLM) have been hampered by the absence of reliable time constraints, reflecting a lack of appropriate isotopic dating techniques. The most commonly used methods, involving strontium, neodymium and lead isotopes, yield ambiguous results in mantle rocks, and show no relationship with magmatic processes, as the low concentrations of these elements make them susceptible to later metasomatic disturbance. Osmium, by contrast, is much more abundant in the mantle than in the crust<sup>1</sup>, so that peridotite Os isotope ratios are largely immune to recent metasomatic imprints. This provides a way to date the magmatic processes that determine mantle major-element compositions<sup>2</sup>. We present here two examples of striking correlations between <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration in orogenic peridotites, and argue that these can be used to date the differentiation of the SCLM. The old ages obtained agree with associated lower-crustal Nd model ages<sup>3,4</sup>, and indicate that—in these post-Archaean terrains as well as in Archaean cratons<sup>2,4,7</sup>—SCLM can remain isolated from the convecting mantle for more than a billion years.

# nature

INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE

volume 100  
number B7  
JULY 10, 1995

## Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting

François Robert

Geological Survey of Canada, Ottawa, Ontario

Anne-Marie Boullier and Karima Firdaus

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, CNRS, Vandœuvre-lès-Nancy, France

**Abstract.** Gold-quartz vein fields in metamorphic terranes such as greenstone belts provide evidence for the involvement of large volumes of fluids during faulting and may be products of seismic processes near the base of the seismogenic regime. In the Val d'Or district of the Abitibi greenstone belt, Canada, quartz-tourmaline-carbonate veins form a vein field (30 x 15 km) in the hanging wall of a crustal-scale fault zone, which was the main channelway for upward migration of the deeply generated fluids. The veins occur in small high-angle reverse faults and in adjacent horizontal extensional fractures extending up to 75 m in intact rocks. They have formed incrementally during active reverse faulting in response to crustal shortening, at depths corresponding to those at the base of the seismogenic zone in actively deforming crust. Detailed structural and fluid inclusion studies provide evidence for generally lithostatic but fluctuating fluid pressures ( $\Delta P_f$  of the order of 200 MPa) and for cyclic stress reversals during vein formation and provide good support for the fault valve model. A comparison of vein characteristics with "standard" earthquake rupture parameters suggests that each slip increment along veins in reverse faults was accompanied by a small earthquake ( $4 > M > 3$  or less). The large vein field thus represents both the extent of fluid dispersion in the hanging wall of a crustal-scale channelway and the distribution of small earthquakes integrated over the lifetime of the hydrothermal system. It is proposed that such small earthquakes along veins in reverse faults are related to large earthquakes ( $M > 6$ ) nucleating near the base of the seismogenic regime along the nearby crustal-scale fault, either as aftershocks or as a precursor smarm.

# U G R

DANIELE L. PINTI\*<sup>1</sup> and BERNARD MARTY<sup>1</sup>

Laboratoire MAGIE, Université Pierre et Marie Curie, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

(Received October 25, 1994; accepted in revised form April 27, 1995)

# Geochimica et Cosmochimica Acta

JOURNAL OF THE GEOCHEMICAL SOCIETY AND THE METEORITICAL SOCIETY

B. CHAROY<sup>1</sup>\* AND F. NORONHA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ENSG AND CRPG-CNRS, BP 20, 54501 VANDOEUVRE-LES-NANCY CEDEX, FRANCE  
<sup>2</sup>CENTRO DE GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, PORTO, PORTUGAL

**Abstract**—In order to investigate the potential of noble gases to trace the dynamics of oil reservoirs, we have analysed the abundance and isotopic composition of all noble gases (He, Ne, Ar, Kr, and Xe) in crude oils from the Paris Basin, France, using a new extraction and purification procedure. The main oil reservoirs are presently located in the Jurassic (Dogger) limestone and in the Triassic (Keuper) sandstone, but hydrocarbons originated from a common source rock formation located in the interbedded Liassic sequence. Despite this common origin, the abundance and isotopic ratios of the noble gases differ between the Dogger and the Keuper.

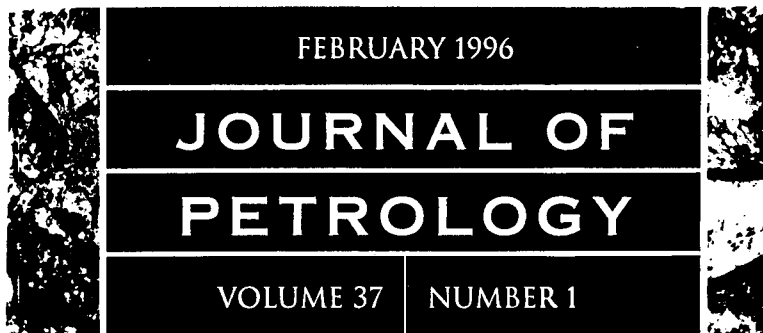
The isotopic compositions of Kr and Xe are indistinguishable from that of air. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios, higher than those predicted from radiogenic production in the sediments or in the crust, are attributed to the occurrence of mantle-derived <sup>3</sup>He in the basin. Each sedimentary sequence is characterised by well defined and homogeneous <sup>21</sup>Ne/<sup>22</sup>Ne and <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratios, which average 0.0306 ± 0.0008 and 312 ± 10 for the Dogger and 0.0367 ± 0.0012 and 664 ± 30 for the Keuper, respectively. The main source of radiogenic noble gases appears to be the continental crust underlying the basin, with possible regional contributions of noble gas isotopes produced in the sediments. The helium and argon isotopic ratios of the Dogger oils are very similar to those observed in geothermal waters flowing in the Dogger aquifer throughout the basin, demonstrating that noble gases in oils derive from associated groundwaters. Oil reservoirs in the Paris Basin therefore accumulate noble gases from wide regions of the continental crust through cross-formational flow of groundwaters and subsequent partitioning into oil. This observation implies that noble gases cannot be directly used to date oils, but can provide time constraints if (1) water/oil interactions are quantified and (2) the residence time as well as the noble gas characteristics of associated groundwaters are known.

Oil-water-gas partitioning processes are well recorded in the fractionation of noble gas elemental abundance. Two distinct processes have been identified: (1) accumulation of atmosphere-derived (ANG) and radiogenic noble gases both initially dissolved in groundwaters, resulting in a positive correlation between absolute amount of ANG and the extent of heavy noble gas fractionation and (2) subsequent fractional degassing, resulting in a negative correlation between ANG abundance and heavy noble gas fractionation. Degassing is particularly evident for the Keuper oils and might have occurred in the reservoirs following hydrodynamic gas stripping. The ANG abundance in the Dogger reservoirs requires that about one order of magnitude more water than presently observed has interacted with the oil. Given current estimates of the residence time for groundwaters in the Dogger aquifer, the duration of oil-water interaction is in qualitative agreement with a Palaeocene-Oligocene age for the major episode of secondary oil migration in the Paris Basin. High xenon contents in Keuper reservoirs suggest that they have experienced hydrodynamic interactions between flowing waters and oils for long time, and that the Trias might have reached hydrostatic condition only recently.

## Multistage Growth of a Rare-Element, Volatile-Rich Microgranite at Argemela (Portugal)

The small Argemela microgranite body in central Portugal displays many of the mineralogical and chemical features characteristic of peraluminous, Li, P-rich, rare-element pegmatites. Its mineralogy consists predominantly of quartz, albite, white mica (partly replaced by lepidolite) and a phosphate of the amblygonite series. K-feldspar is noticeably absent or scarce. Cassiterite, beryl and columbite are the main accessories. The microgranite shows extreme enrichment in incompatible elements such as F, P, Rb, Cs, Li, Sn and Be, and extreme depletion in Sr, Ba, Zr and REE. It is highly sodic and strongly peraluminous. The microgranite overall is interpreted as a mixture of two components: a crystal mush injected from below (seen in narrow dykes intersected during drilling, composed of quartz, albite and phengite) and interpreted as 'feeders', overprinted by a second highly evolved component dominated by Li, F, P (Rb, Cs, Be, Sn, Nb, Ta, etc.) considered as a 'lubricant' medium for the ascending mush and occasionally quenched (quartz, albite, skeletal lepidolite and amblygonite). This second component has the mineralogical and chemical characteristics of rare-element pegmatites. All these petrological characteristics are magmatic. Only a few narrow cross-cutting veinlets with quartz, K-feldspar and F-poor amblygonite are considered as fluid derived. A model of crystallization in successive steps is proposed where concentration in fluxing agents (F, Li, P, etc.) is progressively enhanced up to saturation with the crystallization of magmatic lepidolite and amblygonite.

KEY WORDS: petrogenesis; microgranite; pegmatite; volatiles; Portugal



## Neogene Himalayan weathering history and river <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr: impact on the marine Sr record

Louis A. Derry<sup>a,b,\*</sup>, Christian France-Lanord<sup>b,1</sup>

<sup>a</sup>Cornell University, Department of Geological Sciences, Ithaca, NY 14853, USA

<sup>b</sup>Centre de Recherches Pérographiques et Géochimiques — CNRS, B.P. 20, 54501 Vandoeuvre-les-Nancy, France

Received 1 July 1995; accepted 26 April 1996

### Abstract

Clastic sediments in the Bengal Fan contain a Neogene history of erosion and weathering of the Himalaya. We present data on clay mineralogy, major element, stable and radiogenic isotope abundances from Lower Miocene–Pleistocene sediments from ODP Leg 116. Nd and Sr isotope data show that the Himalayan provenance for the eroded material has varied little since > 17 Ma. However, from 7 to 1 Ma smectite replaces illite as the dominant clay, while sediment accumulation decreased, implying an interval of high chemical weathering intensity but lower physical erosion rates in the Ganges–Brahmaputra (GB) basin. O and H isotopes in clays are correlated with mineralogy and chemistry, and indicate that weathering took place in the paleo-Gangetic flood plain. The <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios of pedogenic clays (vermiculite, smectite) record the isotopic composition of Sr in the weathering environment, and can be used as a proxy for <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr in the paleo-GB basin. The Sr data from pedogenic clays shows that river <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr values were near 0.72 prior to 7 Ma, rose rapidly to ≥ 0.74 in the Pliocene, and returned to ≤ 0.72 in the middle Pleistocene. These are the first direct constraints available on the temporal variability of <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr in a major river system. The high <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr values resulted from intensified chemical weathering of radiogenic silicates and a shift in the carbonate–silicate weathering ratio. Modeling of the seawater Sr isotopic budget shows that the high river <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr values require a ca. 50% decrease in the Sr flux from the GB system in the Pliocene. The relationship between weathering intensity, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr and Sr flux is similar to that observed in modern rivers, and implies that fluxes of other elements such as Ca, Na and Si were also reduced. Increased weathering intensity but reduced Sr flux appears to require a late Miocene–Pliocene decrease in Himalayan erosion rates, followed by a return to physically dominated and rapid erosion in the Pleistocene. In contrast to the view that increasing seawater <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr results from increased erosion, Mio–Pliocene to mid-Pleistocene changes in the seawater Sr budget were the result of reduced erosion rates and Sr fluxes from the Himalaya.

