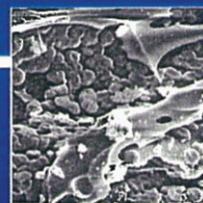
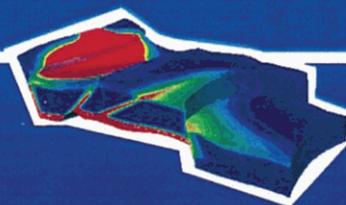


1999

Travaux de recherche réalisés  
en 1999

Rapport d'avancement





*Partenariat dans le domaine de la recherche et  
développement en sciences de la terre*

*Travaux de recherche réalisés en 1999  
Rapport d'avancement*

*Rédigé sous la responsabilité de*

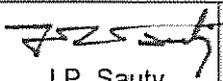
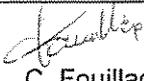
**J.P. Sauty**

*avec la collaboration de*

**P. Baranger, J. Casanova, E. Gaucher, A. Genter, S. Gentier, J.P. Girard,  
A. Menjoz, P. Négrel, P. Ledru**

Février 2000

BRGM/RP-50133-FR

1	Février 2000	 J.P. Sauty	 C. Fouillac	 P. Lebon
révision	date	rédacteur	vérification BRGM	vérification ANDRA



## SYNTHESE

Le BRGM et l'ANDRA ont organisé un partenariat de recherches sur la période 1998-2001 portant notamment sur la compréhension des écoulements dans un massif granitique et des propriétés physico-chimiques d'une argilite et de son eau interstitielle. Le lancement d'une série de projets a été décidé lors du montage du partenariat ; six d'entre eux ont pu démarrer en 1998, les autres en 1999. Le présent rapport montre comment ces projets s'inscrivent dans le programme général, expose leur état d'avancement à fin décembre 1999 et propose les perspectives pour 2000 offertes à la poursuite de travaux engagés dans le cadre de l'accord bipartite de 1998.

La modélisation des milieux granitiques a progressé en 1999 à travers six projets :

- Une étude géologique des fracturations de corps granitiques dans des contextes variés (projet *MODGEO* démarré en 1999) et l'investigation du passé géologique et hydrogéologique du seuil du Poitou avec datations par isotopes lourds -U, Th, Pa, Ra, Sr- (projet *PALEOHYD* démarré en 1998).
- Une recherche sur les processus de piégeage des éléments trace aux émergences d'eaux thermominérales (réalisée sur les exutoires du Cézallier).
- Deux projets destinés à la compréhension et la prédiction des écoulements et des transferts dans le milieu souterrain. Le premier porte sur la mise au point d'un prototype de meilleur éléments finis prenant en compte la géométrie de discontinuités dues à la géologie et à des ouvrages souterrains (projet *MAILLEUR*). Le second consiste en une investigation critique sur les méthodes d'interprétation des tests hydrauliques en milieux fracturés (premières phases du projet *WELLTEST*) ; ces deux projets ont été lancés fin 1998.
- Le début d'une réflexion sur l'état des recherches antérieurement réalisées et des travaux à lancer dans le domaine de l'hydrogéomécanique des fractures (projet *MECASYNT* démarré fin 1999).

L'étude des propriétés de formations argilites a porté sur l'histoire géologique et la compréhension de la chimie du système eau-roche de ces formations avec :

- La caractérisation des processus à l'origine des phases solides et du contrôle des éléments dissous ainsi que des processus d'interactions fluides-roche (projet *SEDIMOR* démarré en 1998).
- Trois projets portent sur la physicochimie du système eau-roche argilite. *THERMOAR* (démarré en 1998) est consacré à l'élaboration et la validation d'un modèle de la composition en éléments majeurs et mineurs des eaux interstitielles. La caractérisation physico-chimique de l'eau porale contenue dans les argilites est l'objet du projet *TRANSFAR* (initié en 1998). Enfin, le projet *ALCAR* (démarré fin 1999 avec dotation de la CCE -ECOCLAY II-) concerne la prédiction des modifications induites dans une barrière argileuse par la proximité d'ouvrages en béton.
- Le développement de méthodologies analytiques performantes pour l'acquisition de composition en isotopes stables de l'oxygène et l'hydrogène dans les saumures, et la validation d'un nouvel outil de géothermométrie applicable aux argiles (projet *GEOTHERM* démarré en 1998).

Enfin, une réflexion a été engagée sur les besoins à satisfaire en priorité dans un programme scientifique d'accompagnement d'un laboratoire souterrain, par l'examen de ce qui a été réalisé au niveau international sur les autres sites et des attentes de la Communauté Scientifique.

## SOMMAIRE

SYNTHESE.....	2
SOMMAIRE.....	3
1. INTRODUCTION.....	4
2. PROGRAMME DE RECHERCHES ET TRAVAUX 1998.....	4
2.1- Modélisation des milieux fracturés (géologie, propriétés, écoulements) en vue de la compréhension des écoulements dans un massif granitique.....	4
2.2- Propriétés physiques et composition et réactions chimiques du système eau interstitielle - roche d'une formation hôte argilite : application au site de l'Est.....	7
2.3- Programme scientifique d'accompagnement des laboratoires souterrains.....	10
3. AVANCEMENT DES TRAVAUX PAR PROJET EN 1999.....	12
3.1 - Projet MODGEO : .....	13
"Modèles géologiques de fracturation des granites".....	13
3.2 - Projet PALEOHYD : .....	18
"Paleo-hydrogéologie et géoprospective : méthodes paleo-hydrogéologiques et leurs applications ; participation au projet CCE-EQUIP".....	18
3.3 - Projet CEZALLIER : .....	22
"Étude de la mobilité d'éléments chimiques dans des eaux soumises à des changements de conditions d'oxydation et de dégazage".....	22
3.4 - Projet MODHYDRO : .....	28
"Modélisation hydrogéologique de domaines 3D à géométrie complexe, outil pour la génération des maillages et la préparation des données".....	28
3.5 - Projet WELLTEST : .....	32
"Interprétation des essais d'eau en milieu fracturé".....	32
3.6 - Projet MECASYNT : .....	36
"Comportement hydromécanique et modèles d'écoulement dans les fractures : synthèse".....	36
3.7 - Projet SEDIMOR : .....	40
"Apports de l'histoire géologique des argilites sur les interactions fluides-roches".....	40
3.8 - Projet THERMOAR : .....	45
"Régulation de la composition et spéciation chimique du système eau interstitielle-roche".....	45
3.9- Projet TRANSFAR : .....	50
"Régulation de la composition et spéciation chimique du système eau interstitielle-roche".....	50
3.10- Projet ALCAR : .....	54
"Régulation de la composition et spéciation chimique du système eau interstitielle-roche".....	54
3.11 Projet GEOTHERM : .....	56
"Développements méthodologiques en géochimie des isotopes stables pour la caractérisation des fluides et paléofluides dans les systèmes géologiques".....	56
3.12- Projet GRANITES : .....	62
"Programme de Recherche Scientifique d'accompagnement des laboratoires souterrains".....	62
4 - CONCLUSIONS.....	67

## 1. INTRODUCTION

Le BRGM et l'ANDRA sont convenus de conduire des recherches en partenariat sur la période 1998-2001, sur des sujets d'intérêt communs. Les deux grands thèmes ci-après sont notamment ciblés :

- Modélisation des milieux fracturés (géologie, propriétés, écoulements) en vue de la compréhension des écoulements dans un massif granitique,
- Propriétés physiques, composition et réactions chimiques du système eau interstitielle - roche d'une formation hôte argilite : application au site de l'Est

La programmation des projets a été décidée en commun entre le BRGM et l'ANDRA. Les résultats de ces actions s'inscrivent dans l'objectif pluriannuel du thème. Ils permettent, en outre, une évaluation scientifique annuelle de l'accord de partenariat, élément indispensable à une optimisation des efforts. Une partie de ce partenariat est réservée au développement et/ou à la validation d'outils ou de concepts ne rentrant pas spécifiquement dans l'un des thèmes ci-dessus. Le volume de ces travaux hors thèmes ne doit pas dépasser 15% de l'ensemble des recherches. Le programme en est défini annuellement d'un commun accord.

Le présent rapport s'articule de la façon suivante :

- une présentation générale (chapitre 2) organisée autour des deux thèmes -granite, argile- rappelle les objectifs généraux définis dans l'accord de partenariat, et montre comment les projets réalisés en 1999 s'inscrivent dans ce programme.
- un compte-rendu d'avancement à fin décembre 1999 de chaque projet en cours à cette date (chapitre 3).

## 2. PROGRAMME DE RECHERCHES ET TRAVAUX 1998

### 2.1- Modélisation des milieux fracturés (géologie, propriétés, écoulements) en vue de la compréhension des écoulements dans un massif granitique.

#### objectifs généraux

*Ces recherches contribuent au débat sur les questions scientifiques suivantes :*

- *Quelle est la distribution de la fracturation dans le granite?*
- *Comment l'état de contraintes mécaniques et la géométrie des fractures influencent-ils les modalités d'écoulement au sein des fractures?*
- *Peut-on préciser d'où vient l'eau actuellement présente à l'intérieur du granite? Comment et à quelle vitesse s'écoule-t-elle? Comment a-t-elle acquis sa composition chimique et isotopique et comment sa composition risquerait-elle d'évoluer en présence de perturbations mécaniques et thermiques?*
- *Existe-t-il des connexions hydrauliques entre le socle et sa couverture éventuelle ? Si oui, peut-on les quantifier?*

Plus précisément, les thèmes suivants ont été retenus :

## **Modélisation géologique des systèmes de fractures (point 1.1 de l'accord).**

L'objectif fixé est de chercher à comprendre l'organisation spatiale en trois dimensions des réseaux de failles et de fractures dans un massif granitique. On définira des massifs analogues affleurants, permettant de réaliser les investigations sur des objets plus facilement accessibles. L'analyse des données recueillies permettra de définir des modèles conceptuels multi-échelles adaptés aux massifs granitiques.

A l'échelle régionale, on cherchera plus particulièrement à :

- identifier et caractériser les différentes échelles de fracturation,
- quantifier les rapports de forme des fractures par études sur des affleurements et, à terme, modéliser les interconnexions entre failles,
- expliquer leurs relations avec la structuration du massif, en vue de transposer cette organisation spatiale du milieu fracturé à une zone de stockage, plus profonde donc peu accessible.

A l'échelle du site, le BRGM participe à l'évaluation des méthodes géophysiques utilisées pour le modèle de fracturation hectométrique autour des puits d'accès au laboratoire souterrain. On recherche des dispositifs d'auscultation performants ainsi que des méthodes de traitement efficaces en vue de reconnaître la position des fractures hectométriques représentant les limites hydrauliques des blocs peu perméables.

Sur ce thème, le projet MODGEO initié en août 1999 vise à compiler les données acquises sur la fracturation des granites et à en acquérir de nouvelles de manière à proposer différents modèles géologiques réalistes quant à la fracturation (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.1).

## **Étude des paléocirculations au moyen des cristallisations et remplissages de fracture (point 1.2.1 de l'accord).**

Le BRGM poursuit les recherches sur les essais de datation des épisodes d'ouverture des systèmes au moyen de l'étude des chaînes du déséquilibre radioactif d'une part, l'étude des isotopes stables des phases argileuses et carbonatées qui sont rapportées aux ultimes paragenèses, d'autre part. L'objectif est de mieux comprendre l'état actuel du système, hérité de l'évolution passée du site et sa stabilité en fonction des schémas d'évolution géologique future.

Dans cette optique, le projet PALEOHYD est démarré en 1998 pour une durée de 3 ans (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.2)

Le projet CEZALLIER démarré dès 1997, antérieurement à l'accord, vise à mettre en évidence les mécanismes de piégeage d'éléments chimiques à l'émergence d'une source : il peut être rattaché à ce thème 1.2.1 (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.3)

## Réflexion conceptuelle et développement d'outils pour les modélisations hydrogéologiques (point 1.2.2 de l'accord).

L'hydrogéologie dispose aujourd'hui de nombreux outils pour caractériser et modéliser les circulations dans les milieux poreux continus. Les recherches menées depuis une quinzaine d'années ont montré les limites de l'application de ces méthodes à l'hydrogéologie des milieux fracturés. L'objectif est de faire progresser le développement de nouveaux concepts et/ou d'outils plus adaptés à ce milieu spécifique.

On se propose de réfléchir sur les différentes méthodes d'interprétation des essais hydrauliques déjà utilisées, pour une meilleure évaluation des caractéristiques hydrauliques du réseau de fractures à différentes échelles. La simulation de contextes réels, définis à l'issue des modélisations géologiques pourra être utilisée pour développer des solutions plus générales, s'appuyant sur des modèles déterministes et stochastiques.

Sur ce thème, le projet WELLTEST est démarré en 1998 pour une durée de 3 ans (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.5)

L'évaluation des écoulements au sein et autour d'un site nécessite d'intégrer dans la modélisation de très nombreuses données (propriétés du milieu, conditions aux limites,...) associées à une géométrie 3D complexe (contexte géologique, forte densité de fractures, forages, puits et galeries). L'objectif des travaux consiste à développer les outils nécessaires pour la préparation optimisée des modèles de calcul hydrodynamique tridimensionnels, spécifiques au contexte des études de sites.

La réflexion porte sur le choix de la discrétisation à retenir pour être à la fois cohérente avec le modèle géologique et les processus hydrauliques et chimiques à reproduire, et acceptable en terme de taille globale (extension du domaine étudié, niveau de connaissance aux différentes échelles, nombre et type de failles, ...). On s'attache ensuite à identifier les fonctionnalités requises pour les techniques de maillage 3D, et les conséquences en terme d'algorithmes de discrétisation et de développements informatiques associés, pour exploiter les informations issues des modeleurs géologiques existants.

A l'issue de cette première phase d'évaluation on cherchera à intégrer les structures spécifiques plus complexes (réseau de failles discrètes, réseau de galeries, forages, etc.) et à affiner localement le maillage résultant, sous la contrainte des processus à représenter (gradients, amplitude des flux de transfert, ...). Les procédures de discrétisation géométrique seront alors complétées par l'introduction des paramètres physiques du milieu, l'affectation des conditions aux limites requises et l'export des données élaborées vers l'entrée des principaux modèles numériques s'appuyant sur un maillage non structuré. Ces outils seront testés en aval de la modélisation géologique, sur les données des terrains de jeu étudiés par celle-ci.

Le projet MODHYDRO démarré à fin 1998 pour une durée de 2 ans, a été réexaminé en fonction des objectifs pratiques prioritaires. Il est consacré à la conception d'un outil associant les fonctions de mailleur et de préparation des données pour la modélisation, avec réalisation d'un prototype (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.4).

## Comportement hydromécanique et modèles d'écoulement dans les fractures (point 1.2.3 de l'accord).

L'objectif de ce thème est de définir les écoulements dans une fracture de géométrie donnée, et leur évolution ultérieure sous l'action de phénomènes d'origine mécanique, thermique, et chimique : comment la géométrie des vides contrôle-t-elle les écoulements dans une fracture? Comment évoluent-ils ensemble?

La recherche s'appuie sur les nombreux travaux antérieurs. Une définition plus précise des objectifs sera élaborée à l'issue d'une synthèse des travaux entrepris sur le comportement hydromécanique d'une fracture depuis une dizaine d'années au BRGM au regard de l'état des recherches internationales. On reprendra les expériences déjà réalisées, qui mettent en évidence certains phénomènes non encore expliqués affectant l'écoulement dans une fracture. Ces travaux serviront de base à une réflexion sur les investigations à une échelle métrique à plurimétrique, qui pourront être entreprises dans le laboratoire souterrain.

Le projet MECASYNT, démarré à fin 1999 pour une durée de 1 an, est consacré à la synthèse des travaux antérieurs du BRGM au regard de l'état des connaissances de la communauté scientifique et à la conception de nouvelles voies de recherche (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.6).

Il est prévu que le projet MECAPHEN prenne ensuite le relais des recherches sur le comportement hydromécanique des fractures, suivant les orientations dégagées par MECASYNT.

## 2.2- Propriétés physiques et composition et réactions chimiques du système eau interstitielle - roche d'une formation hôte argilite : application au site de l'Est.

### objectifs généraux

*Une bonne compréhension de la chimie du système eau-roche des formations confinante est importante pour la qualification d'un concept de stockage :*

- *elle peut influencer fortement les propriétés de rétention chimique et/ou physique du milieu pour les radionucléides,*
- *le milieu géologique représente la source d'éléments qui peuvent modifier la durée de vie et la performance des barrières ouvragées.*

*Des travaux importants ont été réalisés sur le site de l'Est et exposés au cours des journées scientifiques ANDRA-CNRS. Des incertitudes subsistent sur les capacités de la communauté scientifique à élaborer des modèles thermodynamiques des réactions gouvernant la composition de l'eau et les transferts de masse de solutés ou de l'eau du système géologique eau-argilite. Le BRGM souhaite contribuer à la réflexion sur ce domaine extrêmement difficile. Il s'agit de progresser sur la compréhension :*

- *des processus géologiques et géochimiques à l'origine des phases solides et éléments dissous actuellement présents dans la formation hôte,*
- *des réactions chimiques responsables pour la régulation de la composition de la phase "dissoute" (masses totales et spéciation des éléments présents en solution ou sorbés),*

- *des phénomènes gouvernant l'état physique de l'eau interstitielle, et de son transfert dans les champs de perturbation (gradients de force) engendrés par le stockage (capillaire, thermique, osmotique).*

*Le projet pourrait s'articuler en fonction de ces trois problématiques scientifiques, de manière à contribuer à l'élaboration d'un modèle déterministe permettant de comprendre comment le système eau-argilites s'est constitué et de prédire son évolution lorsqu'il est soumis à des perturbations.*

### **Apport de l'histoire géologique à la compréhension des relations et interactions entre fluides et particules solides (point 2.1 de l'accord).**

Les propriétés actuelles des eaux interstitielles dans les argilites du Callovo-Oxfordien sont le résultat des interactions entre fluides et roche, tout au long de l'histoire géologique de l'Est du bassin de Paris, depuis leur dépôt en milieu marin jusqu'à leur état actuel. Il s'agit de distinguer :

- les périodes d'accumulation de sédiments, avec leur épaisseur et leur taux d'enfouissement correspondant, responsables d'une expulsion d'eaux interstitielles,
- des périodes d'érosion susceptibles d'avoir amené des eaux de chimisme différent.

Pour répondre à ces questions, le BRGM s'appuie sur sa connaissance de la géologie du Bassin de Paris et sur une réflexion approfondie de la problématique et des moyens à mettre en œuvre. La compréhension des caractéristiques chimiques et physiques des différents types d'eau contenus dans les argilites du site de l'Est passe aussi par l'analyse des effets hérités du continuum de modifications liées à l'évolution géologique récente. Il s'agit en particulier des modifications pouvant influencer le système géochimique et hydrogéologique :

- mouvements verticaux et érosions associées ainsi que des modifications des contraintes tectoniques,
- conséquences de la succession des cycles climatiques glaciaire-interglaciaire.

Les avancées sur ce thème permettront de mieux répondre aux questions qui se posent sur les caractéristiques à attribuer aux argilites sur de très longues périodes de temps.

Ce volet des travaux repose sur l'exploitation des données et modèles géologiques les plus récents, et des études en cours sous initiative de l'ANDRA pour les thèmes de géoprospective. Dans une première phase, l'apport du BRGM se situerait au niveau d'une analyse critique de l'état des connaissances et hypothèses plausibles sur les évolutions des paramètres physiques et chimiques imposés par l'histoire géologique de la région en regard des réflexions sur les fonctions de transfert et sur les propriétés thermodynamiques de l'eau dans les milieux finement divisés.

La caractérisation des processus géologiques à l'origine des phases solides et éléments dissous, fait l'objet du projet SEDIMOR, démarré en 1999 pour une durée de 3 ans (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.7).

## Régulation de la composition et spéciation chimique du système eau interstitielle - roche (point 2.2 de l'accord).

A travers un ensemble cohérent d'études expérimentales et de réflexions théoriques sur les phénomènes de base, on proposera un modèle thermodynamique en vue d'estimer :

- la composition chimique des éléments majeurs et mineurs dans les eaux interstitielles des zones " non perturbées ", ainsi que les gammes de concentrations totales des éléments mobiles pour lesquelles le modèle est valable,
- la spéciation des composants géochimiques et radionucléides en trace pour les gammes de validité du modèle.

Les actions de recherche du BRGM sont organisées autour des questions clés suivantes :

- Comment caractériser, quantifier et classer le cortège de phases minérales présentes dans les échantillons de roche provenant de différentes régions de la formation hôte?
- Quelles lois d'action de masse (LAM) utiliser pour représenter les équilibres de dissolution-précipitation des phases minérales de la roche? Quelles base de données pour les phases " pures "? Comment déterminer ou estimer les LAM pour les phases minérales " mixtes, hétérogènes, solutions solides,... " ?
- Comment les déterminer pour les réactions de " sorption " (échange d'ion, complexation de surface) pour les composants géochimiques majeurs, mineurs et traces? Quelle stratégie expérimentale? Quelle stratégie de modélisation?
- Comment quantifier la teneur en composants dissous et/ou " labiles " dans la roche ? En particulier les cations et anions majeurs, le pH, pCO<sub>2</sub> et Eh.
- Quelle théorie utiliser pour calculer l'activité d'espèces chimiques en fonction des diverses conditions physiques au sein des argilites? Comment faire le " changement d'échelle " entre les informations chimiques (LAM, compositions totales) de systèmes dispersés afin d'estimer les concentrations totales et la spéciation des composants in situ ?

L'ANDRA souhaite que le BRGM assure le rôle de partenaire scientifique principal dans ce domaine de R&D.

La recherche d'un modèle thermodynamique de la composition des eaux interstitielles fait l'objet du projet THERMOAR démarré en 1998 pour une durée de 3.5 ans (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.8).

## État physique et transfert de masse de l'eau dans les argilites (point 2.3 de l'accord).

Cette partie à dominante expérimentale a pour objectif la mise au point de modèles phénoménologiques permettant la prise en compte correcte des effets de la distribution de l'eau et de ses caractéristiques physico-chimiques dans l'estimation :

- du transfert de l'eau interstitielle dans la roche quand elle est soumise à des champs de perturbations (gradients de force) engendrés par le stockage (capillaire, thermique, osmotique).
- du transfert de solutés dans les argilites,
- la composition chimique des eaux interstitielles.