Keywords: Himalayas; ODP Site 717; ODP Site 718; Sr-87/Sr-86; Neogene; clay mineralogy; weathering

## EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS

29 JUL 1996



# LITHOS

## Melting and undercooled crystallisation of felsic xenoliths from minor intrusions (Jebilet massif, Morocco)

J. Bouloton\*, D. Gasquet<sup>b</sup>

\*Département de Géologie et URA 10 CNRS, Université Blaise Pascal, 5 rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex, France  
<sup>b</sup>CRPG-CNRS, BP 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy and Ecole Nationale Supérieure de Géologie, BP 452, 54001 Nancy Cedex, France

Received 6 July 1993; revised and accepted 1 November 1994

PALEOCEANOGRAPHY, VOL. 11, NO. 3, PAGES 267-275, J

### Neogene growth of the sedimentary organic carbon reservoir

Louis A. Derry

Department of Geological Sciences, Cornell University, Ithaca, New York

Christian France-Lanord

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Vandœuvre-lès-Nancy, France

**Abstract.** We develop a recycling model using <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C mass balance for net growth/loss of the sedimentary organic carbon (C<sub>org</sub>) reservoir, and apply it to the Neogene bulk marine carbonate δ<sup>13</sup>C record. The model allows for variations in photosynthetic fractionation factors, carbon cycling rates, and the isotopic composition of riverine carbon inputs to the oceans. The sign of the net flux term is controlled by the difference between fractional C<sub>org</sub> burial and fractional C<sub>org</sub> weathering, independent of any variations in carbon cycling rate. These terms are in turn estimated from the carbon isotope mass balance of newly deposited and weathered sediments, respectively. The magnitude of the net flux is sensitive to the global carbon cycling (erosion/deposition) rate, which may be estimated by the use of the records of radiogenic isotopic variations (Nd, Sr) in paleoseawater. A key observation and input to the model is that photosynthetic carbon isotope fractionation by both marine algae and terrestrial plants has decreased during the Cenozoic. Incorporating time-dependent carbon isotope fractionation into the model shows that the sedimentary C<sub>org</sub> reservoir has grown throughout most of the Neogene, even as marine δ<sup>13</sup>C values fell after 14 Ma. A similar result is obtained if the variation in the marine δ<sup>13</sup>C record is largely caused by changes in the carbon isotopic composition of river fluxes to the oceans, rather than changes in the organic/inorganic ratio of output to the burial sink. The growth of the sedimentary organic carbon reservoir requires that the Neogene sedimentary carbon cycle was a net source of O<sub>2</sub> and a net sink of CO<sub>2</sub> to the atmosphere, at least until the Plio-Pleistocene. As a consequence, Neogene CO<sub>2</sub> consumption by silicate weathering cannot be balanced by oxidation of sedimentary C<sub>org</sub>, placing a significant constraint on global carbon balance models. A related prediction of our model is that atmospheric O<sub>2</sub> levels rose during the Neogene.

Daniel Ohnenstetter · William L. Brown

### Compositional variation and primary water contents of differentiated interstitial and included glasses in boninites

Received: 19 December 1994 / Accepted: 5 October 1995

**Abstract.** Interstitial glasses and glasses in small inclusions in Mg-rich phenocrysts of 14 boninites from New Caledonia, the Mariana Trench, Cape Vogel and Chichi-jima were analysed by electron microprobe and the water contents measured in situ by ion microprobe. The glasses are remarkably fresh and abundant (~30–90 vol.%), and the phenocrysts are often skeletal with glass inclusions. Broad-beam analyses (~1030) of interstitial glasses and ~180 point analyses of glass inclusions were carried out, as well as ~100 hydrogen analyses. Most glasses have low water-free totals, high water contents, very low MgO, and low total iron; they are almost entirely quartzofeldspathic and with few exceptions (Q+or+ab+an+C) lies in the range 83–96. The interstitial glasses from New Caledonia, the Marianas and most of the glasses from Chichi-jima are dacitic, those from Cape Vogel straddle dacitic and andesitic compositions, whereas the glasses in a highly glassy sample from Chichi-jima are high-Mg andesitic or boninitic with up to ~9 wt% MgO, and arc, with the exception of a few high-Ca boninites from Tonga, the most Mg-rich interstitial glasses so far described in boninites. Glasses included in orthopyroxene, olivine or clinopyroxene are boninitic or high-Mg andesitic in the highly glassy rock and dacitic to high-silica dacitic in the others. They are in general slightly more differentiated than the interstitial glasses, because of more-extensive crystallization on the host crystal in small inclusions. The interstitial glass compositions show a direct relationship between silica and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and, for most glasses, alkalis, and inverse relationships between silica and CaO, FeO and MgO; alkalis and TiO<sub>2</sub> show, however, a broad spread in values in glasses from the Marianas and New Caledonia. Included glasses show similar variations. Water contents in interstitial glasses are ~2 wt% for the highly glassy high-Mg andesitic

glasses from Chichi-jima, ~5.4 wt% for the more differentiated andesitic to dacitic glasses from Cape Vogel, and ~6.7–7.0 wt% in the most differentiated dacitic ones from the Marianas and New Caledonia. Water contents in glass inclusions in olivine, orthopyroxene and clinopyroxene are in the range ~1.9–3.3 wt%. The interstitial glasses are black and not vesicular, showing that the liquids did not reach supersaturation after eruption on or intrusion near the sea floor, or were insufficiently so to allow nucleation of water vapour bubbles. The water is inferred to be primary and to increase strongly with crystallization in the residual liquid down to the glass-transition T.

### Abstract

Granitic and gneissic xenoliths within microdiorite dykes from the Palaeozoic Jebilet massif (Morocco) contain up to 40% of granophyric intergrowths that occur as films along quartz-feldspar contacts and form an interconnected grain boundary network. The composition of the feldspar megacrysts — i.e. large embayed crystals surrounded by the granophyric intergrowths — implies high-temperature crystallisation ( $T > 900^{\circ}\text{C}$ ) and the sieve-texture (or finger-print texture) indicates that these crystals underwent incipient melting. Moreover, the microstructural position and bulk composition of the granophyre are similar to that of glass in partly molten felsic xenoliths from lavas or pyroclastics. It is argued that the granophyre originated after partial melting of the xenoliths when incorporated into the dioritic magma. Crystallisation of that melt resulted in most cases in the formation of vermicular and/or cuneiform granophyre, which testifies to moderate degrees of undercooling. A few occurrences of plumose granophyre, i.e. very thin intergrowths that are close to quartz-bearing spherulites, indicate that some xenoliths crystallised at higher degrees of undercooling.

Together with granophyric xenoliths, a number of microgranular inclusions also occur. These are characterized by phenocrysts of quartz and feldspar in a microgranular groundmass. Finger-print texture in feldspar suggests that these inclusions, like the granophyric xenoliths, underwent ultra-metamorphism and melting. The microgranular groundmass is most probably indicative of crystallisation at lower degrees of undercooling, but the relationships between the two types of xenoliths still remain to be explored in detail.

Precambrian Research

### Mechanisms of pluton emplacement and structural evolution of a 2.1 Ga juvenile continental crust: the Birimian of southwestern Niger

J. Pons\*, P. Barbey\*, D. Dupuis\*, J.M. Léger\*

\*Laboratoire de Géologie Structurale, URA 1166, Université d'Orléans, BP 6759, 45067 Orléans Cedex, France

\*Laboratoire de Pétrologie, Université de Nancy I, BP 239, 54506 Vandœuvre Cedex, France

\*Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université de Niamey, BP 10662 Niamey, Niger

Received 10 June 1993; revised version accepted 15 June 1994

### Abstract

The 2.1 Ga Birimian terranes of southwestern Niger consist of a granite-greenstone association. The structures of the greenstone belts result from the interference between pluton emplacement and regional transcurrent deformation (sinistral N-S strike-slip faults, NE-SW-trending schistosity). The regional cleavage trend is observed to change in the vicinity of elliptical plutons: cleavage trajectories bend around their contacts resulting in triple junctions at the pluton extremities, and narrow aureoles of intense penetrative schistosity and high-grade amphibolite-facies metamorphism are developed around them. Structural features of plutons suggest syn-tectonic emplacement and age data indicate that all plutons were emplaced between 2.16 and 2.10 Ga. The plutons are assembled in two distinct types of batholith elongated either parallel or perpendicular to the inferred regional shortening direction.

A batholith parallel to the inferred regional shortening direction (Doibet batholith) consists of km-sized subcircular alkali-granite plutons, except for the southernmost one which is of a larger size and exhibits an elliptical shape with a NW-SE short axis parallel to the shortening direction. Crosscutting relationships indicate a progressively northward emplacement trend for those plutons. Internal fabrics generally correspond to layering and magmatic flow fabrics, and, accessorially, to schistosity and shear zones which represent late stage plastic deformation restricted to the pluton margin. Batholiths which are perpendicular to the inferred regional shortening direction are composed of large elliptical plutons (500 to 5000 km<sup>2</sup> in area) consisting mainly of granodioritic, and covering 70% of the region. The plutons never show crosscutting relationships but are moulded against each other. Their internal fabric corresponds to a solid-state foliation. It either dips towards the centre of the pluton (funnel or teardrop-shaped intrusions), or is subhorizontal in the centre and vertical at the margin (dome-shaped intrusions). The foliation and the geometry of the largest pluton (Tera pluton) were acquired during pluton ascent and inflation, whereas the geometry of later shear zones indicates that deformation in the pluton was then "passively" acquired at the final emplacement level, due to regional deformation.

The contrast in both the orientation and structural features of the batholiths reflects distinct emplacement mechanisms: the small alkali-granite plutons resulted from magma injection within NW-SE fractures parallel to the inferred regional shortening direction, whereas the granodioritic plutons are assumed to be emplaced as diapirs (forceful intrusions with long axes perpendicular to the shortening direction). These two intrusion mechanisms for plutons emplaced during the same deformation event and at the same crustal level, are considered to reflect a local change in the rheological behaviour of the crustal segment studied, in connection with the thermal effect induced by the large granodioritic plutons. This vertical tectonic regime appears to be typical of Palaeoproterozoic

Mineralogy and Petrology

# European Journal of Mineralogy

## Temperature of paleo- to modern self-sealing within a continental rift basin: The fluid inclusion data (Soultz-sous-Forêts, Rhine graben, France)

MICHEL DUBOIS<sup>(1,2\*)</sup>, MOHAMED AYT OUGOUGDAL<sup>(2)</sup>, PATRICK MEERE<sup>(3, \*\*)</sup>,  
JEAN-JACQUES ROYER<sup>(1)</sup>, MARIE-CHRISTINE BOIRON<sup>(2)</sup>  
and MICHEL CATHELINÉAU<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> C.R.P.G. - C.N.R.S., B.P. 20, F-54501 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France  
(\* Present address: Univ. de Lille I, Sédimentologie et Géodynamique,  
Bât. SN5, F-59655 Villeneuve d'Ascq, France)

<sup>(2)</sup> C.R.E.G.U. and GS C.N.R.S.-C.R.E.G.U. n° 077, B.P. 23,  
F-54501 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France

<sup>(3)</sup> Department of Earth Sciences, University of Leeds, GB-Leeds, LS2 9JT, Great Britain,  
(\*\* Present address: Department of Geology, University College Cork, Cork, Ireland)

**Abstract:** Self-sealing of open microstructures and mesostructures characterizes evolving fluid flow in the sedimentary cover as well as in the granitic basement of the Rhine continental rift basin in the region of Soultz. This area currently experiences active fluid migration. A detailed petrographic and microthermometric study of paleo-fluids trapped as fluid inclusions in the structures (veins filled by quartz or barite, healed microfissures) and authigenic minerals (quartz overgrowths in sandstones, and euhedral quartz in altered granite plagioclases) reveals a succession of contrasting P-T-X conditions for self-sealing of the rocks. The data have been obtained from rock cores sampled at different depths along the Hot Dry Rock Soultz-sous-Forêts drillhole EPS-1, extending from the Triassic sandstone cover down to the granitic basement. Several stages of paleofluid trapping are distinguished as a function of the type of host mineral or microstructure.

The earliest fluid stage (probably late Hercynian) is mostly recorded in healed fissures (fluid inclusion planes) affecting the granite quartz grains, but also in some intragranitic early quartz-carbonate veinlets: i) rare CO<sub>2</sub>-(N<sub>2</sub>)-H<sub>2</sub>O fluids, ii) a succession of fluids of moderate salinity (2-7 wt% eq. NaCl) trapped under a large range of temperatures (minimum temperature of 180 to 340°C).

The second main stage of mineral crystallization corresponds to a more recent crystallization of quartz cement in sandstones, and of quartz-barite veins hosted by granite or sandstone. This stage is probably related to post-Oligocene fluid flows. Fluids trapped in these authigenic minerals display rather similar features to the modern brines (temperature in the range of 130 to 160°C, large range of salinity) encountered in drillholes of the area. The temperature-depth profile obtained from recent vein infillings is close to the profile measured after drilling, indicating a recent to active self-sealing, or a rather monotonous thermal regime during the latest fluid migration period. The large variations of salinities observed in some samples suggest a heterogeneous mixing process between low salinity fluids (less than 5 wt% eq. NaCl) and brines. Fluid inclusion data indicate a deep penetration of fluids equilibrated with sediments, and large scale fluid movements between the sedimentary cover and the basement.

**Key-words:** Rhine graben, self-sealing, paleofluids, geothermometry, fluid inclusions.

## An evaporitic origin of the parent brines of Colombian emeralds: fluid inclusion and sulphur isotope evidence

GASTON GIULIANI<sup>1,2\*</sup>, ALAIN CHEILLETZ<sup>2,3</sup>, CARLOS ARBOLEDA<sup>4</sup>,  
VICTOR CARRILLO<sup>4</sup>, FÉLIX RUEDA<sup>4</sup> and JAMES H. BAKER<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération,  
213 rue La Fayette, 75480 Paris cedex 10, France

<sup>2</sup> CRPG-CNRS, Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, BP 20,  
54501 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex, France

<sup>3</sup> ENSG-INPL, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, BP 452,  
54001 Nancy cedex, France

<sup>4</sup> MINERALCO S.A, calle 32, N°13-07, Apartado 17878, Bogotá, Colombia

<sup>5</sup> State University of Utrecht, Institute for Earth Sciences, PO Box 80.021,  
3508 TA Utrecht, The Netherlands

**Abstract:** The fluids trapped by emerald, dolomite and pyrite in the Colombian emerald deposits consist predominantly of Na-Ca brines with some KCl. The similarity of fluid composition in the eastern and western emerald zones demonstrates the homogeneity of the parent fluids. The Na-Ca-K chemistry of the brines provides strong evidence for an evaporitic origin of the parent hydrothermal fluids. Their origin was investigated by a sulphur isotopic study of pyrite that coprecipitated with emerald. The  $\delta^{34}\text{S}$  values of H<sub>2</sub>S in solution in equilibrium with pyrite from six emerald deposits range from 14.8 to 19.4‰ whereas sedimentary pyrite from the enclosing black shales yield a  $\delta^{34}\text{S}$  of -2.4‰. The narrow range in  $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyrite}}$  between the different deposits suggests a uniform and probably unique source for the sulphide-sulphur. The high  $\delta^{34}\text{S}$  values suggest the non-participation of magmatic or Early Cretaceous black-shale sulphur sources. Saline diapirs occur in the emeraldiferous areas and the most likely explanation for high  $\delta^{34}\text{S}$  involves the reduction of sedimentary marine evaporitic sulphates.

Fluid-inclusion and sulphur-isotope data give a typical evaporitic sedimentary signature for Colombian emerald mineralization. This emerald-deposit type, unique in the world, corresponds to mesothermal deposits (300°C), formed in a sedimentary environment and produced through thermochemical reduction of sulphate-rich brines to hydrogen sulphide by interaction with organic-rich strata.

**Key-words:** Colombia, emerald, pyrite, sulphur, isotopes, fluids, evaporites.



## The genesis of Colombian emeralds: a restatement

A. Cheillett<sup>1</sup>, G. Giuliani<sup>2, 1</sup>

<sup>1</sup> ENSG and CRPG-CNRS UPR 9046, BP 20, 54501, Vandoeuvre les Nancy Cedex, France  
<sup>2</sup> ORSTOM, Dpt TOA, UR 13, 213 rue La Fayette, 75 480, Paris Cedex 10, France

Received: 28 November 1995/Accepted: 20 March 1996

**Abstract.** A renewal of metallogenetic studies of Colombian emerald deposits produced new geological and geochemical data that favour a hydrothermal-sedimentary genetic model for these deposits. A comprehensive model is presented which integrates both chemical and structural aspects and invalidates some aspects of the model recently presented by Ottaway et al. The deposits result from a two-stage process in which shortening tectonics affect the two borders of the Eastern Cordillera of Colombia and provoke decollement planes, thrusting, and thrust-fault related folds in the Early Cretaceous black shale series. Three major descriptive and interpretative aspects of the deposits are presented: (1) time relationships between the two different sets of barren and mineralized extensional veins; (2) the association of graphite and emerald mineralization, and (3) the thermochemical sulfate reduction reaction acting at the site of the emerald deposits to reduce sulfate of evaporitic origin from the hydrothermal brines into hydrogen sulfide by interaction with organic-rich strata.

## Geochimica et Cosmochimica Acta

JOURNAL OF THE GEOCHEMICAL SOCIETY AND THE METEORITICAL SOCIETY

### Interstellar water in meteorites?

ETIENNE DELOULE<sup>1</sup> and FRANÇOIS ROBERT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CRPG-CNRS, 15 rue Notre-Dame des Pauvres, BP20, 54501 Vandoeuvre les Nancy Cedex, FRANCE

<sup>2</sup> Laboratoire de Minéralogie, CNRS-URA736, Muséum National d'Histoire Naturelle, 61 rue Buffon, 75005 Paris, FRANCE

(Received June 7, 1994; accepted in revised form August 9, 1995)

**Abstract**—D/H ratios of two meteorites (Renazzo CR and Semarkona LL3), which are known to exhibit the largest departures from the terrestrial hydrogen isotopic ratios, have been determined with the CRPG Nancy ion microprobe. Correlations between the D/H ratios and the chemical compositions (H<sub>2</sub>O, K, Si, C/H) of plausible hydrogen carriers were observed. From these correlations, it is possible to show that, contrary to previous interpretations, phyllosilicates are the carriers of the deuterium-rich hydrogen in Semarkona and Renazzo:  $870 \times 10^{-6} \leq \text{D/H} \leq 670 \times 10^{-6}$  ( $+4600 \leq \delta\text{D} \leq 3300\text{‰}$ ) and  $\approx 320 \times 10^{-6}$  ( $\delta\text{D} \approx 1050\text{‰}$ ), respectively. Hydrogen is also present in the chondrules of these two deuterium-rich meteorites. The large differences in D/H ratios between matrix (up to  $700 \times 10^{-6}$ ,  $\delta\text{D}$  up to  $+3500\text{‰}$ ) and chondrules (from  $120 \times 10^{-6}$  ( $\delta\text{D} = -230\text{‰}$ ) to  $230 \times 10^{-6}$  ( $\delta\text{D} = +475\text{‰}$ )) show that hydrogen in chondrules cannot originate from the matrix by simple contamination or diffusion processes.