Dans une première phase, une réflexion théorique serait menée sur les différents types d'eaux à identifier et les moyens techniques pour les caractériser à partir de la description de la "pé-

trofabrique" du matériau. Cette réflexion doit déboucher sur des propositions de méthodes innovantes pour caractériser ces eaux. A titre d'exemple la Résonance Magnétique Protonique (RMP) pourrait être utilisée pour estimer la répartition de l'eau dans les micro pores et nano pores de la roche, à la fois en galerie et sur carotte. L'apport du BRGM se situerait essentiellement, au niveau du traitement du signal RMP fourni par imagerie haute résolution, obtenue à travers des partenariats. Ces méthodes innovantes de caractérisation devront être calées par des techniques d'analyse thermique (ATD, ATG, Thermo-désorption isobare), réalisées pour certaines en partenariat. Ces techniques nous permettront d'accéder aux différents volumes concernés, et également, à la fonction de distribution en énergie des sites d'adsorption de l'eau.

En fonction des avancées scientifiques et méthodologiques obtenues, on peut envisager des actions destinées à améliorer nos capacités de prévoir le comportement global de la roche soumise aux perturbations de stockage (loi de désaturation/resaturation, effets géomécaniques..).

Le projet TRANSFAR, démarré en 1999 pour une durée de 3.5 ans, part de l'expérimentation pour aboutir à la mise au point de modèles phénoménologiques des interactions (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.9).

Le projet ALCAR démarré à fin décembre 1999, étudie les modifications d'ordre chimique, minéralogique, textural et géotechnique induites dans les argiles par l'hydratation d'ouvrages en béton (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.10).

Le projet GEOTHERM, démarré en 1998 pour une durée de 2 ans, vise à développer des méthodologies de détermination des compositions isotopiques dans les saumures et les minéraux, ainsi qu'à développer un géothermomètre applicable aux argiles (avancement des travaux en 1999 : cf. chapitre 3.11).

## 2.3- Programme scientifique d'accompagnement des laboratoires souterrains.

### objectifs généraux

*La réalisation de laboratoires souterrains dans des formations géologiques variées offrirait à la communauté des géosciences, l'opportunité de bâtir, en parallèle, des programmes scientifiques qui ne peuvent exister que par l'observation directe du bâti souterrain sur des longues durées. Ces possibilités n'existent pas dans les travaux souterrains traditionnels où l'urgence des réalisations condamne la mise en œuvre de phases d'observation scientifique.*

*Ainsi, un laboratoire en socle granitique constitue une opportunité unique pour développer un programme de recherche scientifique et technique ayant pour objectif une progression dans la connaissance et les méthodes d'études de socles.*

*Dans un laboratoire en terrain sédimentaire, une réflexion du même ordre sera menée, destinée à valoriser l'opportunité unique d'étudier des formations extrêmement peu perméables. En effet, le monde pétrolier, la géothermie, le stockage de gaz s'éloignent nécessairement de ce type de milieux très peu perméables.*

*Il s'agit ici d'organiser et d'animer un programme scientifique et technique qui pourra être réalisé dans les laboratoires souterrains, en accompagnement du programme propre de l'ANDRA. Des collaborations seront sollicitées auprès d'organismes de recherche nationaux et étrangers. Les liens scientifiques seront établis avec les programmes "géothermie profonde" et GéoFrance 3D.*

### **Programme d'accompagnement d'un laboratoire souterrain (point 3 de l'accord).**

La réalisation de laboratoires souterrains offre une **opportunité unique** de développer un programme de recherche scientifique et technique ayant pour objectif une progression dans la connaissance et les méthodes d'étude du domaine souterrain. **Le projet a pour objectif l'organisation d'un programme scientifique et technique** qui pourra être réalisé dans les laboratoires souterrains, en accompagnement du programme propre ANDRA. Trois thèmes susceptibles de permettre des découvertes scientifiques et des développements technologiques seront abordés.

- **La modélisation prévisionnelle des caractères et des propriétés du domaine souterrain** : la caractérisation 3D des structures et des phénomènes géologiques en profondeur nécessite de pouvoir tester à différentes échelles et par différentes méthodes les représentations géométriques et dynamiques qui sont proposées.
- **Le développement méthodologique** : l'accès au laboratoire rendra possible de tester in situ des outils à finalités variées, aujourd'hui en cours de conception.
- **Le laboratoire souterrain, un site d'expérimentation scientifique et technique** : l'emprise des laboratoires souterrains permet d'envisager la réalisation de nombreuses expériences d'enregistrement et de simulation.

Le projet GRANITES, lancé au printemps 1999, consiste en une réflexion sur l'ensemble de des trois thèmes. En fait, son objectif est maintenant élargi, il déborde du cadre des formations granitiques, initialement assigné au projet : il porte sur l'ensemble des contextes géologiques envisagés (argiles notamment).

### **3. AVANCEMENT DES TRAVAUX PAR PROJET EN 1999**

L'avancement 1999 est présenté par projet, dans l'ordre d'apparition des thèmes dans le contrat de partenariat :

- |               |               |                |                |
|---------------|---------------|----------------|----------------|
| 1 - MODGEO,   | 2 - PALEOHYD, | 3 - CEZALLIER, | 4 - MODHYDRO,  |
| 5 - WELLTEST, | 6 - MECASYNT, | 7 - SEDIMOR,   | 8 - THERMOAR,  |
| 9 - TRANSFAR, | 10 - ALCAR,   | 11 - GEOTHERM, | 12 - GRANITES. |

### 3.1 - Projet MODGEO :

**"Modèles géologiques de fracturation des granites".**

***Chef de projet BRGM : A.Genter - Responsable ANDRA : P.Elion***

#### *Objectifs.*

Ce projet vise à compiler des données acquises sur la fracturation des granites et à en acquérir de nouvelles de manière à proposer des modèles géologiquement fondés quant à l'état de fracturation. MODGEO porte sur la caractérisation des fractures en surface ou à partir de données de sondage, en se focalisant sur l'analyse des propriétés géométriques des fractures à différentes échelles. On s'intéresse plus particulièrement à l'organisation des premiers réseaux de fractures et leur réactivation aux différents stades de l'histoire géologique des granites ; l'objectif est d'aboutir à la notion de séquences de fracturation et de cas extrêmes de fracturation. Cette démarche vise in fine à évaluer l'impact des réactivations successives sur les réseaux de fractures en termes d'espacement, de longueur et d'épaisseur du colmatage.

#### *Organisation du projet.*

Les Journées Scientifiques de 1997 sur le massif granitique de Charroux-Civray organisées conjointement par l'ANDRA et le CNRS, ont montré en outre, le rôle primordial des fractures en tant que vecteur potentiel des fluides. Les granites aujourd'hui à l'affleurement en France, c'est-à-dire ceux qui se développent dans les premiers kilomètres de la croûte, ont environ 300 Ma au minimum. Ils ont donc subi et enregistré une histoire tectonique polyphasée qui a généré des réseaux de fractures plus ou moins évolués voire complexes. L'évolution dans le temps de ces séquences de fracturation paraît difficile à déconvoluer directement sur de critères géologiques simples. Cependant, dans l'optique de mieux cerner les caractéristiques intrinsèques de ces réseaux, il paraît possible d'étudier des cas extrêmes de fracturation sur des massifs bien affleurants ou bien documentés. Ces cas extrêmes sont sensés représenter des étapes clés dans l'évolution des plutons en relation avec des processus géotectoniques bien cernés. Par exemple, on peut chercher dans le cas des granites « évolués » à caractériser l'impact d'une tectonique extensive (graben) ou compressive (faille décrochante) sur un granite donné. Enfin, la comparaison entre plusieurs cas doit nous permettre de mieux comprendre des règles géologiques qui conditionnent l'organisation 3D des fractures et de préciser s'il existe une signature caractéristique d'une tectonique donnée.

Dans ce cadre, une étude sur la fracturation des granites, intitulée MODGEO, a débuté officiellement pendant l'été 1999. Elle fait intervenir des géologues familiarisés avec la thématique du milieu fracturé dans les granites et les réservoirs géothermiques ou pétroliers ainsi qu'un expert en géostatistique.

#### *Cadencement des opérations.*

Les quatre tâches listées ci-dessous portent sur une période de réalisation de deux ans.

- Tâche 1 : **Séquences de fracturation**. Analyse bibliographique, compilation de données existantes et expertises de terrain de granites peu évolués (granites d'Arabie et de Sierra Nevada, USA) et de granites polyphasés (granite de Pyrénées). Application à des granites français (Massif armoricain et Massif central).
- Tâche 2 : **Échelles de fracturation**. Mise en forme et analyse de données structurales inédites sur des granites d'Arabie et des Pyrénées sur lesquels des données structurales du BRGM sont déjà acquises. Synthèse bibliographique sur les lois d'échelle dans les bassins et les socles. Étude de la longueur des fractures à l'échelle du terrain sur des granites expertisés.
- Tâche 3 : **Colmatage et chenalisation des fractures**. Prise en compte de données concernant les colmatages hydrothermaux sur les granites de Soultz et de la Vienne. Étude de la densité et de l'épaisseur cumulée des fractures colmatées ou non avec la profondeur. Étude de l'organisation interne des joints et des failles sur des granites affleurants.
- Tâche 4 : **Calibration de l'imagerie géologique**. Travaux effectués avec l'appui du programme **Géofrance3D** concernant l'acquisition et l'interprétation de données géophysiques (radiométrie, gravimétrie, aéromagnétisme) et de télédétection. Calibration de l'imagerie en termes de fracturation exploitation des données de pétrofabrication du granite du Mont Lozère, Comparaison des données structurales et d'imagerie avec validation de terrain. Élaboration de règles de calibration des outils mis en œuvre.

### Travaux 1999.

Les tâches 1 et 2 ont bien avancé en 1999 et les résultats sont résumés dans un rapport de synthèse qui va être disponible début 2000. Une comparaison exhaustive entre plusieurs sites granitiques français ou étrangers a été réalisée à différentes échelles. Sur ces sites, les deux principaux types de fracturation pris en compte sont les joints (mode 1) et les failles (mode 2). Le choix des sites à étudier a été conditionné par l'histoire structurale des massifs, de manière à définir des "cas extrêmes de fracturation". Plusieurs cadres géodynamiques différents ont donc été analysés : un granite crétacé formé consécutivement à une subduction continentale (Sierra Nevada, Californie, USA), un granite protérozoïque intrudant le socle métamorphique de la plate-forme arabe (granite de Qtan) et des granites tardi-hercyniens français repris dans l'orogène alpin et aujourd'hui dans des positions structurales très différentes (Soultz, Fossé rhénan ; Charroux, seuil du Poitou ; Bassiès, cœur des Pyrénées). On a étudié tout d'abord des cas simples représentés par les granites uniquement affectés par des systèmes de joints primaires n'ayant pas ou peu connu de rejeu conséquent (Sierra Nevada, Qtan). L'effet de tectoniques successives sur la réactivation des joints en failles a été ensuite considéré sur des granites français ayant subi des évolutions plus complexes. Les données ont été collectées sur des massifs granitiques très bien affleurants ou proviennent d'études par forages bien documentés.

La distribution des familles principales de fracturation reconnues dans ces différents granites est visualisée sur des profils 1D (Figure 1). Pour les granites considérés, on montre que l'organisation des fractures suit globalement deux grands comportements :

- une organisation hétérogène avec des « clusters » de fractures, visibles sur le terrain (Figure 2A) ou d'hélicoptère (Figure 2B), qui alternent avec des grands « blancs » de fracturation. Les sites de Qtan et de Soultz répondent à ces caractéristiques.
- une organisation moins hétérogène où les fractures sont plus régulièrement réparties le long des profils comme à Bassiès et à Charroux.

La tâche 3 a permis de comparer le colmatage des fractures dans deux forages profonds français (Soulitz, Charroux). La tâche 4 n'a pas démarré en 1999.

### Programme 2000.

Le programme 2000 correspond essentiellement pour le premier trimestre à la synthèse sous forme d'un rapport final de l'ensemble des travaux réalisés en 1999. La suite 2000 du programme de MODGEO devra être discutée avec l'ANDRA sur la base des résultats acquis la première année. Cependant, on envisage qu'une partie des opérations à mener sur la seconde partie de 2000, correspondre à des actions de communications auprès de la communauté scientifique sous forme de publications et de participation à congrès.

### Référence

Gros Y., Genter A. 1999 - Évolution de la fracturation dans le socle du seuil du Poitou, caractérisation structurale et organisation spatiale multi-échelle, In Étude du Massif de Charroux-Civray, Actes des Journées Scientifiques CNRS-Andra, Poitiers, 13 et 14 octobre 1997, *EDP Sciences*, Chapitre 4, pp. 105-143.

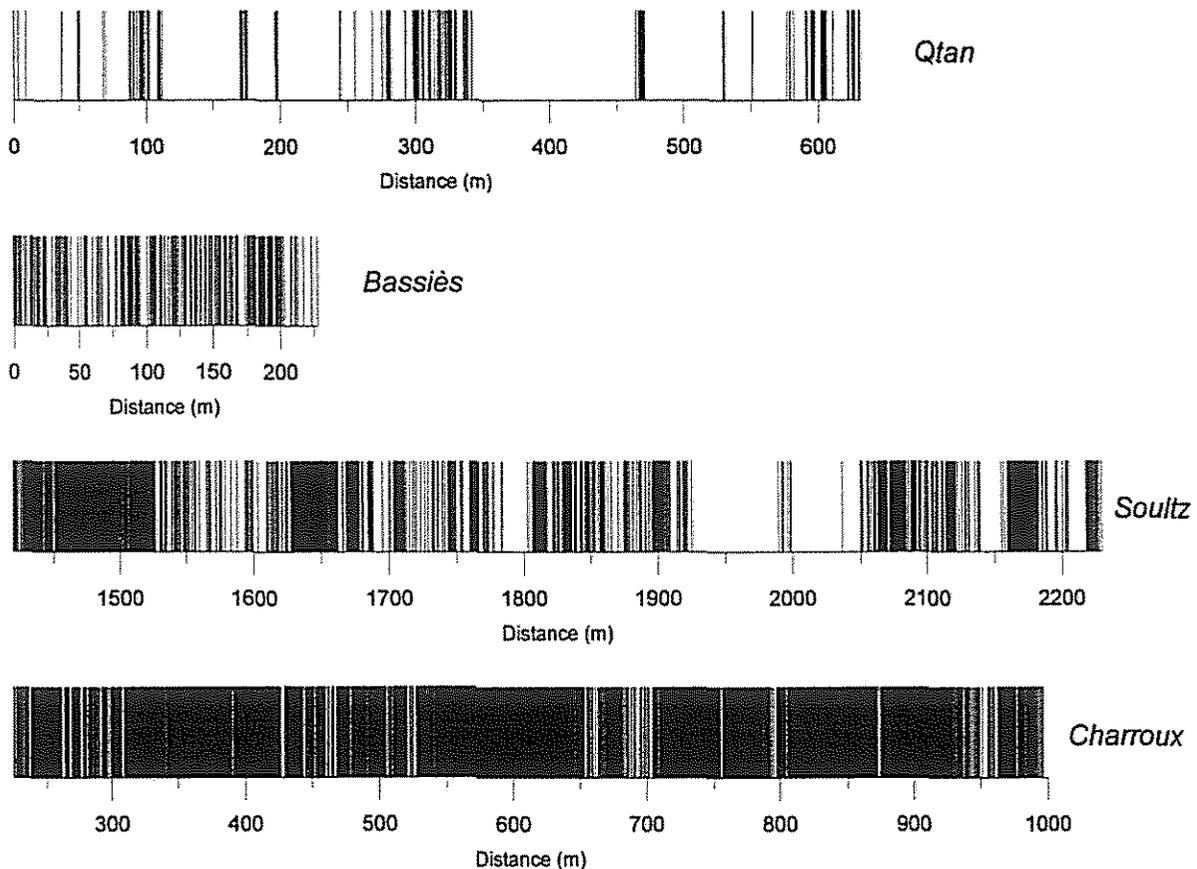


Figure 1. Profils de fractures relevées sur les différents granites. *1A*- Profil N20E sur les joints du le granite de Qtan. *1B* – Profil N100E des joints à Bassiès. *1C* – Sondage sub-vertical EPS1 de Soultz. *1D* - Sondage incliné CH212 de Charroux représenté horizontalement

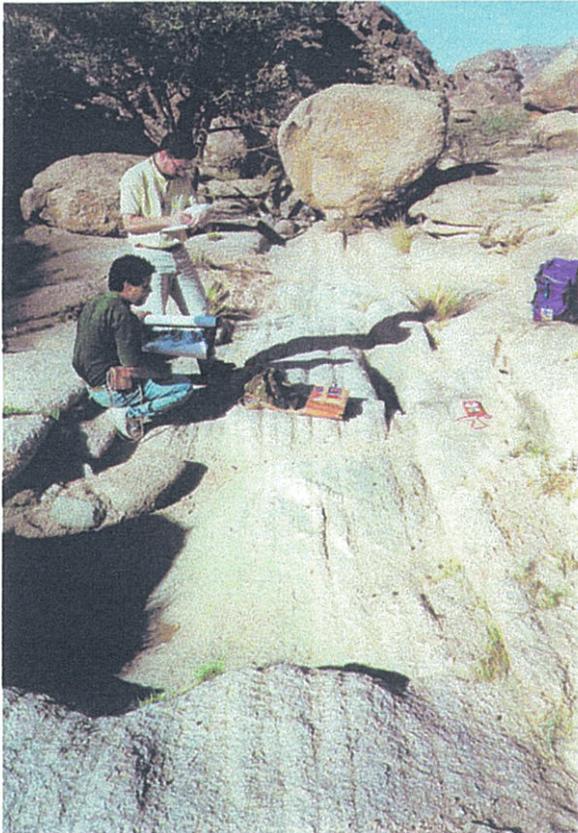


Figure 2. **2A**- Photographies de couloirs de joints N110E relevés dans le Jebel Qtan. **2B** – Vue d'hélicoptère des couloirs de joints N110E qui forment des vallées rectilignes dans la topographie

***Liste des acteurs du projet***

A. Genter – Chef de projet (CDG/MA)  
C. Castaing (CDG/CG)  
J.P. Chilès (CDG/MA)  
Y. Gros (ANTEA/STO)  
P. Ledru (CDG/MA)

### 3.2 - Projet PALEOHYD :

"Paleo-hydrogéologie et géoprospective : méthodes paleo-hydrogéologiques et leurs applications ; participation au projet CCE-EQUIP".

*Chef de projet BRGM : J.Casanova - Responsable ANDRA : J.F.Araniossy*

#### *Objectifs.*

Ce projet vise à développer les méthodologies minéralogiques, géochimiques et géochronologiques pour l'identification de l'impact des changements hydroclimatiques récents sur les carbonates internes et externes d'un site géologique fracturé. Il est appliqué à l'analyse de l'histoire géologique du seuil du Poitou depuis le dépôt de la couverture sédimentaire marine.

#### *Organisation du projet.*

Failles et fractures présentent généralement des minéralisations secondaires liées à des circulations de paléofluides. La caractérisation géochimique et la datation de ces minéraux donnent des pistes pour reconstituer la succession d'événements et comprendre les processus liés à leur mise en place. Le BRGM intervient comme partenaire de l'ANDRA dans le projet européen EQUIP : mise au point de méthodes géochronologiques sur les cristallisations récentes (derniers 300 000 ans), afin d'identifier les conséquences possibles de changements climatiques sur un site potentiel de déchets radioactifs. Cette activité est incluse dans la présente recherche.

#### *Cadencement des opérations.*

- Tâche 1 : bibliographie sur les informations disponibles concernant l'historique hydroclimatique de la Vienne depuis la dernière transgression marine.
- Tâche 2 : synthèse des connaissances (en terme de problèmes non résolus) et des hypothèses (en termes de processus) sur les données géochimiques acquises à partir des minéralisations caractérisées dans les sondages carottés du site ANDRA de la Vienne.
- Tâche 3 : prospection, échantillonnage de systèmes carbonatés de surface (travertins...), pour en tirer des informations sur les compositions passées des eaux de surface.
- Tâche 4 : adaptation aux milieux carbonatés des méthodes géochronologiques basées sur les chaînes de désintégration uranium, thorium, plomb en passant par le radium, le palladium, le protactinium (plus l'utilisation du  $^{14}\text{C}$ ). On doit vérifier expérimentalement la faisabilité et l'efficacité de la mise en œuvre de ces méthodes.
- Tâche 5 : obtention de données sur des paléo-carbonates de surface chronologiquement calés sur la période 0-300 000 ans.
- Tâche 6 : modélisation de la réponse des processus hydrologiques à l'évolution des forçages externes, à l'aide de graphes de causalité.
- Tâche 7 : validation des possibilités de projeter dans le futur, les processus paleohydrologiques.
- Tâche 8 : valorisation des résultats (publications, comités, congrès).

### **Rappel sur les travaux 1998.**

Compte tenu de la date effective de démarrage, l'engagement 1998 est resté de l'ordre de 3 mois (pour plus de détails, voir rapport d'avancement 1998). Les travaux suivants ont pu être initiés :

- démarrage de la tâche 1 : bibliographie et réflexions méthodologiques. Recherche bibliographique et sélection de sites régionaux de carbonates de surface.
- démarrage de la tâche 2 : analyse des hypothèses sur la caractérisation hydrogéochimique du site.
- démarrage de la tâche 3 : échantillonnage de fluides de subsurface, de fluides de surface et des carbonates dans la région du seuil du Poitou ; repérage de grottes du Périgord pour une étude multi-isotopique de spéléothèm.
- La systématique isotopique du strontium ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) a été appliquée aux eaux, carbonates et oxydes des sources minérales du Cézallier.

### **Travaux 1999.**

Les travaux suivants ont été réalisés :

- **Tâche 4** : adaptation aux milieux carbonatés des méthodes géochronologiques (fig.3).

Les carbonates (en fait les carbonates de calcium) sont classiquement considérés comme les matériaux les plus appropriés à la datation U/Th et U/Pa. En fait, ceci doit être très nettement nuancé. La richesse supposée des carbonates en U et l'absence de Th (dans les carbonates "propres") est surtout une caractéristique des coraux.

En dehors du cas particulier que constituent les coraux, les carbonates n'apparaissent pas particulièrement riches en U: souvent la concentration est inférieure à 1ppm (contre 2,8 ppm en moyenne pour la croûte continentale supérieure). Les spéléothèmes sont souvent présentés comme l'équivalent des coraux en contexte continental. Cependant, leur concentration en U est en général de quelques centaines de ppb, 10 fois moins environ que les coraux. Les coquilles d'origine marine et continentale ont des concentrations en U de l'ordre de quelques centaines de ppb. Les travertins ne semblent pas plus riches (autour de 100 ppb). Les cristaux de carbonates de fractures sont en général encore plus pauvres mais ce n'est pas systématique, ce qui peut poser de très sérieux problèmes analytiques. On peut se demander si les carbonates "sales" ne constituent pas des matériaux finalement plus adéquats, en ce sens qu'ils contiennent certes du Th détritique, mais aussi des quantités notables d'uranium qui peuvent théoriquement permettre des datations relativement fiables par isochrone.