The high D/H ratios measured in water-bearing minerals could not have been produced thermally within a dense solar nebula. Chemical reactions (i.e., involving ions or radicals), taking place in interstellar space or in the outer regions of the nebula at 110–140 K are presently the only conceivable mechanisms capable of yielding such isotopic enrichments. Water in these meteorites should no longer be considered as a simple product of nebular condensation under equilibrium thermodynamic conditions at  $T \approx 160$  K.

# A Nancy, des chercheurs tutoient les météorites

## Une équipe du CNRS vient de percer la dernière énigme de la nucléosynthèse, le phénomène qui, à partir du Big-Bang, a permis la naissance des éléments dans l'univers.

Si, sur terre, la roche a perdu ses caractéristiques originales au cours des 4,55 milliards d'années d'existence du système solaire, certaines météorites (les chondrites) n'ont pratiquement subi aucune modification géochimique depuis l'apparition des premiers solides. Ces objets primitifs, pour peu qu'ils puissent être retrouvés au hasard de leur chute sur terre, sont de véritables témoins d'un passé lointain.

En utilisant la sonde ionique nancéenne (un matériel qui permet d'analyser des compositions de l'ordre du micromètre), une équipe du CNRS vient ainsi de percer un problème sur lequel les scientifiques s'interrogeaient depuis plus de vingt ans.

En quatre ans de travail, Marc Chaussidon, du Centre de recherches pétrographique et géochimique de Nancy, et François Robert du Laboratoire de minéralogie (organisme commun du Mu-

séum d'histoire naturelle et du CNRS) ont réussi à compléter l'explication des réactions à l'origine de la naissance des différentes substances présentes dans l'univers.

### En dehors des étoiles

Au cœur de leurs recherches : les « bore 10 » et « bore 11 ». Ces isotopes figuraient avec le lithium et le béryllium au rang des quatre éléments chimiques dont l'apparition échappe aux deux mécanismes connus de la nucléosynthèse (des réactions nucléaires qui permettent aux noyaux atomiques de se combiner) : le cœur des étoiles et les effets du Big-Bang.

Dès le début des années 70, un troisième type de fabrication était avancé par des scientifiques : une collision à très grande vitesse de noyaux lourds du milieu interstellaire (carbone et oxygène) par des noyaux rapides qui constituent le rayonnement cosmi-

que (hydrogène et hélium). Bref, une naissance en dehors des étoiles, baptisée « spallation ».

Les calculs sur la base de ce scénario théorique concluaient alors à une proportion de « bore 10 » deux fois supérieure au « bore 11 ». Mais ces résultats étaient pris en défaut par la réalité (rapport de quatre observé sur terre). L'énigme, tenace, résistait.

Marc Chaussidon et François Robert explorant l'infiniment petit d'un fragment de météorite chondrite ont d'abord mis en évidence un même rapport de quatre dans l'objet extraterrestre. En clair : ils ont confirmé par une analyse irréfutable la naissance du bore en dehors des étoiles.

### Nébuleuse d'Orion

L'observation de la nébuleuse d'Orion par des Américains leur a apporté ensuite la

piste nécessaire pour résoudre le mystère persistant quant aux proportions de bore. Les astrophysiciens d'outre-Atlantique ont en effet conclu qu'il se produisait dans cette nébuleuse une « spallation » mais, cette fois, lors d'une collision d'atomes à basse énergie, laquelle produit davantage de « bore 11 ».

L'équipe du CNRS a pu confirmer le processus par ses travaux démontrant ainsi cette autre origine du bore : des « spallations » qui se produi-

sent dans un nuage interstellaire... du même type que celui qui a précédé la formation de notre système solaire ! La boucle est bouclée et la théorie de la nucléosynthèse complétée. « Nos recherches permettent d'établir que la fabrication des éléments observés a duré de 300.000 à 1,5 million d'années ». Ce qui correspond au temps qu'a pris la formation du système solaire dans la nébuleuse d'origine... Tout se rejoint.

Ghislain UTARD

### ASTROLOGIE

## Aux sources des briques de l'Univers

C'est toute la matière que nous connaissons est constituée, tel un gigantesque « Lego », d'une centaine de sortes de « briques » - les éléments chimiques de la table de Mendeleïv (oxygène, fer, plomb, etc.) - . L'origine de certaines d'entre elles restait énigmatique. Deux chercheurs français viennent d'éclaircir ce mystère.

Tous les éléments présents sur Terre (et ailleurs) ont été fabriqués soit au cœur des étoiles, par réactions nucléaires, soit, pour les plus légers (hydrogène et hélium), quelques minutes après le big bang. Tous, sauf trois qui résistaient à ces explications : le lithium, le béryllium et le bore, bien que légers, sont très instables et ne peuvent avoir été formés ni dans la nucléosynthèse primordiale (après le big bang), ni dans les étoiles. Alors, où et comment sont-ils nés ?

Une explication avait été proposée : ces éléments seraient nés de collisions entre les rayonnements cosmiques de grande énergie et de la matière interstellaire. Mais ces réactions, d'après les calculs, auraient dû produire 2,5 fois plus de bore 11 que de bore 10 (le bore 11 possède six neutrons, le bore 10, cinq). Or, sur terre, le bore 11 est 4 fois plus abondant que le bore 10. Cette explication n'était donc pas satisfaisante.

François Robert et Marc Chaussidon, du Muséum d'histoire naturelle et du CNRS de Nancy, viennent d'en proposer une meilleure. Analysant avec une extrême précision la composition de plusieurs météorites - composition qui n'a pas changé depuis la formation du système solaire - ils ont d'abord montré que le rapport bore 11/bore 10 s'y trouvait comme sur la Terre (proche de 4). Nos chercheurs ont alors rapproché leurs

résultats d'une autre découverte récente : des astronomes américains ont détecté des rayons gamma provenant de la nébuleuse d'Orion, qui seraient émis lors des chocs entre des noyaux d'hydrogène du nuage et des noyaux de carbone et d'oxygène éjectés par des supernovae du même nuage.

Les deux scientifiques ont calculé que, dans cette nébuleuse, ces réactions devaient produire des taux de bore 11 et 10 en parfait accord avec ce qu'ils avaient mesuré dans leurs météorites ! Conclusion : les atomes de bore ne sont pas formés dans le nuage intergalactique, mais probablement dans des nuages très denses de gaz et de poussières qui se condensent peu à peu pour former des étoiles nouvelles. Des nuages tout à fait semblables à celui qui a donné naissance au système solaire. H.G.

### QUESTION DE TECHNIQUES

## Les Sherlock Holmes de la pollution

### Dotés d'une sonde ionique, les chercheurs de Nancy traquent toutes les particules de l'atmosphère.

Jetez un coup d'œil en l'air. Vous ne verrez rien. Surtout pas les particules minérales et organiques en suspension dans l'atmosphère. Dommage, ou plutôt, tant mieux car certaines peuvent être toxiques, d'autres retombent sous forme de pluies acides. La Mecque des sciences de la terre, l'Institut Lorrain des Géosciences à Nancy-Brabois, décoré tout savamment toutes ces minuscules « choses » qui flottent autour de nous, avec sa première sonde ionique installée dans le saint des saints, le CRPG (Centre de recherches pétrographiques et géochimiques). Un travail de fourmi pour mieux comprendre notre environnement.

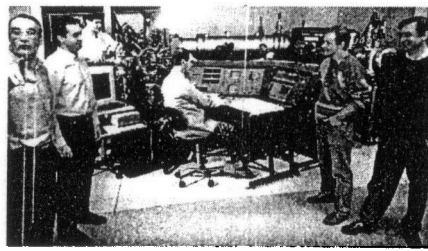
### Unique au monde

Le CRPG s'apprête à recevoir, avant l'été, une nouvelle version de cette sonde ionique. Sa sensibilité a été multipliée par dix, et ses nouvelles possibilités d'analyse renvoient presque aux oubliettes ce qui existe jusqu'à présent. Cet outil détectera des concentrations ultra faibles, jusqu'à un milligramme par tonne, de tous les éléments connus. Pour identifier des pollutions atmosphériques ou aquatiques, localiser leur origine grâce à leurs signatures isotopiques, déterminer les durées et les distances de transport de particules dans l'atmosphère, évaluer l'impact climatique. « Avec cette invention

française, on pourra dater les zircons qui sont les minéraux les plus anciens que l'on puisse trouver, ce qu'on ne savait pas faire. Il sera possible d'avoir accès à des éléments que l'on ne pouvait pas bien mesurer. Nancy sera le seul site au monde à être équipé d'un système de mesure multicollection », déclare Etienne Deloule, chercheur au CRPG.

« Nous allons pouvoir effectuer un travail de fond pour comprendre les processus et les sources majeures d'aérosols sur un bassin comme Nancy, par exemple. Jusqu'à présent nous étions incapables d'analyser une particule individuelle » ajoute Christian France-Lanord, chargé de recherches au CNRS.