Un autre défaut des carbonates est que l'uranium reste mobile après le dépôt/cristallisation et ce jusqu'à la phase de diagenèse précoce. C'est donc l'âge de celle-ci qu'on déterminera en premier lieu sur les carbonates déjà diagénétisés. En outre, le comportement des carbonates de calcium vis-à-vis de Th est encore très mal connu. Il est admis que tout Th présent dans un carbonate est forcément d'origine détritique, du fait du rayon ionique et de la valence (4+) de l'ion Th, qui semblent lui interdire d'intégrer le réseau des carbonates. Or ceci n'est pas évident du tout au vu de certains résultats d'analyse de carbonates en U/Th (coquilles d'origine continentale, notamment). L'utilisation des carbonates continentaux en tant que matériel de datation par les chronomètres U/Th (et aussi U/Pa) implique donc au préalable une meilleure connais-

sance du comportement de ces matériaux vis-à-vis des éléments en jeu (Th, Pa notamment) Enfin, la richesse des carbonates en alcalino-terreux n'en font pas *a priori* des matériaux aptes à l'utilisation des chronomètres Th/Ra.

- **Tâche 8 : diffusion des résultats**

- Présentations à congrès:

NEGREL, Ph., CASANOVA, J., KLOPPMANN, W., ARANYOSSY, J.F. 1999. Origin of deep saline groundwaters in the Vienne granitoids (France); constraints inferred from strontium and boron isotopes. European Union of Geosciences Strasbourg, 1999, Journal. of Conference Abstracts, vol 4, n°1, p 520.

NEGREL, Ph., CASANOVA, J., KLOPPMANN, W. 1999. Paléocirculations dans le socle de la Vienne : Géochimie isotopique des fluides et des cristallisations de fracture. Journées Scientifiques de l'ANDRA, Nancy, 1999.

KLOPPMANN, W., NEGREL, Ph., CASANOVA, J., GIRARD, J.P. 1999. Évidences chimiques et isotopiques (B, Sr,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) dans la minéralisation des eaux profondes du socle de la Vienne : Composante marine et interaction roche-eau. Journées Scientifiques de l'ANDRA, Nancy, 1999.

- Articles dans des revues de diffusion internationale :

CASANOVA, J., NEGREL, Ph, KLOPPMANN, W., ARANYOSSY, J.F. Origin of deep saline groundwaters in the Vienne granitoids (France). Constrains inferred from Boron and Strontium isotopes. Geofluids. en préparation. Cet article doit être soumis courant 1er trimestre.

NEGREL, Ph., CASANOVA, J., ARANYOSSY, J.F. Strontium isotope studying the origin of fluids in the Vienne Granitoids, France. Applied Geochemistry. en préparation. Cet article est en cours de relecture et doit être soumis en fin du 1er trimestre.

### *Liste des acteurs du projet*

- J.Casanova (chef de projet) EAU/GRI
- Ph. Négrel EAU/GRI
- W.Kloppmann EAU/GRI
- L.Chéry EAU/GRI
- C.Innocent ANA/PEA
- M.Brach ANA/PEA

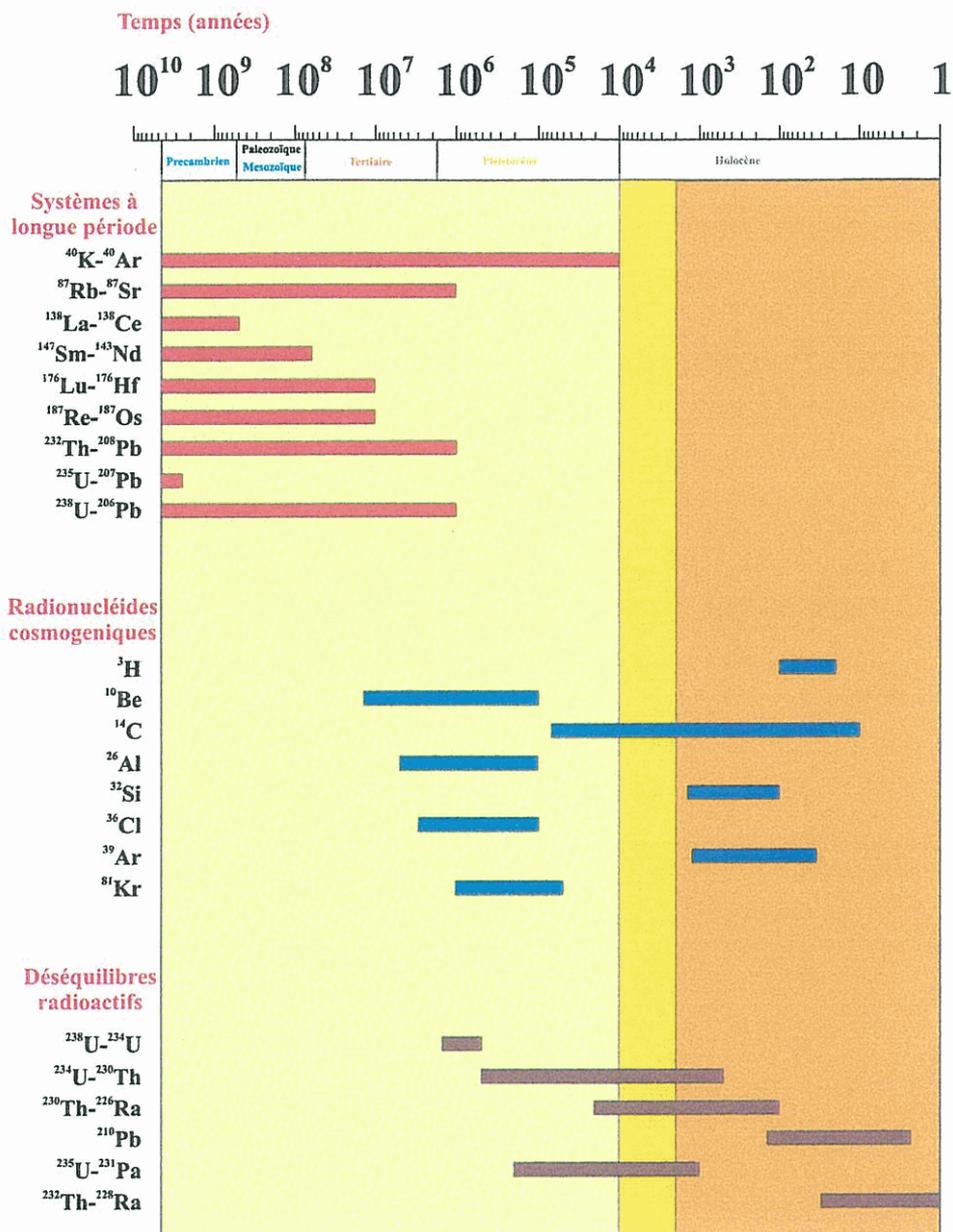


Figure 3. Radiochronomètres isotopiques les plus utilisés et gamme d'âge moyenne

### 3.3 - Projet CEZALLIER :

**"Étude de la mobilité d'éléments chimiques dans des eaux soumises à des changements de conditions d'oxydation et de dégazage".**

**Chef de projet BRGM : Ph.Négrel - Responsable ANDRA : L.Griffault**

#### *Objectifs.*

Ce projet vise à mettre en évidence, par l'observation de systèmes naturels actifs (sources minérales et thermominérales), les mécanismes de piégeage d'éléments chimiques présents dans des eaux soumises à des changements de conditions d'oxydation et de dégazage. A l'émergence des sources, ces eaux se trouvent en déséquilibre vis à vis des conditions atmosphériques. L'oxydation et le dégazage causent la précipitation de composés amorphes et/ou cristallisés (notamment oxyhydroxydes de fer et carbonates). Au cours du rééquilibrage, la plupart des éléments chimiques présents en trace dans la phase aqueuse vont se distribuer entre la solution et les différents composés précipités.

#### *Organisation du projet.*

Ce projet est réalisé dans le contexte du champ d'émergences du Cézallier où le BRGM travaille depuis une vingtaine d'années ; il porte sur l'observation des éléments trace suivants : Sn, Se, U, Th, Ce et Eu. Le suivi expérimental de la genèse de ces systèmes est mené, d'une part au laboratoire par essais en batch, puis par des tests dynamiques à l'émergence (transit par une cascade de réacteurs). A l'issue des expérimentations, ces dépôts font l'objet d'études minéralogiques et chimiques fines. L'ensemble des données est alors exploité pour construire un Simulateur Chimique Spécifique (SCS) suivant la technique mise au point par le BRGM avec CISI (sous environnement ALLAN NEPTUNIX). Ce SCS sert de base à l'élaboration d'un modèle couplé chimie-transport par la technique des Réacteurs En Réseau (RER) ; il est ensuite calé et validé sur les données acquises in situ. Enfin, le modèle couplé est validé par interprétation de comportements à des débits différents, et prêt pour l'extrapolation à des simulations de prédiction.

#### *Cadencement des opérations.*

Ce projet a démarré en octobre 1997 ; il est prévu de l'achever au premier semestre 2000, il comprend les cinq tâches suivantes :

- **tâche 1** : Synthèse des données minéralogiques et géochimiques acquises par le BRGM sur le site du Cézallier. Identification des pièges et des mécanismes de piégeage à partir de ces données.
- **tâche 2** : Acquisition des données de terrain complémentaires nécessitées par le simulateur chimique :

- ⇒ **sous-tâche 2.1** : prélèvement d'échantillons, avec mesure sur le terrain des paramètres non conservatifs.
- ⇒ **sous-tâche 2.2** : analyse de l'eau (majeurs et traces), analyse des phases amorphes et cristallisées ; minéralogie de ces phases solides.
- **tâche 3** : Expérimentations en batch du déclenchement contrôlé de la précipitation d'eaux minérales prélevées in situ sous atmosphère inerte. Ces essais sont réalisés sous pression contrôlée (N<sub>2</sub> et/ou O<sub>2</sub>) ou bien en réacteur ouvert à l'atmosphère.
- **tâche 4** : Expérimentation dynamique à l'émergence par circulation dans une cascade de réacteurs, suivant un protocole et un dimensionnement déterminé par des tests en laboratoires. En fin d'expérimentation, des échantillons de la phase aqueuse et de phases solides, sont prélevés et analysés : chimie totale, MEB, microsonde, rayons X.
- **tâche 5** : Modélisations géochimique et modélisations de type "réacteurs en réseau" (RER) :
  - ⇒ conception d'un modèle de comportement à partir d'une réflexion sur les données acquises,
  - ⇒ élaboration du Simulateur Chimique Spécifique (SCS),
  - ⇒ calibrage du SCS sur les données des essais en batch,
  - ⇒ élaboration du modèle RER.

### *Travaux réalisés à fin 1999.*

#### Impact des sources minérales carbogazeuses du Cézallier sur les sols avoisinants

Les sols et sédiments avoisinants 3 sources minérales du Cézallier ont été échantillonnés le long de transepts. Les analyses chimiques et minéralogiques montrent que ces eaux enrichissent, lors de leur remontée, les sols et sédiments en Ca et en Fe par rapport à la roche mère. Ces enrichissements s'expriment par des cristallisations de calcite, d'aragonite et d'oxyhydroxydes de fer plus ou moins bien cristallisés. Phosphates et arsenic sont accumulés avec les oxydes alors que le manganèse accompagne les carbonates. Un schéma de fonctionnement du système source-sol-sédiment a pu être proposé

#### Caractérisation physico-chimique des phases solides précipitant aux émergences des sources minérales du Cézallier

L'émergence à l'atmosphère des eaux carbogazeuses des sources minérales du Cézallier se traduit par la précipitation de phases solides constituées essentiellement de carbonates et d'oxyhydroxydes de fer. Les carbonates cristallisent essentiellement sous forme de calcite et concentrent Sr, Mg et Mn. Les résultats obtenus par diffraction des rayons X et analyse thermique sont concordants quant à la nature des oxydes de fer, mal cristallisés et fortement hydratés. Ils sont chargés en Ca, Al, Si, As et présentent des teneurs non négligeables en SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub> et terres rares. Un faible pourcentage de fer est sous forme FeII. L'étude microscopique a montré que ces oxydes sont en fait des agglomérats de particules plus petites. Les surfaces spécifiques des agglomérats sont comprises entre 30 et 145 m<sup>2</sup>/g avec une dispersion des valeurs d'un groupe de sources à l'autre. Les résultats des analyses de surface (spectroscopie ESCA) et des cartographies élémentaires (microsonde électronique) plaident en faveur d'un mécanisme d'association entre Fe, As et PO<sub>4</sub> résultant d'un processus de coprécipitation.

### Expérimentations de laboratoire

Parrallèlement au travail de caractérisation décrit ci-dessus, des essais de laboratoire ont été effectués pour étudier le piégeage d'un certain nombre d'éléments traces lors de la précipitation des phases solides liées à l'oxydation et au dégazage des eaux du Cézallier (exemple de composés précipités mal cristallisés : figure 4). Ces éléments sont l'arsenic et 6 éléments demandés par l'ANDRA : Sn, Se, U, Th, Ce, Eu. Les résultats montrent qu'il existe un piégeage important pour la totalité des éléments étudiés, et ce plus particulièrement pour les Terres Rares (exemple de U, Th et Sn, figure 5). Pour les éléments tels que l'uranium, l'arsenic ou encore le sélénium, le piégeage est fortement influencé par le pH qui augmente en cours d'expérimentation du fait du dégazage progressif de la solution. Pour l'arsenic et le sélénium, on observe d'abord un phénomène d'adsorption suivi d'un relargage dans la phase aqueuse dû à l'augmentation du pH.

### Expérimentation in situ

Pour compléter les expérimentations de laboratoire réalisées en système statique, une expérimentation in situ a aussi été réalisée de manière à explorer le fonctionnement des pièges oxyhydroxydes et carbonates sur système dynamique naturel. L'expérience a consisté à installer, sur site, une cascade de réacteurs placés en sortie immédiate de l'émergence. Les volumes de ces réacteurs ont été calculés de manière à ce que l'eau ait un temps de séjour croissant depuis l'émergence jusqu'à l'exutoire du système expérimental. Après l'atteinte d'un régime quasi stationnaire (absence de variation du pH dans les réacteurs), fluides et solides précipités ont été prélevés pour analyses chimiques, dans chacun des réacteurs. Les résultats de ces analyses sont en cours d'interprétation.

### Analyses de la base de données géochimiques obtenue à partir des eaux du Cézallier

Ce travail a consisté à mettre à jour et améliorer la base de données géochimiques des eaux du Cézallier intégrant à la fois les données rassemblées antérieurement et celles acquises dans le cadre de ce projet (fichier EXCEL). Ce travail a donné lieu à une analyse critique complète de la base de données.

## *Programme 2000.*

### Modélisations

Les résultats obtenus vont maintenant permettre de finaliser le simulateur chimique du système en intégrant à la fois la spéciation en phase aqueuse, les réactions de dissolution/précipitation ainsi que les réactions de sorption et coprécipitation. Cette dernière phase de l'étude est surtout destinée à valider la simulation de l'évolution chimique d'un tel système en dynamique et tester la capacité de prédire les interactions solide-liquide mises en jeu lors des processus de piégeage.

### Rapport final

Assemblage du rapport final par synthèse des rapports d'avancement, rédaction complémentaire et édition.

### *Liste des acteurs du projet*

- Ph. Négrel (chef de projet) EAU/GRI,
- Ph. Baranger EPI/ENV,
- F. Bodéan EPI/DEM,
- P. Conil EPI/ENV,
- C. Crouzet ANA/MSE,
- C. Le Guern EPI/DEM,
- B. Sanjuan ANA/MSE.

### *Références*

"Étude de la mobilité d'éléments chimiques dans des eaux soumises à des conditions de changements d'oxydation et de dégazage. Exemple du Cézallier. Caractérisation physico-chimique des phases solides précipitant aux émergences des sources minérales du Cézallier". Rapport d'avancement n°1, déc. 1998, référence DR/LPM 99/266.

"Caractérisation et suivi de la composition chimique des eaux du Cézallier. Expérimentation au laboratoire : précipitation contrôlée de carbonates et d'oxydes de fer après dopage des eaux naturelles en éléments trace (Terres Rares, As, Se, Sn, Th, U). Expérimentation in-situ." Rapport intermédiaire n°2, décembre 1999, référence EPI/DEM n° 99/234

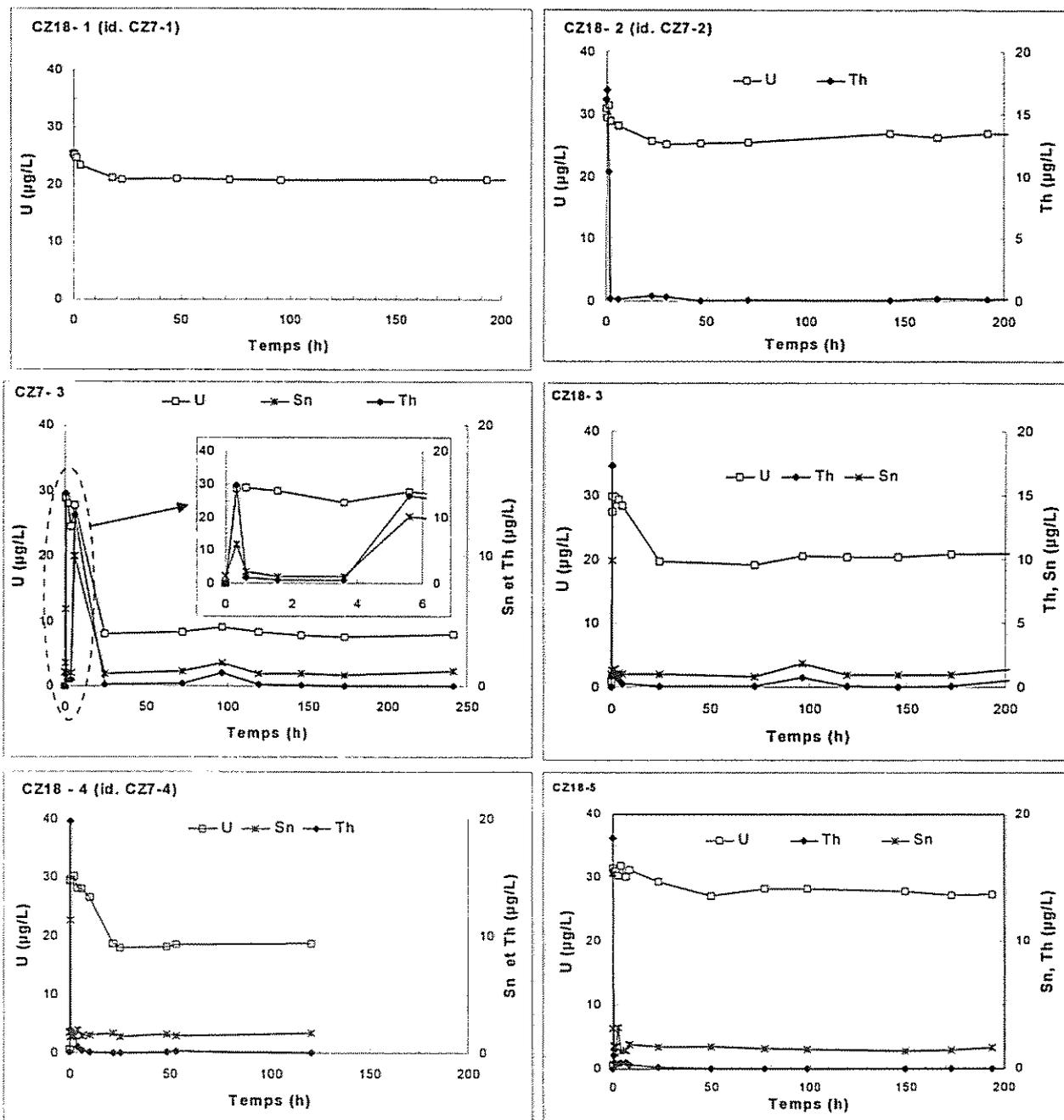


Fig.4 - essais CZ7 et CZ18 : suivi du piégeage de U, Th et Sn.

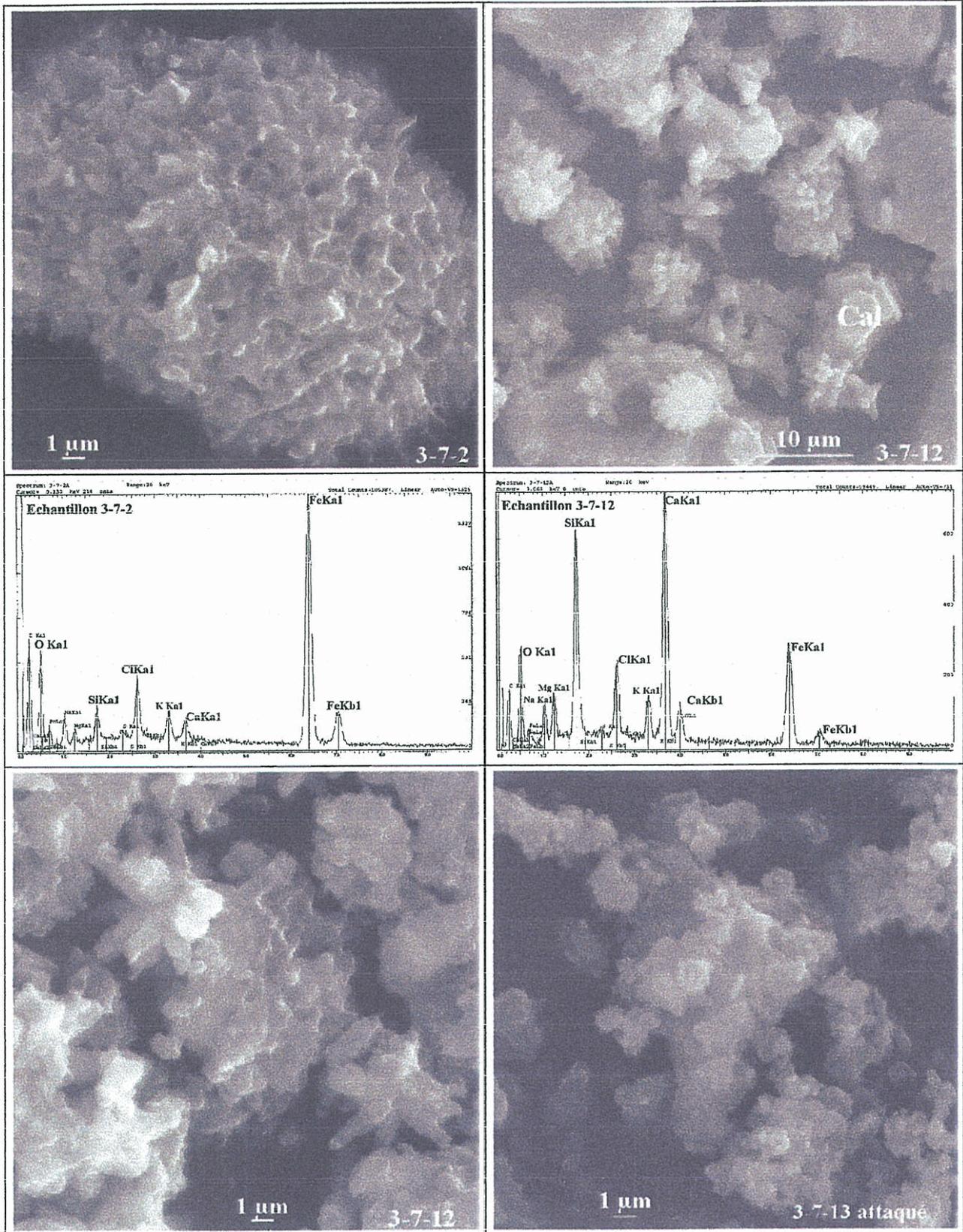


Fig.5 - essai CZ7 : mise en évidence d'encroûtements mal cristallisés, riches en Fe en début d'expérience, puis en carbonates.