« Cette technologie, c'est un boom par rapport à ce qui existe. En diminuant les échelles d'observation et en augmentant les sensibilités, on va pouvoir découvrir de nouveaux mécanismes » assure Guy Libourel, maître de conférence à l'université Henri Poincaré. Concrètement, cet appareil doit aboutir à des transferts de connaissances. Elles pourront être appliquées à la stabilisation des cendres volantes produites lors de l'incinération de déchets ménagers. Des cendres contenant de l'arsenic, du plomb, du zinc, etc., et qui sont vitrifiées. La question posée consiste « à savoir si la verre réalisé est stable. Une vitrification qui sert aussi à piéger des déchets



Inventée et fabriquée en France, cette future sonde ionique démontrera la notoriété nationale de Nancy pour les sciences de la terre.

radioactifs ». Un début de solution est fourni par l'étude des vitraux des cathédrales. Les verres potassiques construits au Moyen-Âge, que l'on croyait éternels, sont instables. Ils s'opacifient. Si les somptueux bleus de

Chartres du XIIe siècle n'ont pas bougé « c'est parce qu'ils sont riches en silice et pauvres en potassium ». Un sacrifice des Maîtres Verriers qui ne sera pas inutile. Il servira au salut de l'humanité. Hubert PARUIT

## La reconnaissance du site nancéen

Le CNRS, dont les ressources se ratatinent comme une peau de chagrin, a « englouti » dans cette sonde la moitié du budget national consacré à l'équipement des sciences de la terre. Un investissement total de 13 MF, financé à parts égales par le CNRS, le Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche et les collectivités territoriales.

Dernier dossier signé par Hubert Currien, alors ministre de la Recherche, la

sonde ionique a dû cheminer au travers des méandres politiques de ses successeurs. Le choix de Nancy confirme « 80 ans de tradition des sciences de la terre à Nancy ». Il s'explique aussi parce que les deux seuls chercheurs ayant les compétences pour s'en servir, Marc Chaussidon et Etienne Deloule, travaillent au CRPG. Revers de la médaille, Nancy devra laisser la moitié du temps d'utilisation de cette sonde ionique à la disposition de chercheurs venus d'ailleurs.

## LES DÉCHETS STABILISÉS A L'ÉPREUVE DU TEMPS

GRÂCE AUX PROCÉDÉS DE STABILISATION, LES DÉCHETS TOXIQUES SONT TRANSFORMÉS EN BLOCS COMPACTS. UNE FOIS ENFOUIS, CES BLOCS RÉSISTERONT-ILS À L'ALTÉRATION ?

Finir le vol des plastiques au-dessus d'un nid d'immortelles, des déchets toxiques relents méphitiques ! Sous la pression d'une nouvelle réglementation, les anciennes décharges seront peu à peu remplacées par des « sites de stockage » où seuls des « déchets ultimes stabilisés » pourront être déposés. Les déchets ultimes, la loi du 13 juillet 1992 désigne les résidus « qui ne sont plus susceptibles d'être traités ». Autrement dit ceux qui ne peuvent être ni recyclés, ni incinérés, pour l'essentiel des poussières minérales, riches en métaux lourds et extrêmement nocifs. Quant à la stabilisation, elle est censée transformer les déchets toxiques en un matériau résistant, afin de limiter au maximum la migration des polluants vers le sol ou les nappes phréatiques.

Depuis le mois d'avril 1995 ce traitement radical est devenu obligatoire pour les cendres et les saies des usines d'incinération des ordures ménagères (environ trois cent mille tonnes par an), auxquelles s'ajoutent divers résidus industriels (poussières métalliques, etc.). Pour stabiliser les polluants, les experts proposent soit de les noyer dans un ciment ou un liant organique (bitume, plastique), soit de les vitrifier sous l'action de la chaleur (photo). Pour l'instant, seuls les procédés de cimentation, plus économiques, sont exploités à l'échelle industrielle. Quel que soit le procédé, le matériau obtenu subit un test normalisé avant d'être stocké. Ce test, réalisable en quarante-huit heures, permet d'évaluer la résistance mécanique du matériau et sa capacité à retenir les composants chimiques lorsqu'il est soumis à un flux d'eau (le test de lessivage). Le bon état du matériau est donc vérifié au moment du stockage. Mais qu'advient-il de ses qualités au bout de dix, vingt, cinquante ans ? Est-il possible de prévoir son comportement à si long terme ?

Une fois entreposé dans un centre de stockage, le déchet risque de subir, dans un avenir plus ou moins lointain, l'action corrosive de l'eau. Il peut alors s'altérer, autrement dit être sujet à des transformations chimiques entraînant une libération des éléments polluants. L'évaluation du risque de relâchement précoce repose sur une connaissance encore incertaine des mécanismes d'altération. Des modèles décrivant le comportement des déchets cimentés ou vitrifiés ont permis quelques premières estimations de durabilité. Par exemple, Etienne Vernaz, ingénieur au service de confinement des déchets du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), estime qu'un déchet vitrifié pourrait s'altérer, au pire, à une vitesse de 0,01 millimètre par an. Il faudrait alors plus de sept cents ans pour dégrader la moitié d'un cube de 5 centimètres de côté<sup>(1)</sup>. Les ciments, trop poreux, résistent beaucoup moins bien.

Le fait français prévoit que les déchets ultimes, non valorisables, soient stabilisés avant d'être enfouis, afin de limiter au maximum la pollution des sols et des eaux. Plusieurs techniques de stabilisation sont déjà au point. Par exemple, cette photo montre au Centre d'Études de la vallée du Rhin, une coulée de terre dans l'atelier de vitrification de Marcoule. En 1995, cette réglementation est applicable à une première catégorie de déchets, qui comprend essentiellement les cendres et saies des usines d'incinération des ordures ménagères. La stabilisation des autres déchets industriels devra être effective en 1998. Quant aux déchets ménagers et déchets industriels banals (emballages), ils continueront à être entreposés dans des décharges existantes jusqu'en 2002, ce qui laisse une marge de temps plus importante pour la mise en place des centres de stockage couplés. (Cliché CEA)

LA RECHERCHE 271 AVRIL 1995 VOL 26 PAGE 99

Jacques Méhu, responsable de la recherche en stabilisation/solidification de Polden Insa Valor, filiale de l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Lyon, a calculé qu'il faudrait à peine trois ans pour qu'un bloc de béton d'un mètre cube soumis au lessivage perde la moitié de son sodium<sup>(2)</sup>. Toutefois, de l'avis général, ces modèles sont encore trop simples pour permettre une prévision à long terme fiable. Les tests de lessivage réalisés par le CEA, montrent que les déchets vitrifiés retiennent mieux certains éléments (zinc, titane, fer, etc.) que ne le laissent augurer les calculs de perte de masse par dissolution. Apparemment encourageant, ce résultat ne rassure pas le moins du monde les chercheurs, puisqu'il révèle une connaissance imparfaite des mécanismes d'altération.

Les vitreaux médiévaux sont d'excellents modèles, bien dotés et riches en métaux lourds

Les experts és-ciments se heurtent à des problèmes similaires. Des études financées par le Réseau coopératif de recherche sur les déchets (RECO.R.D.) — association regroupant industriels et institutions publiques<sup>(3)</sup> — ont permis de confronter des résultats expérimentaux aux « prévisions » d'un modèle fondé sur les lois de diffusion. Or si le modèle — conçu par le Centre de recherche néerlandais sur l'énergie et l'environnement — décrit convenablement le comportement des éléments de sodium (sodium chlorure), il n'en est pas de même pour des polluants plus virulents comme le plomb ou l'arsenic. Le rejet de ces éléments nocifs par le matériau altéré peut tout à fait se révéler ou s'accroître, selon le pH ou le pouvoir oxydant du milieu, et de manière inexpliquée. Il s'agit maintenant, selon J. Méhu, « de comprendre les mécanismes intimes de la dissolution du matériau. L'objectif est d'obtenir des modèles couplant dissolution et diffusion ».

Pour démonter les rouages complexes de l'altération, deux stratégies complémentaires s'offrent aux chercheurs. D'une part, analyser expérimentalement les mécanismes d'altération. « Par exemple, explique E. Vernaz, notre laboratoire du CEA soumet depuis plus de onze ans des échantillons de déchets vitrifiés au lessivage. En effectuant des prélèvements tous les deux mois, nous savons pas à pas les phénomènes d'altération. » Dans la même optique, un programme lancé fin 1994 par l'association Record et co-ordonné par J. Méhu, des chercheurs étudient l'altération de déchets cimentés « artificiels », dont la composition est déterminée par l'expérimentateur.

L'autre stratégie consiste, compte tenu de la durée limitée des expériences en laboratoire — à peine quelques années, donc peu réaliste au regard de la durée

de vie des déchets stabilisés — à se rabattre sur des matériaux existants dans la nature, aux propriétés analogues. Le CEA, dans le cadre de son programme de vitrification des déchets nucléaires, étudie le basalte, une roche vitreuse de nature parce qu'elle est lavée volcanique refroidi rapidement, dont la composition est proche des verres de cendres des usines d'incinération.

Matériau analogue plus surprenant, les vitreaux de cathédrales du Moyen-Âge. Les chercheurs du Centre de recherche pétrographique et géochimique de l'université de Nancy les auscultent attentivement. Un travail qui s'inscrit dans un programme de recherche sur les déchets ultimes financé par le groupe SITA (Lyonnaise des eaux-Dumez) et coordonné par Jean-Yves Bottero, de l'université d'Aix-Marseille. « Les vitreaux médiévaux sont d'excellents modèles, explique Guy Libourel, géochimiste à Nancy, car ils ont bien datés et riches en métaux lourds, ajoutés pour la coloration. L'étude des zones altérées nous permet de calculer le taux de relâchement de ces éléments au cours du temps. »

La démarche analogue est également adoptée pour les ciments. Un contrat de recherche a été passé avec l'association Record et le Bureau de recherches pétrologiques et minières (BRGM), pour trouver d'éventuels matériaux analogues. Les recherches sur la stabilité des déchets solidifiés ouvrent de nouvelles perspectives. L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et le ministère de l'Environnement envisagent que le test rapide imposé avant le stockage soit complété par un test plus sophistiqué, plus contraignant, mais qui renseigne sur la résistance à long terme du matériau. Une première procédure d'évaluation a été proposée par l'Ademe fin 1994, à partir des travaux de Polden sur les déchets cimentés<sup>(4)</sup>. Un travail similaire reste à faire pour les déchets stabilisés par vitrification ou par liants plastiques. Ces procédures pourraient alors être normalisées à l'échelle européenne... d'ici quelques années. Pour les industriels, les recherches portant sur l'évaluation des matériaux sont l'occasion d'améliorer les recettes de traitement des déchets. Certains ont même déjà un déchet inerté, dispensé de la mise en décharge, et servant de matériau pour la construction routière, ... moyennant un assouplissement de la réglementation. « Si les verres étaient disponibles de nos jours, dans le sens de plus en plus prohibitif, leur coût diminuerait par rapport aux ciments, rêve à haute voix Francis Mosnier, ingénieur responsable de ce secteur au centre de recherche du groupe SITA. Les verres entreraient-ils le marché ? »

PIERRETTE HARBET Illustration

## Est Républicain

# Géologie : Nancy au cœur des images virtuelles 3D

Des spécialistes mondiaux font le point sur le projet GOCAD de modélisation sur ordinateur des objets naturels complexes. Applications : l'exploitation et la prospection pétrolières. Mais aussi la médecine, la paléontologie...