### 3.4 - Projet MODHYDRO :

**"Modélisation hydrogéologique de domaines 3D à géométrie complexe, outil pour la génération des maillages et la préparation des données"**

***Chef de projet BRGM : A.Menjoz - Responsable ANDRA : E.Fillion***

#### ***Objectifs.***

Le contexte général est celui de l'exploitation des formations géologiques, soit pour leur aptitude au confinement (stockages), soit pour leurs ressources potentielles (ressources en eau, géothermie, déprise minière, impacts, etc.). La finalité à terme est la prévision par modélisation des transferts hydrauliques, thermiques et chimiques, associés à la présence et à la migration de l'eau. L'objectif spécifique du projet MODHYDRO est l'élaboration d'un logiciel permettant de passer des données physiques d'un ouvrage souterrain complexe et de son environnement naturel, à leur simulation numérique par un code aux éléments finis. Cet outil, dédié "métier" est appelé à une exploitation pratique à court terme. Sa fonction essentielle est d'aider le modélisateur en lui simplifiant la définition des données numériques nécessaires pour simuler les transferts dans des domaines 3D. La complexité du problème est liée à la prise en compte de deux types de besoins : l'intégration de la structure géométrique (fractures, galeries, puits d'accès, etc.) dans un processus de maillage automatique et l'affectation, en 3D, des paramètres et contraintes aux différentes entités élémentaires (points, lignes, surfaces et volumes). Cet outil doit assurer la production des fichiers de données nécessaires à l'exécution d'un code de calcul par éléments finis (Taffetas dans une première étape).

#### ***Organisation du projet.***

Les développements pratiques concernent la production d'outils logiciels sous la forme de pré-processeurs pour des codes de calcul existants (modèle par éléments finis à maillage non structuré). Ils sont issus de l'analyse des besoins communs (cahier des charges) de l'ANDRA et du BRGM dans le domaine de la modélisation des transferts au sein des milieux géologiques. Les travaux de R&D sur ce thème s'inscrivent dans une démarche essentiellement pratique, dédiée aux métiers de l'hydrogéologie et destinée à satisfaire les besoins évolutifs de l'ingénierie à court terme (2 à 3 ans). Le développement de l'outil s'appuie sur l'analyse des techniques algorithmiques existantes. Il est réalisé en langage objet (C++) afin de faciliter les évolutions ultérieures et de s'adapter sans trop de difficultés à d'autres domaines d'applications.

Ce travail s'inscrit également dans la continuité et le savoir-faire de travaux antérieurs du BRGM (1997-1998) : élaboration de l'interface WinTaff98 (pré-processeur du code de calcul Taffetas). Ce premier outil qui assure l'ensemble des opérations associées à une modélisation 2D ou stratifiée, a permis d'examiner les principales difficultés pratiques et les fonctions requises liées au traitement d'un contexte réel : il a constitué une base de référence pour préciser le type d'environnement attendu par l'utilisateur.

#### ***Cadencement des opérations.***

Au cours des six premiers mois du projet (1999) et à l'initiative de l'ANDRA, une audition de la Commission nationale d'évaluation et une expertise externe du projet ont conduit à modifier le programme des travaux initialement prévus. Après analyse du cahier des charges de l'outil

et des spécifications globales de développement, le déroulement du programme a été segmenté en trois étapes, conduisant à trois versions successives de l'outil : le prototype d'évaluation (12 mois), la version bêta (12 mois) et l'outil finalisé éventuel (24 mois). Ces différentes versions de l'outil logiciel se caractérisent, au niveau des spécifications globales, par une complexité progressivement croissante des différentes fonctionnalités élémentaires (forme des objets retenus, hétérogénéités, optimisation, robustesse, etc.).

Les différentes tâches du projet de développement sont déduites de l'analyse fonctionnelle des besoins et des étapes de la démarche de l'utilisateur. Cinq fonctionnalités élémentaires principales ont été identifiées, qui comportent de nombreuses interactions mutuelles :

- **Tâche 1 : Saisie et traitement des contraintes géométriques imposées**

Cette fonction consiste, pour le système, à assister, contrôler et évaluer la saisie de l'opérateur, elle inclut plusieurs sous-tâches :

- Saisie des caractéristiques des objets sous la forme de primitives géométriques globales (failles, faciès, couches, puits, galeries, contours divers) dans les conventions spécifiques du métier
- Identification et caractérisation des primitives saisies
- Contrôle visuel interactif de l'assemblage des objets saisis
- Calcul des diverses intersections et restitution des primitives élémentaires (contraintes du moteur de maillage)
- Sauvegarde des objets et données issus de la saisie et du traitement

- **Tâche 2 : Maillage géométrique automatique du volume d'étude**

La tâche de réalisation du moteur de maillage comprend plusieurs sous-tâches :

- Maillage 3D contraint (tétraèdres puis hexaèdres)
- Affinement par insertion de points selon critères
- Lissage selon critères de forme
- Optimisation mémoire et vitesse

- **Tâche 3 : Paramétrisation du milieu, du maillage et du problème**

La tâche de paramétrisation comprend les sous-tâches :

- Saisie et affectation des paramètres physiques des matériaux
- Introduction des conditions aux limites et des fonctions puits/sources
- Introduction de la discrétisation temporelle et des options de calcul

- **Tâche 4 : Génération des fichiers de données et de contrôle**

- Sauvegarde du fichier des primitives imposées
- Génération des fichiers de données nécessaires pour le code de calcul

- **Tâche 5 : Visualisation interactive (données, géométrie, maillage, contraintes)**

Les fonctions de la visualisation interactive (sous-tâches) sont :

- Contrôle des primitives et de leurs intersections
- Visualisation du maillage généré
- Sélection des objets pour affectation des paramètres et conditions imposés

### **Travaux 1999.**

Les travaux dédiés à l'élaboration du prototype d'évaluation, d'une durée de l'ordre de 12 mois, s'étendent sur la période 1999-2000. Les travaux suivants, relatifs à l'élaboration du prototype d'évaluation, ont été réalisés en 1999 :

- **Synthèse bibliographique** : Le recensement et l'analyse préalable des travaux réalisés sur le thème de la génération de maillage a permis d'identifier une documentation très abondante, essentiellement à partir des sites spécialisés sur le réseau Internet. Cette activité de R & D s'est nettement amplifiée ces cinq dernières années en raison de l'accroissement et de la diversité des besoins. Les techniques analytiques proposées, bien que performantes, demeurent spécifiques aux domaines d'application de chaque auteur ou équipe. Les résultats de cette analyse qui recense les méthodes analytiques et les outils existants font l'objet du premier rapport du projet : "Analyse bibliographique des techniques de maillage géométrique 3D pour la modélisation hydrogéologique, Projet Modhydro – phase 1".
- **Saisie et traitement des contraintes géométriques imposées (tâche 1)** : la fonction de saisie des principales primitives globales, prévue au cahier des charges du prototype d'évaluation, a été intégrée à l'interface-utilisateur au moyen de fenêtres de dialogue selon les conventions du métier. Il s'agit de l'introduction des différents objets géométriques : failles planes, couches faciès, galeries et puits. Le calcul en 3D des intersections des diverses surfaces limites et la génération automatique des primitives élémentaires (contraintes imposées au moteur de maillage) constituent un traitement complexe dont la finalisation sera poursuivie en 2000.
- **Maillage géométrique automatique du volume d'étude (tâche 2)** : les fonctions et structures relatives au générateur de maillage 3D ont été implémentées et testées pour les structures géométriques simples prévues. La technique retenue comporte deux étapes : une tétraédrisation classique de Delaunay associée au respect des contraintes imposées, puis une décomposition des tétraèdres produits en hexaèdres.
- **Paramétrisation du milieu, du maillage et du problème (tâche 3)** : le démarrage de cette tâche a été limité à l'introduction des différents types de matériaux. L'affectation de ces derniers aux objets géologiques ainsi que le traitement des conditions aux limites associées aux surfaces feront l'objet de la poursuite du développement en 2000.
- **Génération des fichiers de données et de contrôle (tâche 4)** : dans cette première étape la génération des fichiers a été focalisée sur la sauvegarde des données saisies afin de faciliter la réalisation des tests sur les fonctions d'intersection et de visualisation.

### **Programme 2000**

Les principaux travaux prévus en 2000 consistent en l'achèvement de la première version de l'outil (prototype d'évaluation) selon les spécifications globales. L'examen de ce dernier doit permettre de préciser les conditions de réalisation de la seconde étape envisagée (version bêta, 12 mois). L'achèvement de la version prototype recouvre la finalisation des différentes tâches, de leurs interactions et des tests d'évaluation :

- Tâche 1 : Poursuite du traitement des intersections des primitives imposées et sauvegarde des données associées,
- Tâche 2 : Compléments sur l'implémentation du moteur de maillage automatique,

- Tâche 3 : Affectation des paramètres et conditions aux primitives globales,
- Tâche 4 : Génération des fichiers de données pour le code de calcul,
- Tâche 5 : Finalisation de l'interface et de la visualisation interactive,
- Tâche 6 : Réalisation des test et contrôles des composantes de l'outil, élaboration de la documentation.

### Liste des acteurs du projet

- Menjoz – chef de projet (EAU/M2H)
- E. Foerster (ARN/MSO)
- M. Garcin (ARN/LSU)
- M.L. Noyer (EAU/M2H)
- J.P. Sauty (EAU/M2H)
- P. Siegel (EAU/M2H)

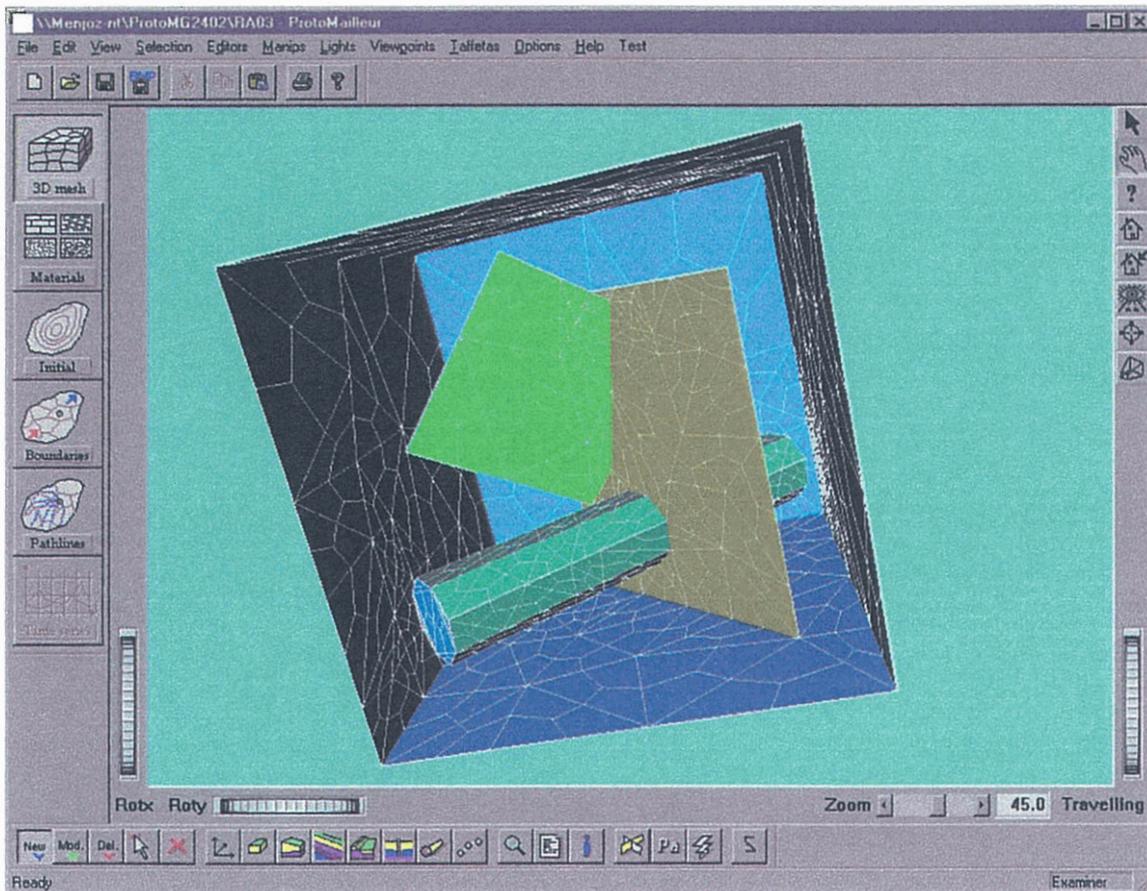


Fig.6 – Interface-utilisateur du prototype d'évaluation (projet Modhydro).

### 3.5 - Projet WELLTEST :

" Interprétation des essais d'eau en milieu fracturé ".

*Chef de projet BRGM : J.P.Sauty - Responsable ANDRA : E.Fillion*

#### *Objectifs.*

Pour contribuer à l'amélioration de la fiabilité de la prédiction des transferts au sein d'un massif fracturé peu perméable, on cherche à tirer un maximum d'informations de l'interprétation des essais d'eau dans ce type de formation. L'objectif est la connaissance de la structure du réseau de fractures et de ses caractéristiques hydrauliques, depuis le voisinage immédiat des ouvrages jusqu'à l'échelle globale du réservoir en passant par les échelles intermédiaires. Face à des situations type déterminées par géostatistique et face à des tests réels, on confronte entre elles les différentes méthodes d'interprétation afin d'identifier leurs performances et leurs limites respectives. On cherche à cerner les marges d'incertitudes sur les schémas identifiés et les conséquences de celles-ci sur la validité des prédictions.

#### *Organisation du projet.*

On procède à une analyse critique des différentes méthodes d'interprétation des pompages d'essai ainsi que des techniques d'essais d'eau spécifiques aux milieux fracturés : pulse, slug, pulsations harmoniques, tests entre packers, méthodes d'interférence... A l'aide de simulations numériques, on en discute les limitations, on examine la sensibilité des paramètres identifiés au choix du schéma et aux hypothèses simplificatrices.

Une investigation directe de la structure du milieu fracturé, par géostatistique sous conditionnement, suivie de simulations déterministes sert à représenter aussi fidèlement que possible (i) les fractures productrices au voisinage de l'ouvrage, puis à définir (ii) leur connectivité avec l'ensemble du réseau fracturé, ainsi que (iii) leurs connexions locales avec les réseaux de petites fractures susceptibles de fournir un apport capacitif (double porosité). Les lois de distribution résultent des modélisations géologiques bâties à partir d'observations sur le site même ou, à défaut, dans un contexte géologique analogue.

Les limites d'applicabilité des solutions analytiques sont alors testées dans des configurations parfaitement définies, par l'interprétation de données générées numériquement à l'aide de simulations déterministes et stochastiques couplées. L'ensemble de ces techniques sera alors appliqué à l'interprétation d'essais d'eau réels en formation granitique, sélectionnés en concertation avec l'ANDRA.

#### *Cadencement des opérations.*

- **Tâche 1**, bibliographie : état des connaissances sur les méthodes d'interprétation des essais d'eau avec une attention marquée pour les méthodes plus particulièrement appliquées aux milieux fracturés ; synthèse bibliographique sur les méthodes stochastiques d'approche de la fracturation.
- **Tâche 2**, analyse de sensibilité : une analyse de sensibilité des solutions analytiques a pour but de fournir une estimation de l'erreur commise en fonction de l'écart aux hypothèses simplificatrices sur lesquelles elles reposent. On examine ensuite

les conséquences sur les calculs de prédiction, de cette erreur entachant les paramètres identifiés.

- **Tâche 3**, géostatistique et géologie structurale : on identifie dans un ou deux contextes granitiques, les structures naturelles de milieux fracturés auxquelles on risque d'être confronté.
  - ⇒ **sous-tâche 3.1** : la description du réseau de fractures à partir d'observations en forage, en galerie et aux affleurements, jointe à l'analyse des géologues structuralistes produit les éléments pour élaborer des modèles stochastiques numériques de la géométrie du réseau. La simulation déterministe des écoulements dans un réseau de fractures connu, à l'aide d'un modèle hydrodynamique sert alors à reproduire la réponse à un essai d'eau.
  - ⇒ **sous-tâche 3.2** : les modèles stochastiques de la sous-tâche précédente servent à construire une série de structures type en fonction de leur fracturation au voisinage d'un ouvrage, à grande distance et aux échelles intermédiaires. Des abaques de réponse aux tests hydrauliques sont construites dans ces configurations ; on en recherche des caractéristiques spécifiques.
  - ⇒ **sous-tâche 3.3** : analyse par les méthodes classiques de quelques unes de ces réponses qui correspondent à des cas type pour lesquelles les paramètres de la solution numérique, réputée exacte, sont connus ; discussion des résultats.
- **Tâche 4**, interprétation de tests hydrauliques : interprétation de tests hydrauliques effectivement réalisés dans un massif fissuré ; application de l'ensemble des connaissances acquises au cours de l'étude. L'identification des paramètres est doublée d'une évaluation des incertitudes et de la possibilité d'interprétations multiples en fonction du schéma sélectionné. Rédaction du rapport final ; celui-ci conclut sur une série de recommandations quant au choix de la méthode d'interprétation.

### *Travaux réalisés à fin 1999.*

Les contraintes de programmation n'ont permis d'engager qu'une partie de la tâche 1 en 1998 ; la décision de poursuivre ayant été différée à novembre 1999, (i) les bibliographies ("interprétation des essais d'eau" et "approche stochastique") n'ont été achevées qu'en fin d'année 1999, (ii) les études de sensibilité débordent sur 2000 et (iii) l'approche structurale et géostatistique a été lancée début 2000.

### Bibliographie (Tâche 1)

L'étude bibliographique sur l'interprétation des "essais d'eau" démarrée en 1998 a été achevée en 1999 : solutions en milieu homogène, influence des limites et d'hétérogénéités, effet de capacité du puits, effet de skin, remontée après arrêt des pompes, aquifères multicouches, fracture unique horizontale, verticale ou inclinée, schéma à écoulements de dimension non entière, double porosité, graphes diagnostiques et dérivées semi-logarithmiques, tests par choc hydraulique et essais à variation périodique, influence de l'historique du forage avant le test, caractérisation des fractures à partir des diagraphies de fluide. Le rapport sur cette bibliographie présente les schémas de principe, les équations et abaques ; par ailleurs, il indique le passage entre notations des hydrogéologues et notations pétrolières ainsi que les correspondances entre paramètres adimensionnels. Le rapport a été rédigé ; il est en cours de relecture par les coauteurs (février 2000).

La bibliographie sur l'approche statistique a également été achevée à fin 1999. Le rapport final, actuellement en phase de relecture, part des différents modèles stochastiques de la géométrie d'un réseau de fractures et de la morphologie de chaque fracture individuelle ; il aboutit au traitement des écoulements : seuil de percolation, connectivité du réseau, canalisations des fractures, milieu continu équivalent, dimensions d'écoulement et il aborde les problèmes posés par l'inversion. A titre de référence, une annexe fait le point sur l'application, maintenant classique, de ces techniques aux écoulements en milieu continu.

#### Étude de sensibilité et incertitudes sur les prédictions (Tâche 2)

Des tests ont été menés sur l'amplification par la méthode des dérivées, d'un bruitage des mesures. Des simulations numériques à l'aide du code WINTAFF, ont permis de contrôler les solutions de la littérature pour une fracture unique sous différents angles d'inclinaison ; elles vont être généralisées pour des hypothèses moins simplificatrices. Des comparaisons (rabattements et fonctions dérivées) ont été effectuées entre deux modèles à double porosité. Des interprétations de données par différents schémas compétitifs montrent l'ambiguïté des interprétations et la nécessité d'une bonne connaissance de la structure géologique avant de choisir un modèle théorique.

#### *Programme 2000.*

- achèvement de l'analyse de sensibilité des solutions analytiques (sous-tâche 2.1),
- examen des conséquences de ces incertitudes sur les prédictions (sous-tâche 2.2),
- rapport de fin de tâche 2,
- approche structurale et géostatistique : analyse du réseau de fractures (sous-tâche 3.1),
- rapport d'une partie des travaux de tâche 3.1.

#### *Liste des acteurs du projet*

- J.P.Sauty (Chef de projet) EAU/M2H
- B.Bourgine CDG/MA
- J.P.Chilès CDG/MA
- A.Genter CDG/MA
- S.Gentier CDG/MA
- D.Guyonnet EPI/SYS
- A.Menjoz EAU/M2H
- P.Siegel EAU/M2H

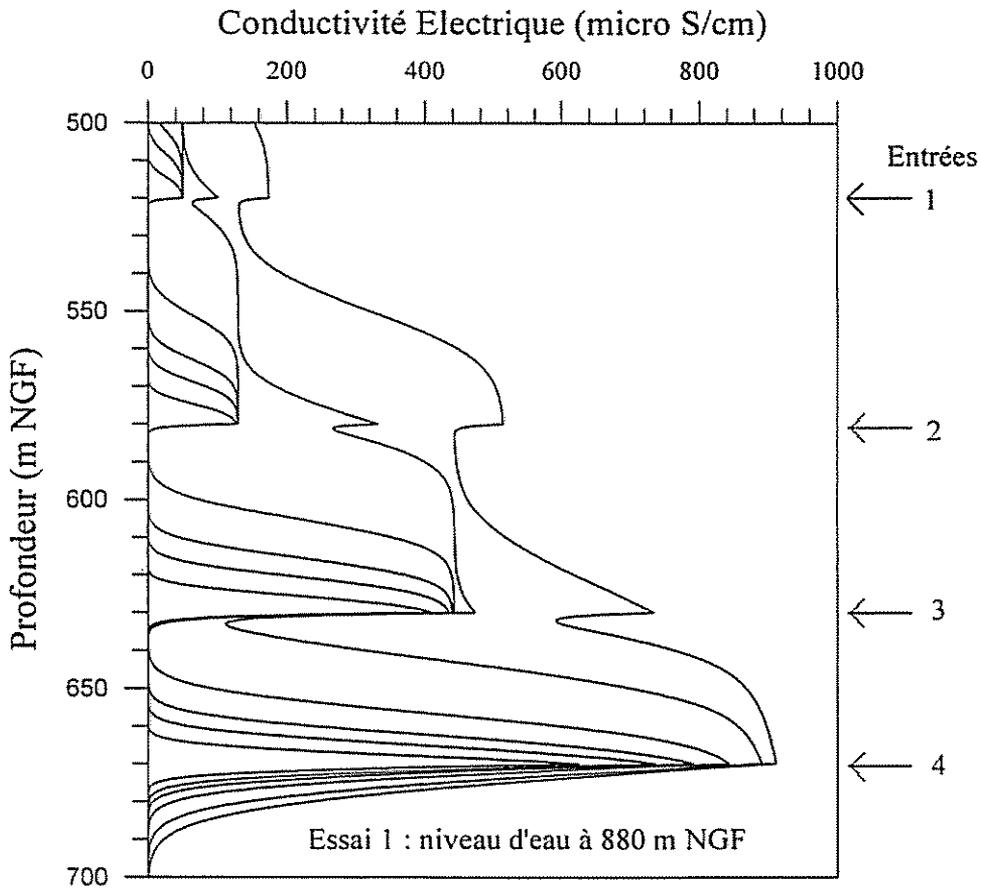


Fig.7 Utilisation des diagraphies de fluide : exemple de profil de conductivité électrique pour un forage d'eau intersecté par 4 fractures productrices.

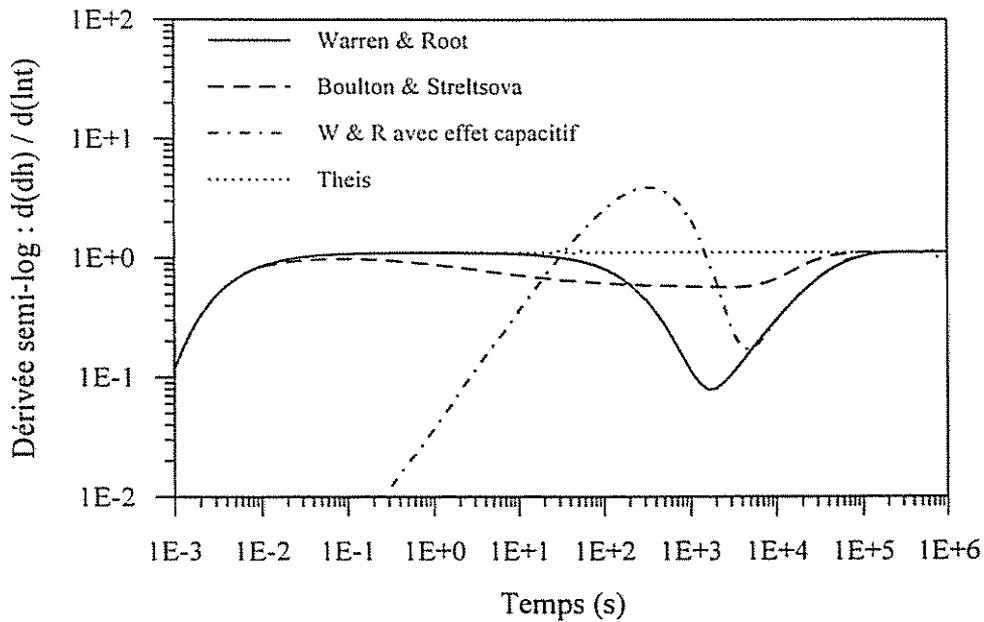


Fig.8 Comparaison des dérivées des modèles à double porosité, de Warren & Root avec ou sans effet capacitif et de Boulton & Streltsova.

### 3.6 - Projet MECASYNT :

" Comportement hydromécanique et modèles d'écoulement dans les fractures : synthèse ".

*Chef de projet BRGM : S.Gentier - Responsable ANDRA : P.Lebon*

#### *Objectifs.*

Compte tenu de la complexité des phénomènes entrant en ligne de compte et la quantité de résultats accumulés, l'objectif premier du projet est de faire le point sur les différents travaux (antérieurement) réalisés par le BRGM sur le thème du comportement hydromécanique d'une fracture et de les positionner clairement par rapport aux principaux résultats de la littérature.

Ceci passe dans un premier temps par la rédaction d'une synthèse des résultats dans la perspective de mettre en évidence les conclusions majeures acquises, les questions toujours en suspens et les questions nouvelles soulevées lors de ces travaux. Les sous thèmes définis s'appliquent aux domaines suivants :

- la morphologie des fractures (épontes et vide fissural) ;
- le comportement mécanique et hydromécanique en contrainte normale ;
- l'interaction chimique entre le fluide percolant et les épontes de la fracture pour différentes contraintes normales et températures ;
- le comportement mécanique et hydromécanique en cisaillement.

La synthèse de ces travaux sera complétée par une présentation des voies amorcées pour la modélisation du comportement mécanique et hydraulique.

Les résultats seront ensuite positionnés par rapport aux travaux des principales équipes travaillant dans ces différents domaines.

A l'issue de ce travail de synthèse, pourront être définies de nouvelles voies de recherche visant une meilleure compréhension et une meilleure formulation des lois de comportement hydromécanique d'une fracture.

#### *Organisation du projet.*

Le projet est organisé suivant deux voies principales : (i) effectuer une synthèse des travaux réalisés au BRGM entre 1986 et 1997, en faisant apparaître les différents problèmes rencontrés (résolus et non résolus) et les lacunes qui subsistent, (ii) situer ces travaux BRGM ainsi que la démarche adoptée par rapport à ceux des principales équipes de recherche travaillant sur ce sujet.

Il est prévu que ce projet soit réalisé sur une période de une année qui a démarré en août 1999.

### *Cadencement des opérations.*

#### Tâche 1 : Synthèse des travaux BRGM.

La réalisation de cette synthèse des travaux BRGM se décompose en trois sous-tâches en liaison avec les trois domaines physiques abordés, successivement ou en parallèle, lors des travaux de recherche :

- morphologie des fractures ;
- comportement hydromécanique en contrainte normale auquel sera associée l'interaction eau - roche dans les fractures ;
- comportement hydromécanique en cisaillement.

Pour conclure cette partie, les voies de modélisation amorcées reposant sur les travaux précédemment exposés seront présentées.

#### Tâche 2 : Positionnement des travaux et des résultats par rapport à ceux obtenus par les principales équipes de recherche sur ce sujet.

La mise en perspective des travaux et de la démarche du BRGM par rapport à ceux des autres équipes de recherche travaillant sur l'hydromécanique des fractures sera menée par une synthèse comparative des principales publications accessibles dans la littérature scientifique. L'aspect modélisation ne sera pas envisagé dans cette partie. L'accent sera mis sur les aspects expérimentaux.

Enfin, à l'issue de ces deux tâches, de nouvelles voies de recherche plus ciblées pourront être définies tant d'un point de vue expérimental que théorique.

### *Travaux 1999.*

La réalisation du projet a démarré à fin 1999. L'essentiel des travaux réalisés à ce jour portent sur la tâche 1 du projet et plus particulièrement sur le comportement hydromécanique. L'accent a été mis sur la relation qui peut être faite entre les résultats issus de l'analyse morphologique et le comportement hydraulique d'une fracture sous contrainte normale d'une part et en cisaillement d'autre part. Les principaux travaux intégrés à ce jour dans cette partie sont :

- thèse de S. Gentier ;
- thèse de E. Lamontagne ;
- Expérience FRABEX (HRL) - caractérisation en laboratoire d'une fracture ;
- Travaux sur l'interaction eau - roche dans les fractures (Contrat CEE) ;

Les différentes voies amorcées pour la modélisation concernant le comportement mécanique en contrainte normale et l'écoulement dans une fracture sont d'ores et déjà abordées.

***Programme 2000.***

La priorité est placée sur l'achèvement de la tâche 1 puis la réalisation de la tâche 2. La synthèse portant plus spécifiquement sur la morphologie des fractures est entreprise avec la reprise de travaux réalisés à des échelles métriques notamment et doit être poursuivie et approfondie en collaboration avec J. Riss de l'Université de Bordeaux.

***Liste des acteurs du projet***

S. Gentier – Chef de projet (CDG/MA)

J.Riss (Université de Bordeaux)

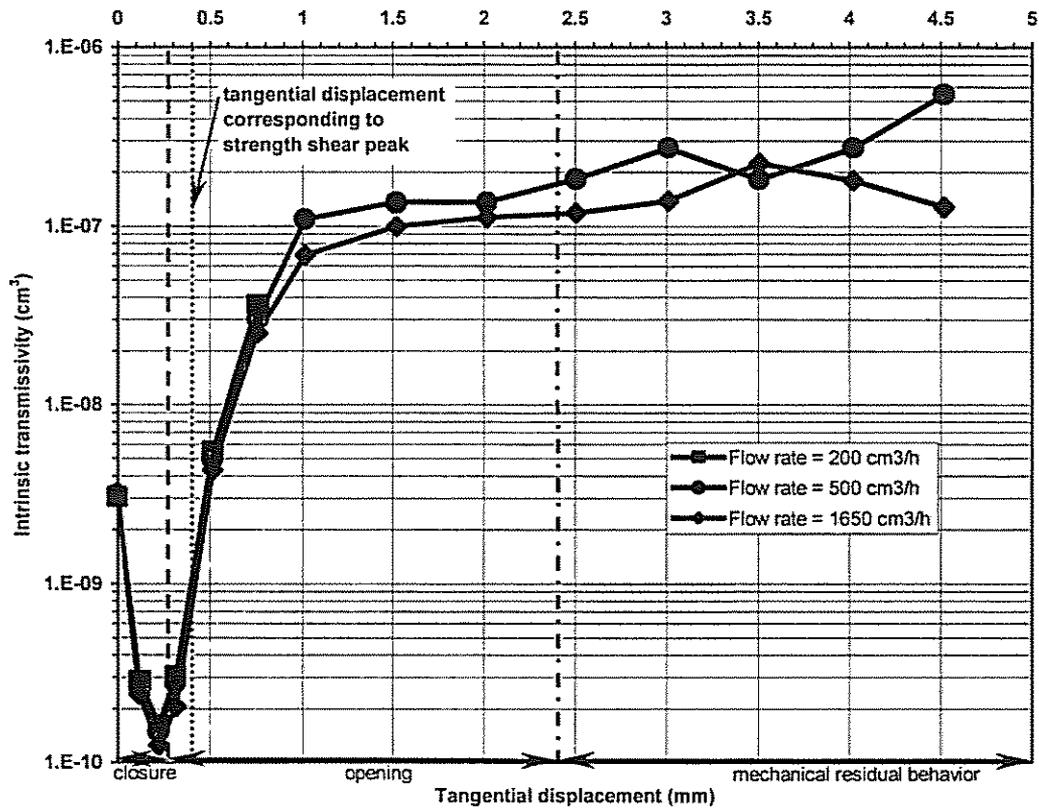


Fig. 9. Évolution de la transmissivité intrinsèque en fonction du déplacement tangential et des différentes phases du comportement mécanique en cisaillement

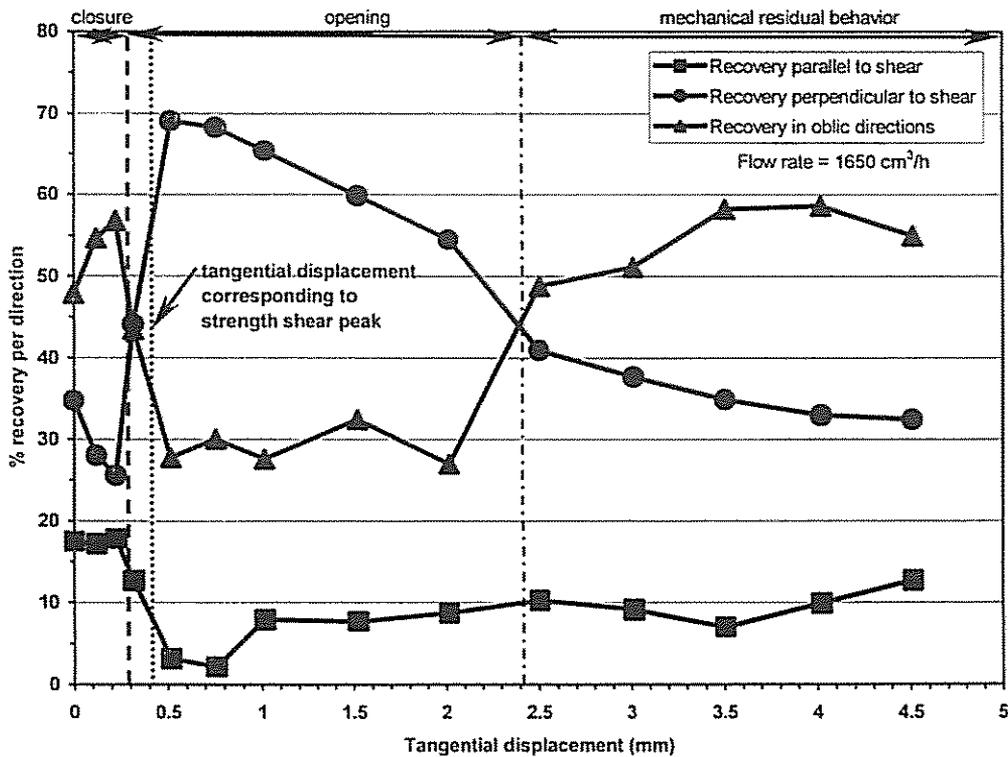


Fig. 10. Mise en évidence de l'évolution de l'organisation de l'écoulement dans le plan de la fracture en fonction du déplacement tangential

### 3.7 - Projet SEDIMOR :

" Apports de l'histoire géologique des argilites sur les interactions fluides-roches".

*Chef de projet BRGM : J.Casanova - Responsable ANDRA : P.Elion*

#### *Objectifs.*

Les objectifs principaux du projet SEDIMOR sont (i) de caractériser les processus géologiques et géochimiques à l'origine des phases solides et éléments dissous actuellement présents dans la formation hôte, et (ii) de caractériser et modéliser les processus potentiellement à l'origine d'interactions fluide-roche et mis en jeu dans l'histoire géologique régionale.

#### *Organisation du projet.*

Concrètement, il s'agit de :

- mieux comprendre l'enchaînement des événements géologiques régionaux ayant aboutis à l'état actuel de la couverture sédimentaire en général et des argilites Callovo-Oxfordienne en particulier ;
- créer un référentiel documenté à partir des sondages carottés permettant de poser les problèmes d'interprétation en termes concrets ;
- prendre en compte les processus d'interaction roche-eau, ayant affecté la couverture sédimentaire depuis le Callovo-Oxfordien, selon une méthode proche de celle de la modélisation par graphes de causalité de prédiction en vue de leur adaptation aux conditions de dépôt des argilites ;
- développer un modèle conceptuel permettant de décrire le système "**interactions fluides-roche**" dans le site de l'Est et de tester sa stabilité.

#### *Cadencement des opérations.*

Le projet comprend huit tâches à réaliser sur une période de trois ans. Ces tâches sont les suivantes :

##### Tâche 1 : État des connaissances disponibles sur l'histoire géologique régionale de la partie Est du Bassin parisien (France)

Cette tâche porte sur l'acquisition et le traitement des données bibliographiques en fonction de différents types de données géologiques : stratigraphie séquentielle, diagenèse précoce, reconstitutions paléohydrologiques déduites de proxy-data (pollen, sédimentologie, microfossiles...).

##### Tâche 2 : État des connaissances disponibles sur les forages carottés de l'ANDRA permettant la paramétrisation des processus roche-eaux

**Sous-tâche 2.1** Analyse critique des données géologiques et hydrogéochimiques obtenues lors de la foration des sondages carottés ; sélection des proxy-data.

**Sous-tâche 2.2** Bilan des carottes sédimentaires disponibles ou espérées dans un proche avenir, en vue du référentiel documenté décrit en tâche 4.

### Tâche 3 : Choix des processus intervenants sur l'évolution W/R régionale

L'identification et la caractérisation des processus mis en jeu lors des périodes d'accumulation de sédiments (subsidence-dépôt) ou, au contraire, d'érosion (uplift-émergence) susceptibles d'avoir permis l'introduction d'eaux au chimisme différent (eaux continentales). Le rapport décrira les procédures de sélection et donnera une liste de processus susceptibles d'avoir influencé les interactions roche-eau du site, depuis le Callovo-Oxfordien.

### Tâche 4 : Réalisation du référentiel documenté de la couverture sédimentaire

Établissement, à partir des sondages carottés, un référentiel documenté de la couverture sédimentaire incluant :

- (1) des profils de traceurs isotopiques ( $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{34}\text{S}$ ) permettant de reconstituer les conditions paléo-environnementales de dépôt ainsi que les interactions roche-eau syn- et post- sédimentaires à partir des carbonates et des sites de sorption des minéraux argileux.
- (2) un cadre chronologique relatif (stratigraphie) et absolu (calibration temps ; en fonction de l'état des connaissances), incluant notamment des inter corrélations et calage précis de la stratigraphie séquentielle du site par rapport à celle du Bassin Parisien.

### Tâche 5 : Identification et échantillonnage des séquences sédimentaires

Le projet s'attachera à localiser dans le temps et dans l'espace des séquences sédimentaires (incomplètes ou absentes dans le référentiel documenté) permettant de poser concrètement le problème de l'influence de tel ou tel processus particulier sur l'évolution des relations fluide-roche à l'échelle régionale.

### Tâche 6 : Modélisation orientée processus

La modélisation des processus constituant le système roche/eau sera effectuée selon une méthode proche de celle de la modélisation par graphes de causalité (domaine du Raisonnement Qualitatif en Intelligence Artificielle). L'objectif est de simuler la réponse d'un système hydrogéologique à l'évolution des paramètres de forcing externe à ce système.

### Tâche 7 : Description du système

Le croisement des deux approches, paramétrisation et modélisation, fournira les éléments de description du système roche/eau dans le site de l'Est, ainsi que la prise en compte des processus qui ont joué un rôle dans son évolution. L'étude des liens de causalité reliant ces processus permettra une analyse de sensibilité du système roche/eau aux différents phénomènes géologiques depuis le Callovo-Oxfordien.

### Tâche 8 : Valorisations R & D

Les résultats acquis sur la compréhension des processus d'interaction roche/eau à prendre en compte pour la prévision de la sûreté d'un site de stockage, seront valorisés par des rapports ANDRA-BRGM, ainsi que des présentations à congrès et des publications dans des revues internationales.

### **Travaux 1999.**

En 1999, les travaux suivants ont été réalisés :

#### Tâche 1 : État des connaissances

Le recensement des connaissances disponibles sur l'histoire géologique régionale de la partie Est du Bassin Parisien (France), a porté sur l'acquisition et traitement des données bibliographiques en fonction de différents types de données géologiques :

- stratigraphie séquentielle,
- diagénèse précoce,
- reconstitutions paléohydrologiques déduites de proxy-data.

#### Tâche 4 : Réalisation du référentiel documenté de la couverture sédimentaire

La présentation du référentiel référencé sous GDM (géologie, stratigraphie, géochimie) est en cours. Les échantillonnages effectués en 1999 sur HTM102 et HTM103 ont permis :

- la continuation des profils isotopiques  $^{18}\text{O}$  et  $^{13}\text{C}$  sur la phase carbonatée de la matrice
- la continuation des profils isotopiques  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$  sur le bulk matrice
- la continuation des profils isotopiques  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sur la phase carbonatée de la matrice
- la réalisation du profil isotopique  $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$  pilote sur la phase carbonatée de la matrice
- la réalisation du profil pilote Terres Rares et Néodyme sur le bulk matrice

#### Tâche 5 : Identification et échantillonnage des séquences sédimentaires :

Concernant la recherche des traces d'indication de migration de fluides de chimisme différent (eaux continentales), une action a été menée sur l'émersion fin Jurassique - début Crétacé. La paléosurface est reconstituée en utilisant les contours cartographiques de la base du Crétacé et les sondages de la Banque de données du Sous Sol. Les informations sont numérisées et traitées sous Mapinfo et GDM. Le territoire concerné s'étend de la carte de Verdun au nord à celle de Chablis au sud, soit sur 200 km d'allongement.

En octobre 1999, une campagne de terrain de la bordure orientale du Bassin de Paris, depuis Auxerre jusqu'à la frontière belge (Longwy), a permis d'effectuer une dizaine de sondages (de 2 à 9m) de reconnaissance. Les relevés de terrain ont été principalement orientés sur la recherche des périodes d'émersion fini-Jurassique-base Crétacé et Éocène, soulignées de paléoaérotations. Ces émergences ont eu pour conséquences, en créant des reliefs de modifier les polarités d'écoulement et les caractéristiques chimiques des aquifères.

#### Tâche 8 : Valorisations R & D :

La valorisation des résultats acquis sur la compréhension des processus d'interaction roche-eau à prendre en compte pour la prévision de la sûreté d'un site de stockage s'est concrétisée par la préparation des communications suivantes :

- Soumission à la revue Journal of Geology de l'article "*Callovo-Oxfordian clays (Meuse, France): Isotope geochemistry (O, C, Sr)*" Par Joël Casanova, Philippe Négrel, Jean-François Aranyossy and Jacques Brulhet (Article actuellement à l'ANDRA pour visa).

- Présentation à congrès : communication "*Callovo-Oxfordian argillites (Meuse, France) : Isotope geochemistry (O, C, Sr)*" par Joël Casanova et Philippe Négrel; acceptée par le Comité Scientifique du "3rd International Symposium on Applied Isotope Geochemistry", Orléans, 21-24/09/99, présentation orale dans la session "Sedimentary and diagenetic processes".
- Présentation à congrès : communication "*Échanges des fluides sédimentaires avec la matrice des argilites Callovo-oxfordiennes du site de l'Est*" par Joël Casanova, Philippe Négrel et Wolfram Kloppmann aux journées scientifiques de l'ANDRA (Nancy, 8-10/12/99) sous forme d'affiche.