GOCAD : derrière ce sigle se cache un projet développé à partir de 1989 par le professeur Jean-Laurent Mallet de l'École supérieure de Géologie de Nancy (ENSG-INPL). Champ d'investigation : la modélisation virtuelle en trois dimensions sur ordinateur des objets naturels complexes ; à commencer par la structure géophysique et géologique des sous-sols. En fait, ce secteur de pointe est devenu indispensable dans la gestion, l'exploitation et la prospection des ressources naturelles comme le pétrole, l'eau et les minerais. Il

permet par exemple de reconstituer un sous-sol à partir de données partielles.

Le programme GOCAD est ainsi appuyé par un consortium de compagnies privées, d'instituts de recherche et d'universités. Les travaux menés à Nancy au sein du laboratoire informatique et analyse de données, du centre de recherche en informatique de Nancy et du centre de recherche pétrographique ont abouti à la création d'un logiciel 3D, lequel est aujourd'hui utilisé par les plus grandes compagnies pétro-

lières et minières mais aussi les universités.

### Les vaisseaux du cerveau

Pas un hasard donc de retrouver à Nancy à l'occasion d'un congrès GOCAD les représentants de l'Amoco, l'Exxon, Texaco ou encore d'Elf Aquitaine, Chevron, Shell... « Nous sommes devenus le standard international », souligne avec une légitime satisfaction Jean-Laurent Mallet qui se rappelle volontiers les débuts d'un projet pour lequel il a fallu faire du « porte à porte » pour convaincre les sponsors.

Si le rendre-vois scientifique de Nancy fait le point sur les dernières innovations, c'est aussi l'occasion pour des chercheurs disséminés à Londres, Houston ou Los Angeles de se rencontrer physiquement : « Au quotidien, nous sommes soudés par Internet ».

### Crâne endommagé

Le logiciel de modélisation des surfaces et autres volumes dépasse pourtant et de loin le seul secteur de la géologie. Il a par exemple trouvé des applications en sismique. Et en médecine ! C'est ainsi à Nancy la modélisation de l'embryon humain (reconstitué à partir de coupe) ou celle des vaisseaux sanguins du cerveau humain (ce qui ouvre des perspectives pour les interventions avec cathéters).

Autre exemple très récent : la



Le Nançoisien Jean-Laurent Mallet, initiateur du projet.

reconstitution complète, toujours à partir de coupes (obtenues par résonance magnétique nucléaire), du crâne pré-néandertalien de Steinheim (Allemagne). Ce crâne de 300 à 400.000 ans, retrouvé endommagé, a pu être reconstitué grâce au projet GOCAD et à l'utilisation du supercalculateur dont a été récemment équipé le Centre de Villers-Nancy.

Au cours de la semaine, les spécialistes internationaux réunis en Lorraine vont ainsi présenter leurs recherches dans des domaines multiples qui vont de la modélisation des écoulements (pour une meilleure gestion des ressources en eaux) à la réalité virtuelle d'un désert (modèle pédagogique) en passant par les failles terrestres et autres structures de réservoirs pétroliers. Sans oublier toutes les nouvelles techniques informatiques

Ghislain UTARD

## Science et avenir Février 1996

### DÉCHETS ULTIMES

## Le salut vient du vitrail

Que deviendront nos déchets ultimes vitrifiés ? Dans combien de temps s'altéreront-ils ? Pour les chercheurs, la révélation/illumination est venue des vitreaux médiévaux. D'un point de vue chimique, en effet, les uns et les autres sont similaires : outre leur base commune constituée notamment de fondants et de silices, les vitreaux anciens étaient colorés par l'ajout d'éléments polluants — des métaux lourds tels que le cuivre pour le rouge et le vert, ou le cobalt pour le bleu — que l'on retrouve en proportions équivalentes dans les déchets ultimes. Mais, tandis que les procédés de vi-

trification des déchets en sont encore à leurs balbutiements, les vitreaux affichent une résistance de plusieurs centaines d'années aux intempéries et autres attaques naturelles. « Aussi, avant de généraliser un processus de vitrification des déchets, est-il important de comprendre les mécanismes d'altération des verres, et notamment des verres connus », observe Jérôme Sterpenich, chercheur au Centre de recherches pétrographiques et géochimiques de Nancy.

Selon leur composition, les vitreaux ont montré des disparités importantes devant les altérations du temps : les vitreaux bleus de Chartres, à dominante silicique, sont ainsi bien plus résistants que ceux, plus potassiques, d'Oppenheim, en Allemagne. □

**COSMOLOGIE** De l'hydrogène au carbone en passant par le fer et l'oxygène, tous les éléments présents dans l'Univers sont apparus par « nucléosynthèse », affirment

les théoriciens. ● NOYAUX. Au sein de la « soupe primordiale » du Big Bang, puis dans l'espace interstellaire et dans le feu thermonucléaire des étoiles, des réactions plus ou

moins violentes ont permis aux noyaux atomiques de se combiner entre eux pour former, à partir de l'hydrogène et de l'hélium, des substances de plus en plus nombreuses.

Depuis deux décennies, les chercheurs n'arrivaient pas à concilier un petit point de ce bel édifice théorique avec les règles de la physique nucléaire. ● CHONDRES. Deux

chercheurs français, Marc Chaussidon et François Robert, sont allés chercher la solution dans les chondres, de minuscules billes que l'on trouve dans les météorites.

## Deux Français percent les derniers secrets de la nucléosynthèse

La théorie qui explique l'apparition de tous les éléments présents dans l'Univers à partir du Big Bang originel semble désormais complète

UNE PARTIE de la solution était cachée au sein de la nébuleuse d'Orion, à 15 millions de milliards de kilomètres de chez nous. L'autre se trouvait à portée de main, dans les échantillons de météorites qui dormaient dans leurs laboratoires. En assurant la jonction, deux chercheurs français ont, semble-t-il, pu résoudre une énigme sur laquelle la communauté des astrophysiciens butait depuis plus de deux décennies.

C'est le genre de question fondamentale qu'affectionnent les enfants, qui plonge leurs parents dans la perplexité et les scientifiques dans le ravissement : « Comment le fer, les carbones et tous les éléments présents dans l'Univers sont-ils apparus ? »

Depuis la découverte de la radio-

### Isotopes à tout faire

Les isotopes sont des atomes d'un même élément chimique dont les noyaux possèdent le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons. Les isotopes d'un même corps occupent la même place dans le tableau de Mendeleïev, sorte de répertoire de tous les éléments. Ils ont une masse très légèrement différente, mais des caractéristiques chimiques extrêmement voisines. Certains sont stables, d'autres radioactifs.

Ce sont d'excellents « marqueurs ». C'est ainsi qu'à partir de l'étude de l'abondance relative des isotopes d'un corps donné, on peut étudier le mécanisme de réactions en chimie, en géochimie, en géologie ou en cosmologie, comme l'ont fait Marc Chaussidon et François Robert. Le dosage de certains isotopes radioactifs, comme le carbone 14, permet de dater des échantillons anciens, mais d'autres servent de traceurs ou de marqueurs en biologie ou en médecine.

activité, les astrophysiciens ont réussi à se forger peu à peu une assez bonne image de la manière dont les choses se sont passées. Selon leur scénario, la bonne centaine d'éléments actuellement connus sont tous nés par « nucléosynthèse », une série de réactions nucléaires plus ou moins violentes qui ont permis aux noyaux atomiques de se combiner entre eux pour former des substances de plus en plus complexes à partir de quelques éléments primordiaux.

### TÉMOINS EXTRATERRESTRES

Très schématiquement, on peut considérer que les corps les plus légers, comme l'hydrogène, sont issus de la fusion des particules qui composaient la « soupe primordiale » prévalant juste après le Big Bang. Plus tard, lors des réactions thermonucléaires complexes qui se produisent au sein des étoiles, ces premiers noyaux fusionnent ou absorbent d'autres particules pour donner des éléments plus lourds. Ce bel édifice théorique parvient à expliquer l'apparition de la quasi-totalité des éléments chimiques de l'Univers.

A l'exception du bore et de certains isotopes du lithium et du béryllium. Pour combler cette lacune, les physiciens ont imaginé, durant les années 70, un troisième processus de synthèse, la « spallation », qui se produit non plus au sein des étoiles, mais dans l'espace interstellaire, qui se comporte en l'occurrence comme un gigantesque collisionneur de particules naturel.

Les noyaux légers (essentiellement d'hélium et d'hydrogène) lancés à très grande vitesse qui composent les rayons cosmiques heurteraient violemment d'autres noyaux plus lourds (d'oxygène ou de carbone). Des débris de la collision naîtraient les noyaux manquants dans les processus précédents de nucléosynthèse.

Un problème de taille subsistait cependant : les règles de la physique nucléaire stipulent qu'une réaction de ce type devrait produire

au final deux fois et demie plus de bore 11 (isotope du bore comportant onze neutrons) que de bore 10. Or, dans toutes les roches terrestres connues, on trouve approximativement quatre fois plus de bore 11 que de bore 10. Les théoriciens se seraient-ils trompés ?