### **Programme 2000.**

Le programme 2000 porte sur :

- l'achèvement des tâches 3 (caractérisation des processus) et 4 (référentiel documenté), avec production des rapports d'avancement correspondants.
- La continuation de la tâche 5 (identification des séquences sédimentaires) par l'analyse des indices de diagenèse dans le soubassement jurassique, la géométrie des surfaces d'érosion crétacé et éocène et la nature des profils d'altération portés par ces surfaces.
- Le démarrage de la tâche 6 (modélisation orientée processus)
- La production de publications scientifiques.

### **Liste des acteurs du projet**

- J.Casanova (Chef de projet) EAU/GRI
- Ph.Négrel EAU/GRI
- D. Giot SGR Centre
- Ph. Razin Université de Bordeaux
- J. Roger CDG/CG
- R. Wyns CDG/MA
- M.Garcin ARN/LSU
- C.Robelin ARN/LSU
- M.Brach SMN/MSE

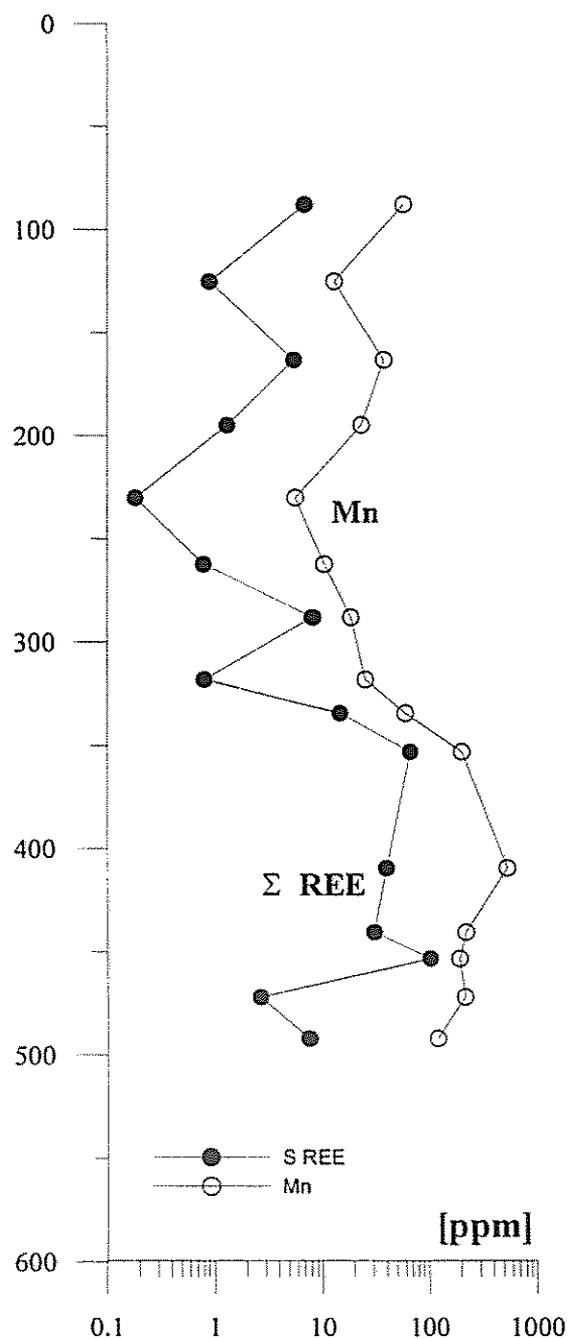


Figure 11- Sondage HTM102 : évolution dans le des teneurs en Terres rares ( $\Sigma$  REE) et man-ganèse (Mn) en ppm en fonction de la profondeur.

### 3.8 - Projet THERMOAR :

"Régulation de la composition et spéciation chimique du système eau interstitielle-roche".

**Chef de projet BRGM : E. Gaucher - Responsable ANDRA : L. Griffault**

#### *Objectifs.*

Ce projet vise à proposer et valider un modèle thermodynamique permettant de prédire la composition chimique en éléments majeurs et mineurs des eaux interstitielles d'une argile indurée. En effet ces eaux sont très difficiles à extraire du fait de la très faible perméabilité du milieu ; l'établissement de modèles géochimiques fiables permettrait de pallier aux difficultés d'échantillonnage des eaux. Mais la modélisation en est complexe du fait de la forte liaison de l'eau avec les minéraux et de la nature de ceux-ci, d'où le besoin d'un effort de recherche significatif (bibliographie, expérimentations, modélisations) pour déboucher sur des simulations crédibles.

#### *Organisation du projet.*

Le projet porte sur l'étude physico-chimique d'échantillons de roches, sur la composition des eaux interstitielles et sur les interactions chimiques entre les deux ; il combine recherches bibliographiques, réflexions théoriques et expériences de laboratoire sur des échantillons prélevés sur des sites (dont certains font l'objet d'autres études d'où des possibilités de comparaisons et de confrontations), pour concevoir et valider des modèles réalistes.

#### *Cadencement des opérations.*

- **tâche 1** : état des connaissances sur les eaux des argiles : réalisation d'une synthèse sur les stratégies possibles pour l'échantillonnage et l'analyse des eaux des argiles ainsi que pour leur modélisation géochimique.
- **tâche 2** : étude des argilites du tunnel du Mont Terri, sélectionnées et prélevées dans le cadre du projet TRANSFAR ; démarrage par l'identification de paramètres physiques (minéralogie, perméabilité, surfaces spécifiques) et chimiques.
- **tâche 3** : étude expérimentale sur échantillons de la signature géochimique des eaux interstitielles par deux méthodes mises en œuvre en parallèle : (i) lessivage des anions, (ii) déplacement des cations adsorbés à l'aide d'une molécule ayant une forte affinité pour les minéraux argileux.
- **tâche 4** : participation au groupe modélisation géochimique du projet Mont Terri.
- **tâche 5** : prise en compte de la stabilité des argiles présentes au sein de l'argilite ; expérimentations sur la dissolution de minéraux type avec suivi des reprecipitations éventuelles.
- **tâche 6** : étude expérimentale de la sorption sur les argilites. modélisations suivant plusieurs types de modèles; contrôle de la représentativité d'expériences réalisées sur des argiles modèles.
- **tâche 7** : recherche sur la faisabilité de l'extraction de l'eau des argiles en la déplaçant à l'aide d'un fluide très mouillant : enquête sur les fluides existants et expérimentations.

### **Rappel sur les travaux 1998.**

Le volume de travail initialement prévu a pu être réalisé, avec seulement quelques réorientations décidées en accord avec l'ANDRA, notamment du fait du report du projet TRANSFAR à 1999. Les travaux suivants ont été effectués :

- démarrage de la réflexion au sujet des essais sur les argilites (tâche 1) et de la rédaction concernant les stratégies de modélisation des eaux des argilites.
- prélèvement d'échantillons dans le tunnel du Mont Terri ; démarrage des analyses chimiques.
- expérimentations sur les argilites du Mont Terri (tâche 2) :
  - ⇒ premières mesures sur un échantillon de roche resté à l'air libre : caractérisation minéralogique par diffraction des rayons X, ATD/ATG.
  - ⇒ nouvelle série d'analyses minéralogiques et chimiques sur des échantillons conditionnés sur le terrain sous azote et conservés en boîtes à gants.
- démarrage en décembre d'expérimentations de lessivage des anions, de mesures des capacités réductrices des sédiments et dimensionnement des expériences de déplacement des cations avec la cobaltihexamine (tâche 3).
- participation au groupe de travail international du Mont Terri (tâche 4).
- expériences de sorption sur la montmorillonite sodique du Wyoming (tâche 6).
- l'enquête sur les fluides mouillants montre que ceux-ci sont peu adaptés au milieu extrême que constitue l'argilite, cette tâche (7) n'est pas poursuivie.

### **Travaux 1999.**

#### Bibliographie

Une synthèse bibliographique sur les modèles numériques de régulation des eaux en milieux argileux ou en présence d'argiles a été réalisée. Elle a permis de déterminer quels modèles peuvent rendre compte de façon complète de la complexité d'un système eaux/argilites (Gaucher et Sanjuan, 1999).

#### Modélisation

Dans le cadre des exercices de modélisation du projet Mont Terri (Suisse), l'année 1999 a permis de mettre en œuvre un modèle d'acquisition et de régulation de la géochimie des eaux des argilites utilisant les connaissances acquises dans le cadre du projet européen Archimède. Ces exercices ont servi à valider ce modèle dans le contexte du mont Terri présentant des eaux de salinité beaucoup plus élevée que dans le cas des argiles de Boom étudiées par le projet Archimède. Ce travail a été présenté oralement lors du Workshop Mont Terri (06/99) et lors des journées scientifiques ANDRA 99 (12/99) (Sanjuan et Gaucher, 1999a et 1999b). Il fera l'objet d'une publication de rang A en 2000.

#### Expérimentation sur carottes d'argilites

Le développement de protocoles expérimentaux au laboratoire a rendu possible l'acquisition de données sur les carottes de roche prélevées en septembre 1998 dans le laboratoire souterrain du mont Terri. La qualité des données de minéralogie (photo 1) (Gaucher *et al* 1999), de capacités d'échange cationique, de populations en ions adsorbés et d'ions mobiles nous permet de réunir une partie des éléments nécessaire à une modélisation de la géochimie des eaux des argilites à partir d'une carotte de roche et ceci sans réaliser d'extraction d'eau par pressage. Par ailleurs ont été définis les protocoles expérimentaux nécessaires pour obtenir spécifiquement les constantes d'échange d'ions des argilites du Mont Terri.

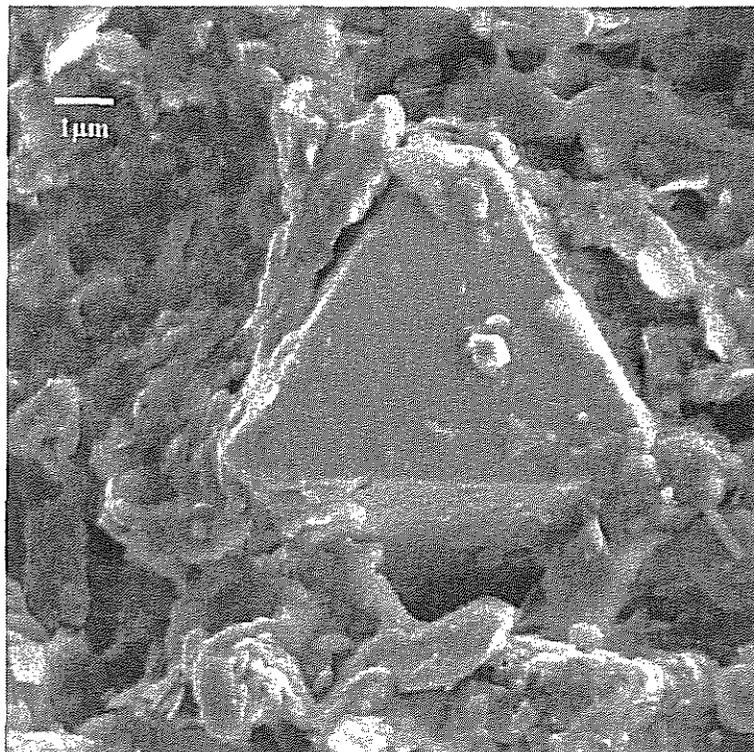


Figure 12. (Microscopie à Balayage) : Argiles à Opalinus ( Mont Terri) : Pyrite isolée dans une gangue de kaolinite et d'illite.

Enfin, une des difficultés majeures des milieux de très faible perméabilité est la mesure des pressions partielles de  $\text{CO}_2$  ; or, ce paramètre est indispensable à la modélisation du pH de la solution interstitielle des argilites. A cet effet, une cellule de dégazage a été construite. Elle a été mise en œuvre en octobre 1999 sur une carotte décomprimée depuis 1 an sous azote ; puis, en novembre 1999 sur une carotte d'argilite fraîchement prélevée dans le laboratoire du mont Terri. Grâce aux analyses de gaz, on a pu détecter non seulement des quantités importantes de  $\text{CO}_2$ , mais aussi la présence de méthane, d'éthane, de propane et d'autres gaz carbonés de plus grande masse moléculaire. Le dispositif permet de mesurer les pressions partielles des différents gaz. Les valeurs obtenues pour le  $\text{CO}_2$  sont de l'ordre de grandeur des valeurs prévues par le modèle.

#### Expérimentations sur minéraux modèles

Pour progresser sur les phénomènes d'échanges d'ions, une étude d'un système simplifié a été menée. La sorption du Sr sur la montmorillonite du Wyoming a été étudiée en réalisant des isothermes d'adsorption de cet élément en fonction du pH et dans des milieux plus ou moins complexants ( Cl ou  $\text{NO}_3$ ). Ces isothermes ont été modélisées à l'aide d'un modèle d'échange d'ions multisite. Certains points de l'isotherme d'adsorption ont été analysés en EXAFS à l'ESRF (Grenoble) de façon à déterminer l'environnement atomique du Sr adsorbé en fonc-

tion des conditions physico-chimiques. Ces analyses confirment ce qui était supposé, c'est à dire que les ions alcalins et alcalino-terreux s'adsorbent à la surface de la montmorillonite avec leur sphère d'hydratation et ceci apparemment quel que soit le type de sites considéré.

### **Programme 2000**

1. Poursuivre la participation au groupe de modélisation du projet Mont Terri : participer aux exercices de modélisation,
  - suivre les travaux d'échantillonnage des eaux dans le laboratoire souterrain,
  - coordonner les publications du groupe,
  - synthétiser la minéralogie des argilites du Mont Terri.
2. Rédiger un article pour *Applied Geochemistry* : « Modelling of the regulation of the chemical composition of the clay porewaters. Examples of Mol and Mont Terri ».
3. Acquérir des données expérimentales à partir d'une carotte d'argilites :
  - valider les protocoles de mesures des pressions partielles de CO<sub>2</sub>,
  - acquérir des constantes d'échange d'ions des argilites du Mont Terri,
  - caractériser la matière organique des argilites du Mont Terri.
4. Modéliser la composition chimique des eaux interstitielles des argilites à partir des données acquises à partir d'une carotte.
5. Réaliser des tests expérimentaux des modèles d'équilibre eaux/argilites. Il s'agit de mettre en contact des solutions dont la composition chimique a été prévue par les modèles avec les argilites du Mont Terri et de suivre dans le temps l'évolution chimique des systèmes.
6. Résultats EXAFS des expériences de sorption du Sr :
  - dépouiller les spectres acquis en collaboration avec le laboratoire de minéralogie de Paris VI ( Farid Juillot) et l'ESRF ( P.E. Petit),
  - synthétiser les résultats de chimie et de caractérisation EXAFS,
  - publier dans une revue de rang A,
  - prendre en compte ces caractérisations pour la modélisation de la sorption (nombre et nature des sites).
7. Valider les modélisations et les protocoles expérimentaux puis valoriser : Rapport d'étude et publication prévue en 2001 (*GCA* ou *Applied Geochemistry*).
8. Préparer les travaux de géochimie pour l'étude des argilites du Site de l'EST.
9. Construire une petite série de cellules de dégazage (pour les travaux sur le Site de l'Est au deuxième semestre 2000).

### **Liste des acteurs du projet**

- E. Gaucher (chef de projet) EPI
- B.Sanjuan ANA
- A.Seron EPI

## Bibliographie

### Communications Orales

E. GAUCHER, B. SANJUAN 1999, Geochemical modelling of clay/porewater interaction processes. The BRGM approach. Second Mont Terri Workshop. St Ursanne Suisse. 1-4 Juin 1999.

B. SANJUAN, E. GAUCHER, 1999. « Vers la compréhension de la composition géochimique du Callovo-Oxfordien ; approche de modélisation chimique et de mesures in situ (exemples de Mol et de Mont Terri) Journées Scientifiques Andra. 7, 8, 9, décembre 1999. Palais des congrès de Nancy.

### Publications

B. SANJUAN, E. GAUCHER, 1999. « Vers la compréhension de la composition géochimique du Callovo-Oxfordien ; approche de modélisation chimique et de mesures in situ (exemples de Mol et de Mont Terri) », Proceedings des Journées Scientifiques Andra des 7, 8, 9, décembre 1999. Palais des congrès de Nancy. 20 pages. *Soumis 11/99*.

### Rapports

E. GAUCHER, B. SANJUAN (1999) - Mécanismes de régulation de la chimie des eaux des argilites. Rap. BRGM R 40655, 53 p., 4 fig., 13 tabl.

B. SANJUAN, E. GAUCHER. (1999). " Geochemical modelling : Contribution to numerical simulations of clay/porewater interaction processes " Mont Terri Project BRGM/ANDRA contribution in Geochemical modelling and synthesis (GM) task : Results of phase IV activities, TN 99-51; F.J. Pearson eds. 80 p.

E. GAUCHER, A. SERON, J. BRETON, (1999) - Premiers résultats de Microscopie Électronique. Argiles d'Opalinus Mont Terri (Jura suisse). Forage A6 / Carotte Min 1. Rap. BRGM R40698, 23p., 11 photographies.

### 3.9- Projet TRANSFAR :

" Transfert de masse et Etat physique de l'eau dans les argilites ".

**Chef de projet BRGM : E.Gaucher, responsable ANDRA : L.Griffault, F. Jullien**

#### *Objectifs.*

Le but de ce projet est de tester et d'évaluer de nouvelles approches de caractérisation de la nature et de la distribution de l'eau porale dans les argilites. Les techniques utilisées sont principalement : des caractérisations physiques et texturales et la résistivité/permittivité diélectrique. Les méthodologies développées permettent de mieux prendre en compte les effets de la distribution de l'eau et de ses caractéristiques physico-chimiques dans les modèles de (i) transfert de l'eau porale dans la roche lorsqu'elle est soumise à des champs de perturbations engendrés par le stockage (capillaire, thermique, osmotique...), (ii) transfert de solutés dans les argilites, et 3. compositions chimiques des eaux porales.

#### *Organisation du projet.*

Le projet porte sur l'étude physico-chimique d'échantillons de roches, sur la composition des eaux interstitielles et sur les interactions chimiques entre les deux ; il combine recherches bibliographiques, réflexions théoriques et expériences de laboratoire sur des échantillons prélevés sur des sites (dont certains font l'objet d'autres études d'où des possibilités de comparaisons et de confrontations), pour concevoir et valider des modèles réalistes.

#### *Cadencement des opérations.*

#### *Cadencement des opérations*

##### Caractérisation Physique et Texturale (H. Gaboriau, A. Saada)

T1-1 Dépouillement et synthèse des expériences réalisées en 1999 en Thermo-désorption isobares. Le principe de cette méthode est de chauffer un échantillon de telle sorte que le débit de gaz émis par l'échantillon soit constant au cours du temps. Ainsi lorsqu'un phénomène se produit (départ d'eau par exemple), le système se régule, et l'intensité de la chauffe décroît. En revanche, aux températures où aucun phénomène n'apparaît, la vitesse de chauffe augmente. Cette technique paraît particulièrement adaptée au problème de l'eau dans les argilites, puisqu'elle devrait permettre de distinguer les températures caractéristiques du départ des différents types d'eau. Au lieu d'isothermes d'adsorption, ce sont des isobares de désorption qui sont obtenus, et un traitement numérique de ces courbes expérimentales permet de déterminer les fonctions de distribution en énergie des sites d'adsorption de l'argilite, c'est à dire des courbes donnant le nombre de site d'adsorption de l'eau, en fonction de l'énergie d'adsorption. Plus l'eau est liée à l'argile, plus l'énergie nécessaire à la désorber est importante. On arrive ainsi à distinguer les différents types d'eau.

Délivrable : 1 rapport d'avancement (avril 2000).

- T1-2 Expériences de *microcalorimétrie d'immersion* des argiles en fonction de leur pré-couvrement en molécules d'eau. Ces expériences donnent des informations sur la valeur de la surface spécifiques par la méthode d'Harkins et Jura et sur l'épaisseur de la couche d'eau liée et l'hétérogénéité énergétique superficielle du solide par rapport à l'eau.
- T1-3 *Thermoporométrie*. Cette méthode contribue à la caractérisation de la microporosité de la roche. Il s'agit de mesurer la consommation d'énergie dans un calorimètre différentiel d'un échantillon d'état hydrique connu congelé dans l'azote liquide lors de la remontée de la température. Le principe physique sous-tendu par cette méthode est lié au fait que la température de fusion de la glace d'un capillaire est inférieure à celle de l'eau libre.
- T1-4 Synthèse des informations sur ces différentes techniques et proposition d'un plan d'expérience pour les argilites.

Délivrable : 1 rapport de synthèse (décembre 2000).

Techniques physiques de mesures de la nature et de la teneur en eau adaptables in situ.

- T2-1 Rédaction d'un mémoire présentant les différentes techniques physiques de mesures in situ de la nature et de la teneur en eau des argilites.

Apport des méthodes sismiques (A. Bitri)

Apport des méthodes TDR et Permittivité diélectriques (J.C. Gourry)

Apport des techniques RMP ( Proposition d'une adaptation de NUMIS en galerie -- Modélisation et essai à partir du matériel existant). A. Legtchenko.

Délivrable : 1 rapport de synthèse (décembre 2000).

- T2-2 Expériences de mesures des propriétés diélectriques des argiles. J.C. Gourry et F. Vermeersch

Acquisition d'un matériel et mise au point de mesures des propriétés diélectriques des argiles au BRGM.

Préparation de matériaux argileux à l'état hydrique contrôlé et d'organisation texturale connue.

Expériences de mesures des *propriétés diélectriques* d'argiles modèles et de roches argileuses en fonction de leur teneur en eau.

Détermination d'un modèle théorique permettant de décrire l'état hydrique d'une roche argileuse à partir de la mesure de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique. Test des modèles de Jonscher, Cole-Davidson et Schwarz.

Proposition de développement d'un outil géophysique permettant de mesurer la permittivité dans la gamme de fréquences la mieux adaptée.

Délivrable : 1 rapport d'expériences et modélisations (décembre 2000).

## Travaux 1999

### Caractérisation Physique et Texturale

Une caractérisation physique et texturale de l'argile à Opalinus du Mont Terri a été réalisée (Gaboriau et Seron, 1999). Elle a permis de définir un protocole spécifique à ce type de milieu permettant de mesurer de façon fiable l'état anhydre de référence de la roche et sa teneur en eau totale. L'estimation de la porosité géochimique (porosité contenant les solutés) a pu être réalisée par des moyens d'études physiques. La valeur obtenue est très proche de la valeur de porosité géochimique estimée par l'équipe suisse (Pearson, 1999) par des méthodes chimiques.

### Propriétés diélectriques

Une bibliographie et une première série d'expériences sur les propriétés diélectriques des argilites du mont Terri en fonction de leur teneur en eau ont été réalisées. Les expériences ont été effectuées à la Colorado School of Mines sur une gamme de fréquence allant de 30 kHz à 1GHz. Les premiers résultats montrent qu'il est possible de calculer à quelques pour-cent près la teneur en eau d'une argilite par la mesure de sa permittivité diélectrique à plusieurs fréquences. Les résultats préliminaires de ce travail ont été présentés lors des journées scientifiques (Gourry, 1999) et font l'objet d'un rapport d'avancement (Gourry et Gaucher, 1999).

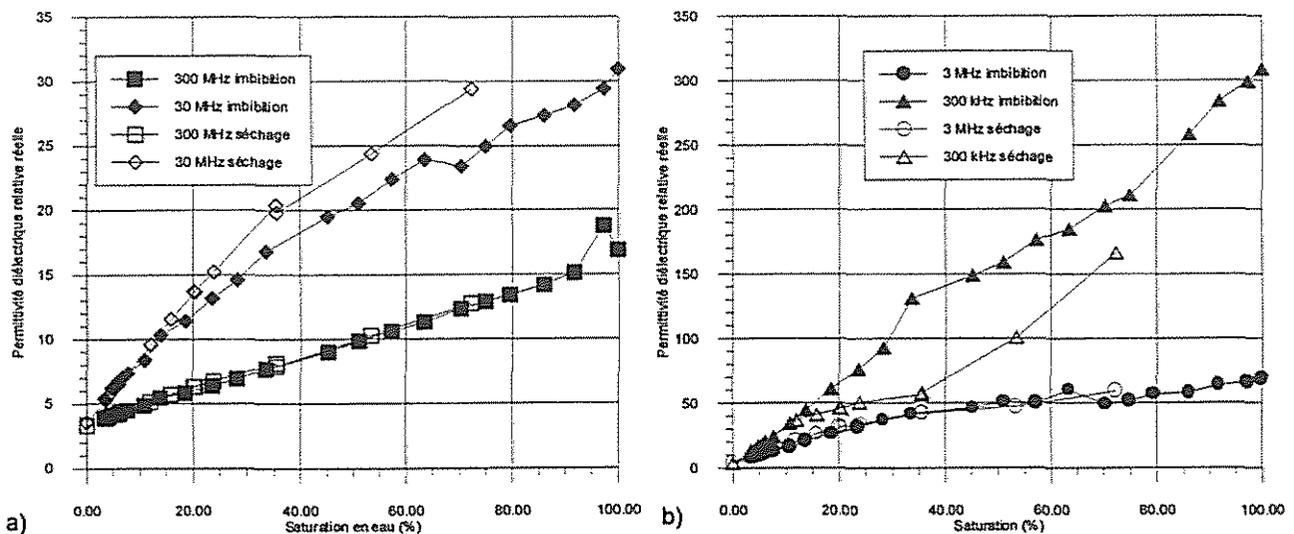


Figure 13 - Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la saturation en eau au cours de l'imbibition et le séchage des échantillons a) pour les fréquences 30 et 300 MHz, b) pour les fréquences 0.3 et 3 MHz. Argiles à Opalinus du Mont Terri.

### Résonance magnétique du Proton

Une première série d'expériences de Résonance Magnétique du Proton a été réalisée à l'aide d'appareils à Haut Champ Magnétique sur des échantillons d'Argiles à Opalinus (CRMD-CNRS Orléans – 4,7 tesla - et Université de Lyon 1 – 2 tesla -). Il est apparu qu'à haut champ, les temps de relaxation de l'eau dans ces argilites sont si courts, qu'une caractérisation n'est pas envisageable. Une seconde série d'expériences préliminaires à champ modéré (CEA-LETI Grenoble et C2R2M Université Paris-Sud – 0,1 tesla –, et IFP Rueil-Malmaison – 0,05 tesla) a permis d'obtenir un signal exploitable, les résultats obtenus à l'IFP (appareil dédié carottes) montrent qu'on distingue clairement deux modes de relaxation correspondant à deux types d'eau (libre/liée). Ce premier dimensionnement des expériences de RMP permet d'envisager une poursuite des investigations.

### **Programme 2000**

Le programme 2000 s'identifie à la réalisation des tâches 2.1 à 2.6 (cf. paragraphe "cadencement" ci-dessus).

### **Liste des acteurs du projet**

- E. Gaucher (Chef de projet) EPI
- H. Gaboriau EPI
- A.Saada EPI

### **Bibliographie**

#### Rapport

GOURRY J.C., GAUCHER E., (1999) – Mesures de permittivité diélectrique et résistivité électrique dans la gamme de fréquence 0.03 à 3000 MHz sur échantillons en fonction de leur teneur en eau. Argiles à Opalines du mont Terri (Suisse, Canton du Jura). Forage A6 / Carotte BRGM/ELEC2. Rapport d'avancement. Rapt. BRGM R40868, 156p. , 15 fig., 6 tabl. , 1 ann.

GABORIAU H., SERON A., (1999) – Caractérisation physique et texturale de l'Argile à Opalinus du Mont Terri. Rapt. BRGM R 40741, 58 p., 5 fig., 8 tabl. , 3 ann.

#### Poster

GOURRY J.C. (1999) – Propriétés diélectriques ( $10^5$ - $10^9$  Hz) des argilites du Mont Terri en fonction de leur teneur en eau », Journées Scientifiques Andra. 7, 8, 9, décembre 1999. Palais des congrès de Nancy.

### 3.10- Projet ALCAR :

#### " Perturbation hyper alcaline en milieu argileux ".

*Chef de projet BRGM : E. Gaucher, responsable ANDRA : L. Griffault et N. Michau*

##### *Objectifs.*

L'objectif est d'étudier les modifications d'ordre chimique, minéralogique, textural et géotechnique, induites dans les argiles sous l'effet de la perturbation hyper alcaline engendrée par l'hydratation d'ouvrages en béton. Ces travaux sont basés sur des expériences de percolation réalisées dans un laboratoire partenaire du projet (Eurogeomat) et sur des simulations numériques visant à reproduire et interpréter ces expériences. Une autre équipe (ERM) va acquérir des paramètres sur la minéralogie, et le CEA/DAMRI va déterminer des coefficients de diffusion. Ces différents paramètres seront injectés dans les simulations au fur et à mesure de leur obtention.

Ce travail s'inscrit dans le projet européen Ecoclay II réunissant les agences européennes de gestion des déchets radioactifs sur la thématique de la durabilité des barrières argileuses soumises aux perturbations alcalines issues d'un béton.

##### *Organisation du projet.*

Pour répondre à cette problématique, l'ANDRA a mis en place un groupement d'organismes scientifiques : BRGM et Eurogéomat (Orléans), Hydrasa et ERM (Poitiers), CEA/DAMRI (Grenoble). Au BRGM, est dévolu, d'une part une assistance au dimensionnement et suivi des expériences, et d'autre part leur interprétation par modélisation ainsi que des études de sensibilité. Les essais sont réalisés par injection sous pression d'une solution hyperalcaline, dans une carotte. Le suivi portera sur les aspects physico-chimiques et sur le suivi mécanique du gonflement. Les coefficients de diffusion seront identifiés par la réalisation de traçages. Après achèvement de l'expérience, une autopsie de la carotte servira à analyser sa minéralogie et sa texture.

##### *Cadencement des opérations.*

- tâche 1 : Etude de sensibilité des modélisations chimie-transport.
- tâche 2 : Assistance au dimensionnement des expérimentations.
- tâche 3 : Modélisation des expériences de références.

##### *Travaux 1999.*

Le projet ALCAR a démarré au dernier trimestre 1999. Le BRGM a apporté sa contribution à la définition des protocoles des expériences d'interaction eau hyperalcaline / milieu argileux qui vont être conduit en tubes réactionnels, oedomètres ou cellules de diffusion au sein des organismes partenaires du projet. Une composition chimique des eaux du site de l'Est a été proposée pour réaliser ces expériences (Gaucher et Crouzet, 1999).

Les modélisations PHREEQC et Allan/Neptunix réalisées en 1998 et 1999 dans le cadre de contrats commerciaux pour l'ANDRA pour simuler ces interactions entre milieu cimentaire et

milieu argileux vont servir de base de départ aux simulations prévues dans le cadre de ce projet.

### ***Programme 2000***

- tâche 1 : Etude de sensibilité des modélisations chimie-transport.
- tâche 2 : Assistance au dimensionnement des expérimentations.
- tâche 3 : Modélisation des expériences de références.

### ***Liste des acteurs du projet***

- E. Gaucher (chef de projet) EPI
- C. Crouzet ANA
- G. Braibant ANA
- D. Breeze ANA

### ***Bibliographie***

#### Rapport

E. GAUCHER, C. CROUZET, (1999) – Assistance technique aux expériences Ecoclay II, Interactions eaux alcalines/argiles. Rapport d'avancement. Rapport BRGM R 40918. 26p. , 1 Fig., 3 Tabl..

### 3.11 Projet GEOTHERM :

"Développements méthodologiques en géochimie des isotopes stables pour la caractérisation des fluides et paléofluides dans les systèmes géologiques".

*Chef de projet BRGM : J.P.Girard, Responsable ANDRA : L.Griffault*

#### *Objectifs.*

Dans la phase de reconnaissance d'un site candidat pour l'implantation d'un laboratoire souterrain, il est primordial de caractériser aussi précisément que possible la nature et l'ampleur des circulations fluides actuelles et anciennes. Les isotopes stables de l'oxygène et l'hydrogène constituent un excellent outil comme traceurs de l'origine des fluides et géothermomètres des interactions eau-roches. Ce projet vise à développer des méthodologies analytiques performantes et spécifiques (notamment par analyse de microquantités) pour la détermination des compositions isotopiques des saumures et des minéraux, et à valider un nouvel outil de géothermométrie isotopique applicable aux argiles.

#### *Organisation du projet.*

Trois axes de recherche sont proposés : (i) détermination du  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  des saumures par équilibration automatique sur 1-2 ml, (ii) développement d'un géothermomètre monominéral basé sur le fractionnement intracristallin de l'oxygène applicable aux argiles (kaolinite) et (iii) analyse directe sur lame épaisse du  $\delta^{18}\text{O}$  des minéraux de fissures (silicates, oxydes, carbonates...) au laser UV.

#### *Cadencement des opérations.*

- **Tâche 1** : Validation d'une procédure de détermination du  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  des saumures par équilibration automatique gaz-eau sur des volumes de 1 à 2 ml.
  - ⇒ **sous-tâche 1.1** : tests sur 5 à 6 échantillons de 4ml avec une chimie simple et une salinité variable (30 à 300g/l).
  - ⇒ **sous-tâche 1.2** : mêmes mesures sur des échantillon de 1 à 2ml ; comparaisons.
  - ⇒ **sous-tâche 1.3** : mêmes mesures sur des échantillons plus proches des conditions de travail de l'ANDRA.
  - ⇒ **sous-tâche 1.4** : rapport analytique et mode opératoire
- **Tâche 2** : Développement d'un géothermomètre monominéral applicable à la kaolinite : analyse et calibration du fractionnement intracristallin de l'oxygène dans les kaolinites.
  - ⇒ **sous-tâche 2.1** : sélection d'échantillons de kaolinite formées à différentes températures ; vérification de la pureté puis séparation de la fraction inférieure à 1  $\mu\text{m}$ .
  - ⇒ **sous-tâche 2.2** : détermination de  $\delta^{18}\text{O}$  (i) de la kaolinite totale, (ii) de l'eau interstitielle et (iii) du résidu déshydroxylé au  $\text{BrF}_5$  ; calcul du fractionnement intracristallin.
    - ⇒ **sous-tâche 2.3** : établissement de la dépendance entre fractionnement interne et température.
    - ⇒ **sous-tâche 2.4** : rapport analytique, mode opératoire, publication.

- **Tâche 3** : Mise au point d'une (ou plusieurs) procédure(s) d'analyse du  $\delta^{18}\text{O}$  des minéraux (silicates, oxydes, carbonates) directement sur lame épaisse à l'aide du laser UV.
  - ⇒ **sous-tâche 3.1** : adaptation du laser UV à la ligne de fluorination laser existante.
  - ⇒ **sous-tâche 3.2** : tests sur des lames épaisses polies de mégacristaux (quartz, feldspaths,...) ; réglage du laser pour chaque type de minéral.
  - ⇒ **sous-tâche 3.3** : application à l'analyse des remplissages de fractures.
  - ⇒ **sous-tâche 3.4** : rapport analytique et mode opératoire.

### **Rappel sur les travaux 1998.**

Les travaux initiés en 1998, sont intégralement repris au paragraphe suivant et synthétisés avec l'activité 1999.

### **Travaux réalisés à fin 1999.**

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de la phase 1 (01/10/98 à 01/05/99) et correspondant à la lettre de commande ANDRA n°009192 sont consignés dans le rapport d'avancement du BRGM R40630 (Girard et Fléhoc, 1999). Ce rapport a été remis à l'ANDRA en juin 1999 et concerne les tâches 1.1., 1.2. et 2.1. du projet.

L'avancement du projet est resté plusieurs mois en stand-by dans l'attente d'une décision quant à la hauteur du financement disponible en 1999 pour la 2<sup>ème</sup> phase de recherches. L'avenant n°1 à la lettre de commande ANDRA n°009192 a été reçu le 19/10/99, et couvre la période 19/10/99 à 19/08/2000. L'avancement des travaux n'a repris que ces dernières semaines et concerne les tâches 1.3., 2.2. et 3.1. du programme.

Les principaux acquis au 30/11/1999 sont résumés ci-dessous.

#### Module 1 - Analyse isotopique des saumures par équilibration gaz-eau automatique

**Tâches 1.1. et 1.2** : Plusieurs séries de tests d'analyse isotopique ( $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$ ) des saumures par la méthode d'équilibration eau-gaz ont été réalisés sur des solutions synthétiques de NaCl, KCl,  $\text{CaCl}_2$  et  $\text{MgCl}_2$  de concentration variable (TDS 0 à 250 g/l) et pour des quantités de 4 et 2 ml. Les résultats obtenus indiquent que des solutions chimiquement simples, de type chlorurées mono-sel, peuvent être analysées par la méthode d'équilibration eau-gaz avec une précision identique à celle obtenue pour des eaux diluées, soit  $\pm 0.1$  ‰ pour le  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\pm 1.0$  ‰ pour le  $\delta\text{D}$ , y compris pour des aliquotes de 2 ml.

A quelques exceptions près, la reproductibilité des mesures est suffisante pour calculer et corriger l'effet sel sur les  $\delta\text{D}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  mesurés. Pour des concentrations inférieures à 20-25 g/l, cet effet sel est négligeable. Au-delà, il est nécessaire de recalculer les  $\delta\text{D}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  mesurés directement par équilibration à l'aide de facteurs de correction spécifiques. Ces facteurs correctifs ont été déterminés pour les solutions mono-sel utilisées (Figs. 1 et 2). Les facteurs correctifs de l'effet sel y sont exprimés sous forme  $\Delta\delta\text{D}$  ou  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  selon la relation :  $\Delta\delta\text{D} = -(\delta\text{D}_{\text{mesuré}} - \delta\text{D}_{\text{vrai}})$ .

Les figures 1 et 2 illustrent combien l'ampleur de l'effet sel est fonction de la nature des sels dissous et de leur concentration (en particulier au delà de 25 g/l). Ces résultats sont en bon accord avec ceux de la littérature, à l'exception toutefois des facteurs correctifs  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  pour les

solutions NaCl et CaCl<sub>2</sub> qui sont plus élevés dans notre étude. Ils ont fait l'objet d'une présentation au 3<sup>ème</sup> Symposium International de Géochimie Isotopique Appliquée (Fléhoc and Bourgeois, 1999).

**Tâche 1.3 :** Quelques tests réalisés sur deux eaux de mer synthétiques donnent des résultats en accord avec les données obtenues sur les solutions mono-sels (à dominante NaCl). Ils indiquent que l'effet sel est négligeable pour le  $\delta^{18}\text{O}$  et de l'ordre de 1 à 1.5 ‰ pour le  $\delta\text{D}$ .

Des solutions synthétiques de chimie plus complexe (solutions multi-sels) ont été préparées. Les analyses chimiques et isotopiques sont en cours.

#### Module 2 - Géothermomètre monominéral : fractionnement intracristallin de l'oxygène dans les kaolinites

**Tâches 2.1., 2.2. et tâche nouvelle :** Vingt neuf échantillons de kaolinites et dickites/nacrites ont été sélectionnés pour l'analyse du fractionnement intracristallin de l'oxygène entre les sites OH et non-OH. Ces échantillons proviennent de contextes supergène (n=12), diagénétique (n=4) ou hydrothermal (n=13), et se sont formés dans des conditions de température variant de 20 à  $\approx 250^\circ\text{C}$ . Ils ont été purifiés et caractérisés d'un point de vue minéralogique et isotopique ( $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$ ). Leurs compositions isotopiques couvrent une large gamme des valeurs observées dans les systèmes naturels (Fig. 3). Sur la base des données acquises, 21 de ces échantillons ont été retenus pour effectuer une première calibration de la thermodépendance du fractionnement intracristallin de l'oxygène dans les kaolinites.

Parallèlement, une méthode de broyage des échantillons d'argiles basée sur l'utilisation d'un broyeur de type « *cell dismembrator* » a été mise au point. Elle permet de générer des particules de taille  $< 1 \mu\text{m}$ , nécessaires pour la mesure du fractionnement intracristallin par déshydroxylation thermique, en quantité suffisante. Cette méthode a été validée. Sa mise en œuvre sur les 21 échantillons choisis est en cours (9 échantillons traités).

Enfin, une série de tests préliminaires a été réalisée pour reproduire la méthode de déshydroxylation sous vide et l'analyse du  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de déshydroxylation des kaolinites par fluorination décrite par Girard and Savin (1996, Intracrystalline fractionation of oxygen isotopes between hydroxyl and non-hydroxyl sites in kaolinite measured by thermal dehydroxylation and partial fluorination. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 60, p. 469-487.). Les quelques résultats acquis sur un standard de brucite sont décevants. L'eau de déshydroxylation de la brucite montre des  $\delta^{18}\text{O}$  appauvris de plusieurs ‰ par rapport à la valeur attendue. Ceci indique que la procédure analytique mise en œuvre au BRGM n'est pas valide et doit être révisée (en particulier le contrôle de la température). Les tests sur la brucite et les kaolinites-dickites sélectionnées ne seront repris qu'au 2<sup>ème</sup> ou 3<sup>ème</sup> trimestre 2000, après avancement du module 3 (cf. ci-dessous).

#### Module 3 - Analyse directe du $\delta^{18}\text{O}$ des minéraux en fissures au laser UV

**Tâche 3.1 :** La conceptualisation des modifications nécessaires pour l'adaptation du laser UV à la ligne laser CO<sub>2</sub> existante est achevée. Elle a été guidée par les enseignements collectés lors de la visite (en 1998) du laboratoire du professeur Hoefs (Université de Gottingen, Allemagne), qui constitue une référence dans l'utilisation des lasers UV, et par la review des dispositifs décrits dans la littérature. En particulier, le design d'une nouvelle chambre à réaction et d'un nouveau dispositif de pompage ont été mis au point.

Les équipements et pièces requis ont été commandés en novembre et seront livrés pour partie en décembre et pour partie en janvier. L'assemblage débutera dès que possible. Les premiers tests (tâche 3.2.) devraient être réalisés dans le 1<sup>er</sup> trimestre 2000.

### ***Rapports et publications 1999***

Girard J.-P. et Fléhoc C., 1999, Projet Geotherm - Etat d'avancement au 01/05/1999. Rapport BRGM R40630, 39 p.

Fléhoc C. and Bourgeois M., 1999, Investigation on the salt effect in  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  analyses of brines by use of the automated  $H_2$ - and  $CO_2$ -water equilibration method : New insights. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (AIG-3), Orléans (France), Sept. 21-25, Program and Abstracts p.38-39.