Pour en avoir le cœur net, François Robert (laboratoire de minéralogie, Muséum d'histoire naturelle/CNRS) et Marc Chaussidon (Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, CNRS Nancy) ont eu l'idée de se pencher sur les météorites. Ou, plutôt, sur les chondres - de minuscules billes de silicates d'un dixième de millimètre à un millimètre de diamètre - qui y sont enchâssés. Morceaux de roche venus des confins du système solaire, « les météorites sont les objets les plus primitifs que l'on connaisse, explique François Robert. Ils se sont formés il y a 4,55 milliards d'années et n'ont pas, contrairement aux roches terrestres, subi de réchauffement important depuis. » Les chondres présentent, de surcroît, une structure et une composition très spéciales : « Des tests menés en

laboratoire il y a une dizaine d'années ont démontré qu'ils se sont formés dans l'espace interstellaire. »

Ces tout petits témoins du milieu extraterrestre ont été étudiés à l'aide d'une « sonde ionique » spécifiquement réglée par Marc Chaussidon pour la détection du bore. Cet appareil extrêmement performant utilise un faisceau d'ions qui bombarde l'échantillon et le vaporise localement sous forme d'un « plasma » qui est ensuite analysé en continu par un spectromètre de masse. Le faisceau perce des trous minuscules (30 millièmes de millimètre) et le spectromètre est capable d'analyser d'infimes quantités de matière (quelques atomes).

Les deux chercheurs ont pu, ainsi, mesurer avec une extrême précision la variation des deux isotopes de bore. Ils y ont trouvé la même proportion que dans les roches terrestres : quatre fois plus de bore 11 que de bore 10.

Cette brillante manipulation confirmait donc que cet élément est bien né hors des étoiles, dans l'espace interstellaire où se sont formés les chondres. Mais, dans le

même temps, elle apportait un argument supplémentaire contre le processus de spallation tel qu'il a été imaginé par les théoriciens. L'énigme résistait.

### L'ÉNIGME RÉSISTE

C'est alors que François Robert et Marc Chaussidon eurent l'idée de rapprocher leurs résultats des travaux récents d'astronomes américains. En braquant un télescope à rayons X sur la nébuleuse d'Orion, un nuage moléculaire dense situé à 1 600 années-lumière de la Terre, ces derniers y avaient décelé des « pics » de rayonnement. Selon eux, ces brutales variations de flux sont la marque de réactions de spallation causées par la rencontre de noyaux de carbone 12 et d'oxygène 16 accélérés par l'explosion d'une étoile (ou supernovae).

« Nous avons calculé quels seraient le taux de production et le rapport isotopique du bore né de ces collisions. Cela collait parfaitement avec ce que nous avions observé dans les chondres », explique François Robert. La conclusion s'imposait : le bore est bien né d'une réaction de

spallation mais pas celle imaginée par les théoriciens. Les noyaux légers d'hydrogène et d'hélium n'interviennent pas. De plus, la collision s'est produite non pas dans le vide intergalactique, mais dans un nuage très dense composé de molécules très variées qui, pour couronner le tout, ressemblent précisément à ce qu'était le système solaire au tout début de son processus de formation !

Ce qui est vrai pour le bore devrait l'être également pour les autres éléments qui posent encore problème aux théoriciens de la nucléosynthèse. Cela reste évidemment à vérifier mais, se réjouit François Robert, « tout s'emboîte. La physique nucléaire explique les observations astrophysiques qui, elles-mêmes, corroborent les analyses géochimiques. Il est très rare que ces trois types de données soient compatibles d'emblée ».

Jean-Paul Dufour

★ « *Nucleosynthesis of 11B-rich boron in the presolar cloud recorded in meteoritic chondrules*, Nature, 23 mars 1995.

DECOUVRIR

# L'Himalaya sous la loupe des chercheurs nancéiens

Le centre de recherche pétrographique et géochimique tente de comprendre comment les phénomènes géologiques majeurs, tels que la formation d'une montagne, modifient l'environnement. Conférence.

Nancy et l'Himalaya : le rapprochement n'est pas évident et ne manque pas d'intriguer. Et pourtant ! Christian France-Lanord, directeur du centre de recherche pétrographique et géochimique de Nancy s'en expliquera mardi soir lors de la conférence organisée dans le cadre des « Mardis du CNRS ».

« L'Himalaya a 40 millions d'années. Comparé aux 300 millions des Vosges, c'est une chaîne montagneuse jeune, simple, dont les effets sur l'environnement sont extrêmes. C'est précisément l'objet de nos études, cela depuis des années grâce notamment aux travaux de Patrick LeFort, l'un des plus grands géologues himalayistes. »

12 % de la poussière ou des particules des océans proviennent directement de l'érosion de l'Himalaya, poursuit Christian France-Lanord qui multiplie les exemples.

« C'est à lui qu'on doit la mousson, qui elle-même a influencé la survie de certaines espèces animales et végétales au détriment d'autres et qui aujourd'hui encore conditionne la vie dans les pays asiatiques... »

On le devine, le champ d'investigation est immense.

## 20 millions d'années d'histoire du globe

Les chercheurs nancéiens s'interrogent aussi sur le rôle de ces reliefs dans l'élimination du gaz carbonique.

« Les minéraux attachés à la montagne subissent des altérations jusqu'à ce qu'ils atteignent les océans. Ces réactions chimiques complexes consomment du CO<sub>2</sub>, sans que l'on sache précisément dans quelle proportion, ni comment ils interviennent dans la régulation du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère. »



Christian France-Lanord : un champ d'investigation immense. (Photo : Serge LALISSE)

Pour comprendre ces phénomènes, les scientifiques disposent de prélèvements de roches réalisés dans l'océan, au sud du Bangladesh où ils ont localisé une couche sédimentaire de 22 km d'épaisseur provenant de l'Himalaya.

Des Nancéiens se sont également rendus dans la plaine du Gange où des accidents géologiques font ressortir à la surface des couches de terrains très anciennes, dont l'origine est identique.

« 20 millions d'années de l'histoire de la terre se trouvent inscrits là. »

Un enregistrement à l'échelle du globe qu'il leur appartient de décrypter.

Bruno SUSSET  
● Conférence mardi 12 décembre à 20 h 30 au conservatoire régional de l'Imaginaire, rue Michel-Ney à Nancy.

Comprendre

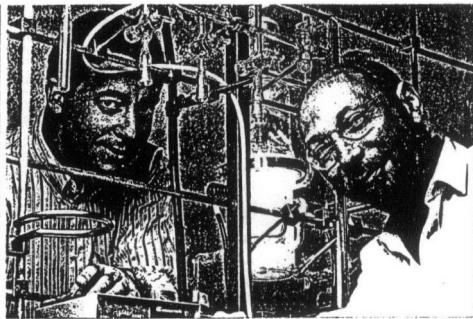
ASTROPHYSIQUE

# La naissance des atomes

Comment naissent les atomes ? Les astrophysiciens peuvent répondre pour presque tous les éléments. Presque, car le lithium, le béryllium et le bore ont longtemps échappé aux plus fins limiers de la recherche. Pas à tous pourtant. L'enquête menée par deux Français vient d'aboutir.

L'ongtemps, les astrophysiciens ont retenu deux explications principales de la nucléosynthèse, autrement dit la naissance des atomes. La première met en scène l'hydrogène, l'élément le plus abondant dans l'univers, son isotope naturel, le deutérium, et un peu d'hélium. Suivant l'hypothèse du Big Bang, ils se seraient créés durant les premières minutes de l'explosion originelle.

Les astres, essentiellement composés d'hydrogène dans leur jeunesse, s'effondrent sur eux-mêmes sous l'effet de leur propre masse. Une forte chaleur en résulte qui permet une réaction nucléaire : deux noyaux d'hydrogène donnent un noyau d'hélium en dégageant de l'énergie. Le Soleil fonctionne exactement sur ce modèle, l'énergie émise nous parvenant sous la forme du rayonnement solaire. Dans cette réaction de fusion thermonucléaire stellaire, un équilibre s'installe entre l'hélium et l'hydrogène. La rupture de cet équilibre quand la quantité d'hydrogène devient trop faible entraîne un nouvel écroulement de l'étoile sur elle-même. Le surplus d'énergie qui en résulte permet à plusieurs atomes d'hélium de fusionner pour donner du carbone et de l'oxygène. Ce cycle de fusions, équilibre, écroulements, utilisant les éléments disponibles, plus nom-



Marc Chaussidon et François Robert, du Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CNRS-Nancy). Leurs mesures sur des chondres valident la théorie expliquant la naissance des atomes de lithium, béryllium et bore.

breux à chaque étape, explique l'apparition des différents atomes jusqu'aux éléments transuraniens, c'est-à-dire dont le nombre atomique est supérieur à celui de l'uranium, soit 92. Pour les plus lourds, il faut toutefois recourir à un second modèle et supposer que leur noyau se forme à partir d'un noyau léger, né dans les étoiles, qui capture des neutrons produits par les réactions de fusion. Les observations confirment ces scénarios et donnent donc pleine satisfaction.

Malheureusement le lithium, le béryllium et le bore échappent à ces deux modèles. Pour eux, un scénario original voit le jour. Son cadre, le milieu interstellaire. Les astrophysiciens imaginent des collisions entre des fragments de noyaux lourds (carbone, oxygène...) et le rayonnement cosmique, composé d'hydrogène et d'hélium, peu intense mais très énergétique, environ 500 mégaelectronvolts (MeV). Ce mécanisme nommé spallation à haute énergie explique très correctement

la présence des trois atomes hors norme et se trouve confirmé par des mesures récentes. Mission accomplie ? Pas vraiment. Les rapports isotopiques ne sont pas ceux observés dans le système solaire. Dans l'univers, le rapport bore-11/bore-10 vaut 2,5 ; dans le système solaire, il vaut 4. Pour parvenir au modèle final, la direction de l'enquête est claire. La spallation, c'est-à-dire les collisions entre atomes, est une bonne piste, mais qu'il convient d'amé-

nager pour obtenir le rapport mesuré. Ainsi nait la spallation à basse énergie. Dans des nébuleuses, l'hydrogène est bombardé par du carbone et de l'oxygène de basse énergie (100 MeV) issus de l'explosion d'étoiles, les supernovae. La nébuleuse d'Orion est un parfait exemple de ce genre de situation. Le rapport prévu dans ce scénario oscille autour de 4. Reste à vérifier la théorie. C'est là l'apport essentiel de Marc Chaussidon et François Robert, chercheurs au CNRS. Leurs mesures dans des chondres (*Illustration ci-dessus*) vieux de

4,65 milliards d'années confirment la théorie de la spallation à basse énergie. Toutefois, le lithium n'est pas complètement dans ce cadre et nécessitera d'autres mesures. L'intérêt de tous ces travaux est pourtant beaucoup plus large : les observations d'importantes variations du rapport bore-11/bore-10 dans les chondres prouvent l'hétérogénéité du nuage interstellaire d'origine. En gros, c'est fait de la nébuleuse d'Orion un modèle très probable de l'état de notre système solaire au moment de sa naissance. Eric Glover

## Atomes et isotopes

Les isotopes sont des atomes dotés d'un nombre de neutrons différents. Le nombre de protons étant caractéristique de l'atome. S'il contient six neutrons, le carbone (six protons) est appelé carbone-12 (6+6), avec huit neutrons, il est carbone-11 (6+8). Un proton de plus, il n'y a plus de carbone mais de l'azote. Pourquoi les isotopes sont-ils si importants ? Prenons l'exemple du bore.