### ***Programme 2000***

- tâche 1.3 : finalisation des tests sur saumures complexes
- rapport de synthèse du module 1 (équilibration saumures) et mode opératoire
  
- tâche 2.2. : analyses du fractionnement interne des 21 kaolinites choisies
- tâche 2.3 : calibration du géothermomètre
- rapport de synthèse du module 2 (géothermomètre monominéral) et mode opératoire
  
- tâche 3.1 : adaptation du laser UV
- tâche 3.2 : tests sur les lames monominérales
- tâche 3.3 : tests sur des roches complexes
- rapport de synthèse du module 3 (analyse laser UV) et mode opératoire

### ***Liste des acteurs du projet***

- J.P.Girard (Chef de projet) SMN/PEA/ANA
- M.Bourgeois SMN/PEA/ANA
- E.Béchu SMN/PEA/ANA
- J.Castagne SMN/PEA/ANA
- C.Flehoc SMN/PEA/ANA
- G.Kocher SMN/PEA/PRO

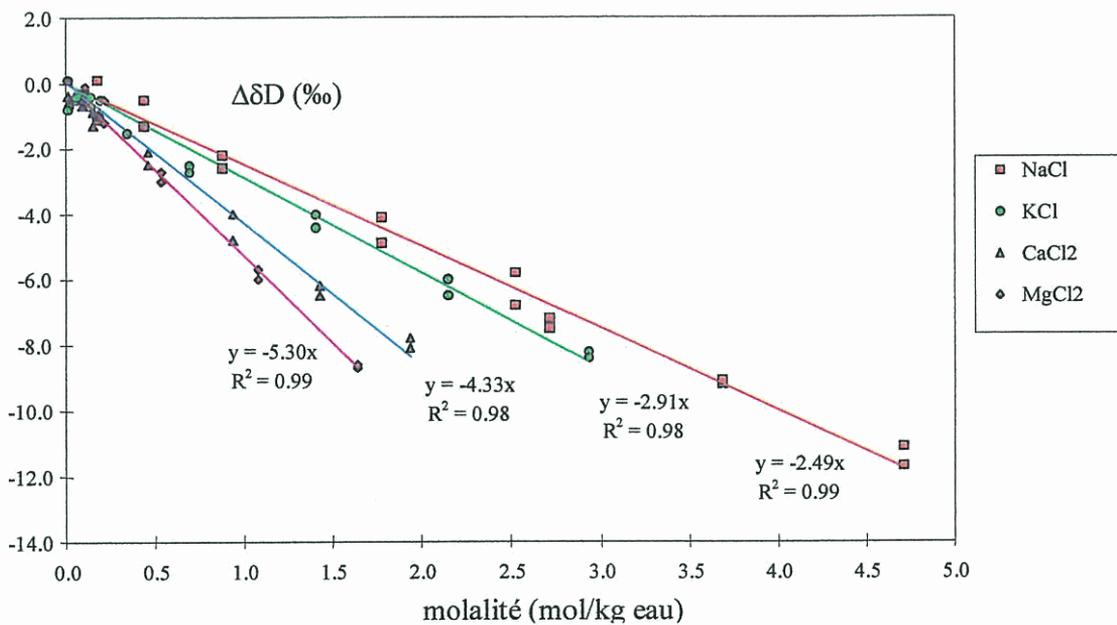


Figure 13. Facteurs de correction  $\Delta\delta D$  en fonction de la molalité de solutions mono-sels

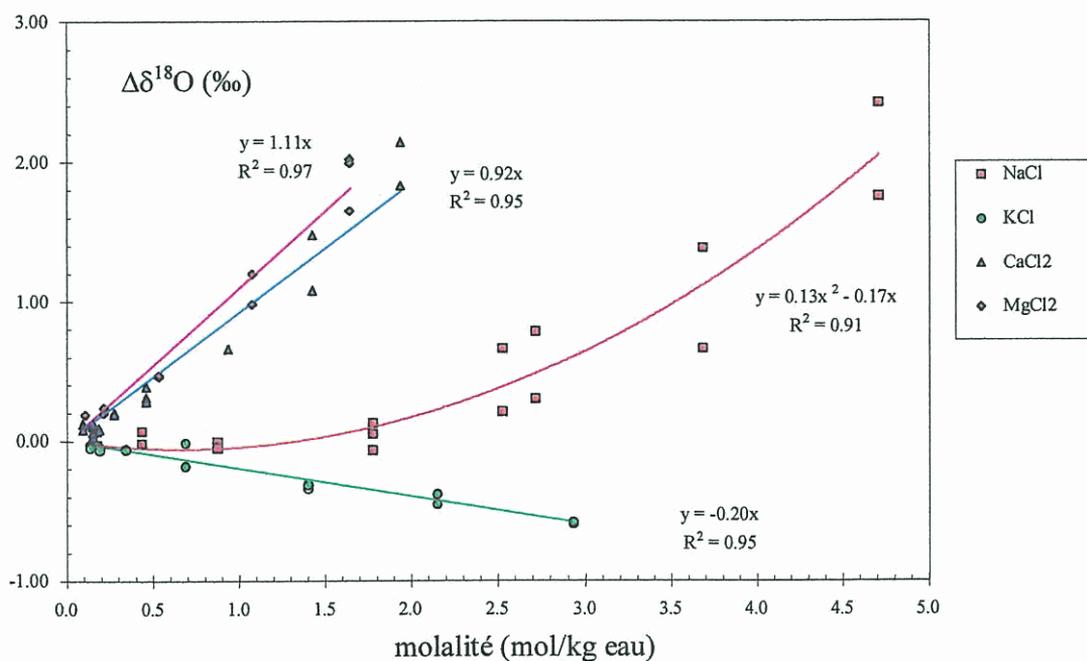


Figure 14. Facteurs de correction  $\Delta\delta^{18}O$  en fonction de la molalité de solutions mono-sels

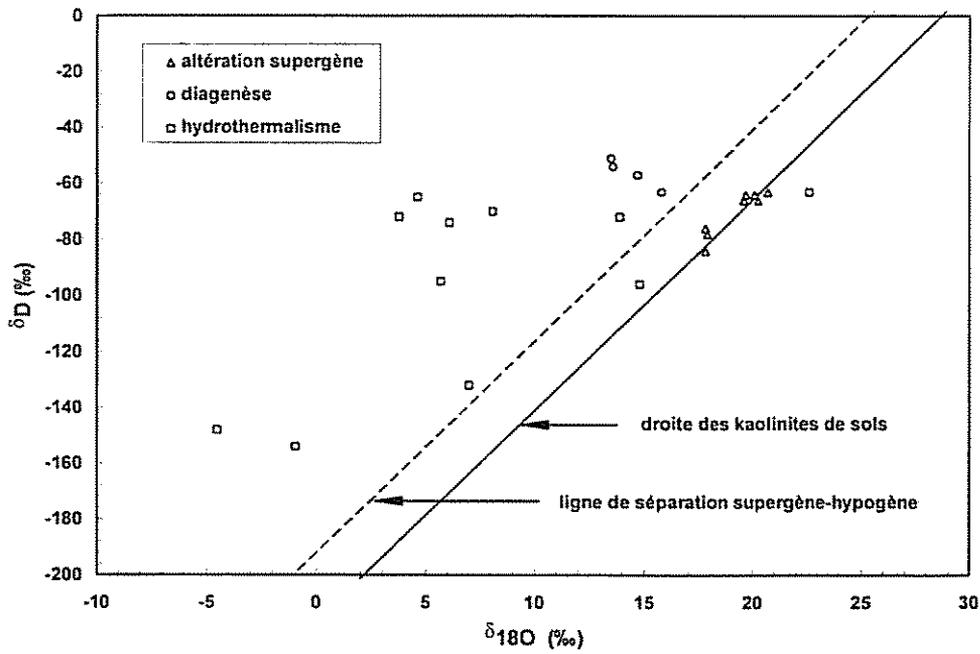


Figure 15. Compositions isotopiques des kaolinites, dickites et nacrites sélectionnées (données disponibles dans Girard et Fléhoc, 1999)

### 3.12- Projet GRANITES :

"Programme de Recherche Scientifique d'accompagnement des laboratoires souterrains".

*Chef de projet BRGM : P.Ledru, responsable ANDRA : P.Lebon*

#### *Objectifs.*

La réalisation des laboratoires souterrains constitue une opportunité unique pour la communauté scientifique d'accéder à des milieux souterrains pour mener des recherches originales, tant sur la connaissance et les méthodes d'études de ces milieux qu'en utilisant ses propriétés particulières. L'objectif du projet est la définition du périmètre des travaux de recherche que pourrait proposer la communauté scientifique, une hiérarchisation des besoins, l'identification des équipes qui pourraient être intéressées par le projet et la proposition d'une organisation d'un programme de recherche d'intérêt général qui soit compatible avec l'organisation ANDRA sur le site du laboratoire souterrain. Dans ce contexte, l'ANDRA attend du BRGM dans une première phase de faire un recensement des thèmes porteurs ou émergents dans les 5 ans à venir et pouvant conduire à des actions de recherche en laboratoire souterrain.

#### *Organisation du projet.*

##### Tâche 1. La faisabilité d'un programme scientifique d'accompagnement

Dans un premier temps, **une revue bibliographique** a été faite sur les recherches réalisées depuis une vingtaine d'année sur la caractérisation des propriétés des massifs granitiques, notamment en relation avec les travaux souterrains liés à la recherche de sites de stockage de déchets nucléaires dans le monde. Il ressort de ce travail que l'ensemble des recherches était défini sur les problèmes de prévision de la fracturation (lois de répartition, recherche de traceurs pour imager la perméabilité, développements d'outils méthodologiques...) et sur les transferts de matière. Les objectifs sont donc directement liés à la problématique propre du stockage, à l'exception de quelques rares recherches fondamentales réalisées sur un ou deux sites (notamment à Grimsel, Suisse). **La proposition de l'ANDRA d'héberger un programme scientifique d'accompagnement, sur des objectifs non directement liés à la problématique du stockage, est donc unique et originale.** En conséquence, cette démarche devrait a priori intéresser les équipes de recherche, étant nouvelle et pouvant bénéficier d'un "effet d'annonce".

A la demande de l'ANDRA, le projet initialement dédié aux granites a été **généralisé aux autres types de formations**, y compris au contexte d'un laboratoire souterrain en formation argileuse.

##### Tâche 2. Les développements d'outils et de méthodologie

Dans un second temps, les perspectives ouvertes par le laboratoire souterrain pour la réalisation de développements d'outils et de méthodologies ont été examinées, en référence à ce qui a déjà été fait et présenté dans la revue bibliographique. En effet, la mise au point de nouveaux outils impose des phases de tests et de certification qui nécessitent l'accès in situ à une variété de contextes lithologiques et structuraux. L'accès au laboratoire souterrain devrait donc a

priori intéresser la communauté scientifique. **Les contacts avec des spécialistes des différentes méthodes montrent qu'il existe des perspectives de développement sur une large gamme d'outils, du radar à la résonance Magnétique Protonique, en passant par les méthodes électriques et électromagnétiques.** Ces perspectives de développement visent notamment (i) un élargissement des conditions d'utilisation (réseaux et mailles, forages, galeries...), (ii) un accroissement des performances et de la résolution, (iii) une amélioration des moyens de traitement. Ces spécialistes, orientés outils et technologie, manifestent le plus grand intérêt pour un programme scientifique d'accompagnement des laboratoires souterrains. Il est d'autre part constaté par C. Jaupart que l'aspect développement des outils et des méthodes a été déserté ces dernières années par la communauté scientifique et qu'un retournement de tendance est inévitable à terme. **Il est proposé de réfléchir à la définition d'un secteur du laboratoire pour lequel le degré de connaissance 3D serait suffisamment élevé pour être considéré comme un "banc d'essai".** Chaque nouvel outil pourrait ainsi être testé, les résultats obtenus étant directement interprétables en terme d'écart à la réalité géologique connue. Ce type de banc d'essai aurait le mérite de permettre une organisation des recherches bien regroupée sur un secteur délimité du laboratoire et de constituer une plate forme d'échange et de comparaison des méthodes d'auscultation.

### Tâche 3. Un observatoire souterrain

Dans un troisième temps, on a recherché quelle pourrait être la communauté scientifique intéressée par l'aspect "observatoire" du laboratoire souterrain, notamment dans le cas des massifs granitiques. La localisation d'un tel laboratoire au sein d'un granite renforce le caractère exemplaire de ce cas d'étude, les granites étant représentatifs de la croûte continentale moyenne et sièges d'une large gamme de phénomènes, de leur genèse en profondeur à leur évolution actuelle en sub-surface. **L'accès à un site d'expérimentation scientifique et technique permettant la réalisation de nombreuses expériences d'enregistrement et de simulation sur une longue période répond à un besoin très fort, notamment dans la communauté géophysique.** La mesure et la dérive des flux naturels (magnétisme, gravimétrie, chaleur, courants telluriques, champs d'onde, lois de variation espace-temps des propriétés physiques...) en fonction du temps, de la profondeur, des variations climatiques et surtout hors de la zone d'altération superficielle devrait susciter un grand intérêt. En effet, ces variations restent sous déterminées expérimentalement. Il est à noter qu'un thème de recherche induit par le développement du laboratoire souterrain intéresse beaucoup la communauté scientifique, à savoir quel est l'impact des perturbations anthropiques sur les flux naturels et sur leur variations dans l'espace et le temps.

### Tâche 4. La modélisation prévisionnelle 3D multi-échelles en "temps réel"

Enfin, **la modélisation prévisionnelle des caractères et des propriétés du domaine souterrain** qui sera nécessaire avant le début des travaux de construction du laboratoire souterrain constitue **un cas d'étude unique de prévision actualisée de la géométrie 3D du domaine souterrain et de ses propriétés.** Cette réalisation est donc une opportunité unique de tester et valider notre capacité à prévoir l'extension 3D des structures et des phénomènes géologiques en profondeur, le laboratoire permettant de:

- travailler en simultané en surface et en profondeur, de l'échelle de la photo satellite à la cartographie d'un réseau de fracture centimétrique (les comparaisons des différentes signatures sont essentielles pour toute les disciplines d'observation indirecte des paramètres) ;
- se soustraire des perturbations de surface (activité anthropique, écoulements superficiels, changements climatiques..) ;

- évaluer les conditions aux limites physiques dans toutes les directions, ce qui est essentiel pour toute modélisation géophysique ;
- déduire des corrections générales des écarts de mesure et de la variation dans le temps des propriétés physiques en surface et en profondeur.

L'expérience acquise à l'occasion du programme GéoFrance 3D montre que la communauté scientifique concernée par ces questions de *modélisation prévisionnelle 3D multi-échelles* est croissante. Un programme de recherche pourrait se mettre en place autour des axes suivants :

- modélisation directe et inverse des données géologiques et géophysiques en 2D et 3D ;
- définition d'une modélisation prévisionnelle de l'architecture du domaine souterrain répondant au mieux aux données modélisées (géologie et géophysique, modélisation 3D, liens avec la communauté en charge de l'aménagement du domaine souterrain) ;
- simulations de la dynamique du domaine souterrain dans le repère 3D (géologie, géophysique, physique, chimie...) ;
- exploration géostatistique de l'espace des solutions géométriques et dynamiques possibles (géologie, géophysique, modélisation 3D, géométrie algorithmique, géostatistique...) ;
- évolution en "temps réel" du modèle de référence 3D avec la progression de la connaissance. Il est nécessaire de pouvoir faire évoluer le modèle initial à la faveur de chaque donnée nouvelle apportant une contrainte sur les caractéristiques du domaine souterrain sans avoir à rebâtir l'ensemble de la procédure de modélisation. Or une telle prise en compte, qui peut se résumer à l'introduction d'une perturbation dans le modèle, soulève des problèmes géométriques et topologiques non encore résolus.

### *Cadencement des opérations.*

#### Tâche 1 : Faisabilité d'un programme scientifique d'accompagnement

- **Sous-tâche 1.1 :** *contacts préliminaires et informels de la communauté scientifique nationale*
- **Sous-tâche 1.2 :** *organiser une journée de travail à l'IPG de Paris (C. Jaupart, L. Guillou Frottier, P. Pezard), sur invitation, afin de tester la réaction de la communauté scientifique à une telle annonce (2000)*
- **Sous-tâche 1.3 :** *préparer une communication avec l'ANDRA sur l'ouverture du laboratoire souterrain pour la réalisation de recherches scientifiques fondamentales (2001)*

#### Tâche 2. Les développements d'outils et de méthodologie

- **Sous-tâche 2.1 :** *rédaction d'un cahier des charges pour la définition d'un "banc d'essai des outils et méthodes" au sein du laboratoire souterrain (recherche de partenariat, caractéristiques géométriques requises, équipements permanents nécessaires, procédure d'accès...) (2000)*
- **Sous-tâche 2.2 :** *lancement d'un appel d'offre (montage d'un banc d'essai, développements d'outils et méthodes) (2001)*
- **Sous-tâche 2.3 :** *analyse des réponses, définition du banc d'essai et hiérarchisation des développements proposés (2001)*
- **Sous-tâche 2.4 :** *certification des choix et recherche de partenariat complémentaire si nécessaire (2001)*

#### Tâche 3. Un observatoire souterrain

- **Sous-tâche 3.1** : *pré-définition d'expériences permanentes et temporaires d'enregistrement et de mesure des flux naturels, recherche de partenariat (2000)*
- **Sous-tâche 3.2** : *lancement d'un appel d'offre (2001)*
- **Sous-tâche 3.3** : *analyse des réponses, hiérarchisation et définition des expériences proposées (2001)*
- **Sous-tâche 3.4** : *certification des choix et recherche de partenariat complémentaire si nécessaire (2001)*

Tâche 4. La modélisation prévisionnelle 3D multi-échelles en "temps réel"

- **Sous-tâche 4.1** : *définition d'un pré-projet de recherche de modélisation prévisionnelle 3D multi-échelles, recherche de partenariat (2000)*
- **Sous-tâche 4.2** : *définition d'un projet pour l'évolution en "temps réel" du modèle de référence 3D à l'avancement de la connaissance, recherche de partenariat (2000)*
- **Sous-tâche 4.3** : *lancement d'un appel d'offre (2001)*
- **Sous-tâche 4.4** : *analyse des réponses, hiérarchisation et définition du projet de recherche de modélisation prévisionnelle 3D multi-échelles (2001)*
- **Sous-tâche 4.5** : *certification des choix et recherche de partenariat complémentaire si nécessaire (2001)*

**Travaux 1999.**

L'ensemble des tâches a été initié en 1999 :

- Contacts informels de membres de la communauté scientifique nationale.
- Revue bibliographique sur la caractérisation des propriétés des massifs granitiques, notamment en relation avec la recherche de sites de stockage de déchets nucléaires.
- Dans la suite de cette recherche bibliographique, examen des perspectives ouvertes par le laboratoire souterrain pour des développements d'outils et de méthodologies.
- Investigation pour identifier la communauté scientifique intéressée par l'aspect "observatoire" du laboratoire souterrain, notamment dans le cas des massifs granitiques.
- Définition des axes de recherche pour une modélisation prévisionnelle 3D multi-échelles.

**Programme 2000.**

Les travaux suivants sont programmés pour 2000 (cf. supra, cadencement des opérations) :

- **Sous-tâche 1.2** : Organisation d'une journée de travail pour tester la réaction de la communauté scientifique)
- **Sous-tâche 2.1** : Rédaction d'un cahier des charges pour la définition d'un "banc d'essai des outils et méthodes" au sein du laboratoire souterrain.
- **Sous-tâche 3.1** : Pré-définition d'expériences permanentes et temporaires d'enregistrement et de mesure des flux naturels.
- **Sous-tâche 4.1** : Définition d'un pré-projet de recherche de modélisation prévisionnelle 3D multi-échelles, recherche de partenariat (2000)
- **Sous-tâche 4.2** : Définition d'un projet pour l'évolution en "temps réel" du modèle de référence 3D à l'avancement de la connaissance, recherche de partenariat (2000).

*Liste des acteurs du projet*

- P.Ledru (BRGM), chef de projet
- B. Bourgeois (BRGM),
- N. Debeglia (BRGM),
- C. Jaupart (IPG Paris),
- R. Gable (BRGM),
- G. Grandjean (BRGM),
- A. Guillen (BRGM),
- L. Guillou Frottier (BRGM),
- P. Pezard (CEREGE Aix Marseille, ISTEEM Montpellier),
- F.X. Vaillant (BRGM).

## 4 - CONCLUSIONS

Les décisions gouvernementales sur le site argile et sur la continuation des travaux sur les granites ont été rendues publiques à fin 1998. A partir de cette date, les actions de Recherche et Développement menées dans le cadre du partenariat scientifique ANDRA-BRGM ont pu progresser substantiellement en conformité avec les ambitions de l'accord cadre signé en juillet 1998.

Dans le domaine des **milieux fracturés**, les disciplines concernées en 1999 ont été la géologie, la géochimie, l'hydrodynamique et l'hydromécanique :

- L'étude des séquences et des échelles de fracturation dans des contextes granitiques variés a été menée en fonction de la genèse de la roche et de l'histoire tectonique locale ; deux grandes classes de comportements sont identifiées : (i) organisation hétérogène en clusters (ii) organisation plus régulière le long de profils (*projet MODGEO*).
- La caractérisation géochimique des minéralisations des fractures a servi à investiguer le passé géologique et hydrogéologique du seuil du Poitou. L'année 1999 a permis de faire un point sur les datations des spéléothèmes par U, Th, Pa et Ra (et Sr, commencé en 1998) (*projet PALEOHYD*).
- L'étude des émergences du plateau du Cézallier, complétée par des expérimentations en laboratoire et in situ, a permis de préciser les processus de piégeage à partir d'eaux minérales soumises à oxydation et dégazage (*projet CEZALLIER*).
- La mise au point d'un prototype de mailleur automatique a fortement progressé en 1999. Ce travail a démarré par une phase approfondie de synthèse bibliographique. L'outil final doit générer un réseau d'éléments finis spécifiquement adaptés à la simulation des problèmes d'écoulement et de transport ; il intègre les discontinuités géologiques naturelles (failles notamment) et la géométrie d'ouvrages souterrains (*projet MODHYDRO*).
- L'interprétation des essais d'eau en milieu fracturé a progressé en 1999 avec l'état des connaissances (d'une part sur l'interprétation des essais, d'autre part, sur les structures de réseaux de fractures et leur modélisation) puis le démarrage d'une étude critique des méthodes classiques d'interprétation (*projet WELLTEST*).
- Enfin, une réflexion dans le domaine de l'hydrogéomécanique des fractures, (*projet MECASYNT*) portant sur le contexte scientifique mondial et les travaux antérieurs du BRGM, a été initiée à fin 1999.

Le second domaine d'application est celui des propriétés physiques et réactions chimique du **système eau-roche dans les argilites** ; ont été concernées la géologie, la géochimie et la physico-chimie :

- la stratigraphie séquentielle des sédiments des argilites de l'Est du Bassin Parisien a été précisée et un référentiel par l'étude des isotopes (notamment de O, C, U, Th, Sr et B) constitué (*projet SEDIMOR*).
- Des protocoles expérimentaux ont été mis au point pour extraire, sans pressage, les eaux d'une carotte d'argilite. Une cellule de dégazage a été construite qui permet de mesurer, dans ce même contexte, les pressions partielles des différents gaz. Un modèle d'acquisition et de régulation de la géochimie des eaux contenues dans les argilites a pu être validé par rapport aux données expérimentales du Mont Terri. Enfin, a été étudiée la sorption du strontium sur une montmorillonite du Wyoming (*projet THERMOAR*).

- Un protocole de caractérisation physique et structurale a été mis au point. Les propriétés diélectriques des argilites du Mont Terri ont été étudiées en fonction de leur teneur en eau. Une expérimentation des méthodes de résonance magnétique protonique sur des argilites a montré qu'elles peuvent conduire à des mesures exploitables à condition d'opérer à champ modéré (*projet TRANSFAR*).
- L'étude des modifications induites dans les argiles par hydratation d'un ouvrage en béton, a été proposée avec succès pour intégration dans le projet européen Ecoclay II (objectif : durabilité des barrières argileuses). Elle va démarrer en 2000 (*projet ALCAR*).
- Le développement d'une méthodologie d'analyse des compositions isotopiques ( $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$ ) des saumures en équilibration automatique est pratiquement achevé. Une méthode a été mise au point pour broyer des échantillons d'argiles à moins de 1  $\mu\text{m}$ . Les tests méthodologiques d'analyse isotopique directe de silicates/carbonates sur lame épaisse et la calibration du fractionnement intracristallin de l'oxygène sur 29 échantillons de kaolinites et dicktites/nacrites sont en cours de réalisation (*projet GEOTHERM*).

Enfin, le volet de **programme scientifique d'accompagnement** à la réalisation d'un laboratoire souterrain s'est traduit en 1999 par une revue bibliographique des recherches réalisées durant une vingtaine d'années de par le monde ; les perspectives ouvertes par un laboratoire souterrain en milieu granitique ont été examinées et la communauté scientifique susceptible d'être intéressée par l'aspect "observatoire " du milieu naturel a été identifiée. Les investigations ont été étendues aux autres sites possibles que les sites granitiques. Les contacts extérieurs doivent se multiplier en 2000 (*projet GRANITES*).