Ses deux formes principales sont le bore-10 et le bore-11, ce dernier étant deux fois et demi plus courant dans l'univers que l'autre. Le rapport isotopique bore-11/bore-10 vaut 2,5. Les rapports isotopiques sont très stables et leurs variations traduisent donc les modifications d'un système spatial. Il en va ainsi avec le rapport atypique bore-11/bore-10 qui vaut 4 dans le système solaire. ☐

Genèse

# Histoire de chondres

Les chondres sont un morceau d'histoire enregistré. Ils se trouvent uniquement dans les météorites les plus anciennes, datées de 4,55 milliards d'années, le moment de la genèse supposée du système solaire. Les savants ne connaissent ni le comment ni le pourquoi de leur fusion, ni l'état de la matière ou le mécanisme de la condensation au moment où elle s'est produite. En revanche, la structure des minéraux dans un chondrite précise les conditions de pression et de température au moment de sa formation. Sa surface, bombardée de grains d'un micron, informe sur son milieu de naissance, probablement un disque de matière condensée. Les rapports isotopiques indiquent l'état d'hétérogénéité isotopique du nuage de départ. Tout particulièrement, l'étude de leurs variations telle que l'on pratique Marc Chaussidon et François Robert est riche d'enseignements. Une fois le chondrite formé, sa composition ne changera plus. Il peut toutefois être soumis à une nouvelle fusion ou à un autre événement. Sa structure enregistre tout faisant du chondrite un témoin de sa propre création. ☐



# Science et cinéma sur une même affiche

De l'invention de la chronophotographie à Jurassic Park, la science a créé le 7e art et le 7e art s'est inspiré de la science. Du 7 au 16 novembre, le CNRS propose projections, conférences, débats... sur ce couple passionné.

Le cinéma a cent ans ! Et ce ne sont pas les scientifiques qui diront le contraire. Mais avant la première projection publique des frères Lumière en décembre 1895, des savants ont posé les premières pierres d'une technique portée depuis au rang de septième art. Parmi les pionniers, il y eut l'astronome Jules Janssen en 1874.

Il y eut aussi et surtout Etienne Jules Marey et ses chronophotographies qui saisissaient les mouvements anatomiques ou « le très scandaleux docteur Doyen filmant la séparation des sœurs siamoises ou l'amputation d'une jambe, ou encore Jean Painlevé, le savant qui fréquentait les surréalistes » comme le rappelle Alexis Martinet de l'Institut de cinématographie scientifique.

## « Aiguiser la curiosité »

De la naissance du cinéma aux effets spéciaux en passant par la représentation de la science sur les grands écrans, artistes du septième art et savants constituent un couple historique. C'est pourquoi la délégation régionale du CNRS propose du 7 au 16 novembre à Nancy un cycle de

conférences, projections, débats, rencontres sur le thème « science et cinéma ». Cette manifestation grand public et gratuite (à l'exception d'une projection à tarif réduit au Caméo) déclinera ainsi des sujets attractifs, du cinéma rayon X à l'histoire du temps.

Parmi les invités vedettes : Jean Rouch, une des plus grandes signatures du documentaire scientifique.

« Les films au programme ne sont pas seulement à vocation pédagogique. Il s'agit également de documents destinés à aiguïser la curiosité du grand public » expliquent les organisateurs qui proposent ainsi un rendez-vous assez inédit avec les scientifiques. Le public pourra par exemple rencontrer le Nancéien Marc Chaussidon, un « chasseur d'étoiles » dont les recherches portent sur les théories qui expliquent la naissance de l'univers.



Marc Chaussidon (au centre) et son équipe nancéienne : des chasseurs d'étoiles qui remontent aux sources de l'univers.

## Demandez le programme !

● **Mardi 7** : 18 h (FNAC, avenue Foch)

Le cinéma et la science : conférence avec Alexis Martinet, directeur de l'Institut de cinématographie scientifique.

● **Jeudi 9** : 20 h 30 (Institut européen de cinéma et d'audiovisuel, rue Ney)

Le cinéma rayons X : 500 images/seconde. Projection et débat avec le professeur Jean-Pierre Gasc, Muséum National d'Histoire Naturelle.

● **Vendredi 10** : 20 h 30 (Centre culturel André-Malraux Vandœuvre)

Le cinéma témoin de la science et science témoin de l'art. Projection et débat avec Jean Réal, réalisateur.

● **Samedi 11** : 20 h 30 (Centre culturel André-Malraux, Vandœuvre)

Sciences, arts, cinéma... Quelles relations ? Projection en avant première et rencontre avec Alain Jaubert, réalisateur et directeur de la série Palettes diffusée sur Arte.

● **Lundi 13** : 20 h 30 (tarif réduit), cinéma Caméo, rue de la Commanderie

« Une brève histoire du temps », film de Errol Morris, d'après le livre de Stephen Hawking. Avec la participation de Monique Sicard, ingénieur de recherches au CNRS.

● **Mardi 14** : 20 h 30 (Conservatoire régional de l'Image, rue M.-Ney)

Chasseurs d'étoiles. Projection et débat avec Marc Chaussidon, chargé de recherches au CNRS.

● **Mercredi 15** : 17 h (Institut Européen de cinéma et d'audiovisuel, rue M.-Ney)

Images des sciences, science des images : projections et rencontre

avec Jean-Michel Arnold, directeur CNRS Images/Média Femis et Jean Rouch, président du CICT de l'Unesco.

● **Mercredi 15** : 20 h 45 (Conservatoire régional de l'Image, rue M.-Ney)

La caméra de contact, hommage à Jean Rouch : rencontre avec Jean Rouch et projections : « Les Maîtres fous », « Tourou et Bitti » et en avant première mondiale « Moins fatigué debout, moins couché ».

● **Jeudi 16** : 20 h 30 (Forum Iffras, 1, avenue R.-Pinchard)

La représentation de la science au cinéma : colloque avec la participation de Jean-Michel Arnold, directeur CNRS Images/Média Femis Jean Rouch, président du CICT de l'Unesco, professeur Jean-Jacques, directeur du laboratoire de chimie au collège de France.

Est Républicain du 2 novembre 1995

## Scientifiques nancéiens à l'honneur

Rarissime : les revues anglaise et américaine « Nature » et « Science » viennent de publier le fruit des travaux de trois chercheurs nancéiens.

Ils sont rares les scientifiques français ou européens à « décrocher » un article dans les très cotées revues scientifiques anglaise « Nature » ou américaine « Science ». La performance de Marc Chaussidon, chargé de recherches au CNRS, François Robert, directeur de recherches au CNRS et de Bernard Marty, professeur en géochimie à l'école de géologie n'en a que plus de mérite. Les deux premiers viennent de voir leurs recherches sur les météorites publiés par la revue « Nature ». Marc Chaussidon et Bernard Marty verront, en outre, dans les prochains jours le magazine « Science », consacrer un important article au fruit de leur travail sur les échantillons soulevés dans les failles de la terre, sous les mers.

« Nous sommes parvenus à montrer par quel processus de fabrication apparaît le bore, l'un des éléments que l'on retrouve partout sur la terre, comme chez les humains » explique Marc Chaussidon. Une découverte importante, confirmée par le choix de la très spécialisée revue « Nature », qui devrait avoir également d'autres incidences sur le travail de nombreux scientifiques.

Les recherches du groupe nancéien ont été facilitées par l'un des outils actuellement implanté au CRPG (centre de recherches pétrographiques et géochimiques) : une sonde ionique d'un coût de quatre millions de F. Les chercheurs espèrent maintenant voir arriver un outil encore plus performant, d'un coût de douze millions de F.



Marc Chaussidon, François Robert et Bernard Marty, honorés par le milieu scientifique.

Est Républicain du 26 juillet 1995

Couverture :

**1** - Modèle géométrique 3D d'un réacteur naturel de fission nucléaire à Oklo, zone 10 (Gabon) réalisé à partir de données de terrain à l'aide du logiciel GOCAD. La partie minéralisée, siège des réactions est en bleu, trois galeries d'exploration sont matérialisées en brun. Ce modèle est utilisé pour étudier les transferts de chaleur et de fluides au cours des réactions (C. Le Carlier de Veslud, B. Gérard, J.J. Royer, projet CEE).

**4 haut** - Figures d'altération d'un fragment de verre de vitrail de la cathédrale de Digne (XIIIème siècle). L'échantillon a été retrouvé dans des fouilles. Les stries concentriques représentent la progression des fronts d'altération. (J. Sterpenich, G. Libourel)

**4 milieu** - Fragment de la masse de métal montrée à Pierre Pallas en 1772, identifiée ensuite comme une météorite (tiré de "carnets d'histoire naturelle - les météorites " MNHN, Bordas 1996, cliché U. Marvin)

**4 bas** - Grille stratigraphique curvilinéaire créée à l'aide du logiciel GOCAD et utilisée principalement pour la représentation et la modélisation des réservoirs pétrolifères.



