

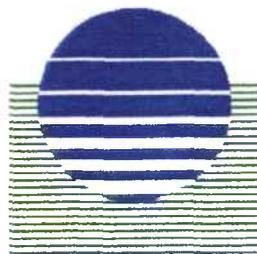
DOCUMENT PUBLIC

***Hydrogéologie des aquifères discontinus
Synthèse pour le business plan***

V. Petit, J. Cornet
avec la collaboration de
P. Lachassagne, YM Le Nindre, D. Poitrinal

**mars 1999
R 40269**

**B.R.G.M.
14. JUIN 1999
BIBLIOTHÈQUE**



BRGM
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Mots clefs : business plan, aquifères discontinus, altérites, fracturation, faisabilité, projet de développement.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Petit V., Cornet J. en collaboration avec Lachassagne P., Le Nindre YM., Poitrinal D. (1998) - PRD 324-98 - Hydrogéologie des aquifères discontinus. Synthèse pour le business plan. Rapport BRGM R 40269, 4 annexes, 41 p.

© BRGM, 1998, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Résumé

L'expertise dans le domaine de l'hydrogéologie des aquifères discontinus (milieu de socle) mérite d'être valorisée et développée au sein du BRGM aussi bien dans les domaines de l'eau que ceux de l'environnement et du risque. Dans ce but, une analyse et une compréhension de la demande ont été menées à partir d'enquêtes auprès des services régionaux du BRGM et des agences d'Antéa, en France et à l'étranger.

En France, on observe :

- Une évolution du marché de la prospection vers la qualité et la gestion ;
- La concurrence des eaux de surface ;
- La limitation des études préliminaires face aux techniques économiques de foration ;
- La nécessité parfois d'amortir des investissements eaux de surface avant d'envisager l'exploitation d'eaux souterraines.

La compétence et la motivation des techniciens de l'Etat influent beaucoup sur la prise en considération les eaux souterraines en milieu de socle.

A l'international, le BRGM bénéficie d'une image favorable. L'enquête indique que :

- Le marché des petites villes est plus abordable (investissements moins importants et cible des débits plus en concordance avec les possibilités du milieu fissuré).
- Il y a compétition entre eaux de surface et eaux souterraines ;
- Les appels d'offre sont nombreux et la concurrence reste forte.

Dans les régions sur lesquelles le BRGM opère (Guyane et Lozère principalement), le développement de l'exploitation des eaux souterraines est en cours. Par similitude, des perspectives commerciales intéressantes sont envisageables sur d'autres régions.

L'offre présentée par les différents acteurs sur le marché reste floue, étant donné que la spécialité « milieu fissuré » est rarement mentionnée sur les sources d'information disponible. La principale force du BRGM dans ce domaine est de disposer de l'ensemble des compétences nécessaires. Elles doivent cependant être fédérées pour un travail en commun. L'expertise dans le domaine de l'hydrogéologie des aquifères discontinus peut se développer selon trois axes :

- Recherche et développement
 - La mise au point de méthodologies et de techniques de prospection hydrogéologiques permettant de disposer de débits plus élevés ;
 - L'élaboration de méthodologies d'évaluation de la ressource en eau, à l'échelle patrimoniale ;
 - La mise au point d'approches spécifiques pour la gestion environnementale.
- Organisation d'une équipe pluridisciplinaire.
- Actions de communication vers les acteurs institutionnels et vers la communauté scientifique.

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Cadre fondamental du projet	6
2.1. Objectif général du projet.....	6
2.2. Les aquifères discontinus	6
2.3. Synergie avec d'autres produits BRGM	7
3. Analyse et compréhension de la demande	7
3.1. Clients.....	7
3.2. Marché.....	8
3.2.1. <i>France</i>	8
3.2.2. <i>Marché international</i>	10
3.2.3. <i>Perspectives commerciales</i>	11
4. Domaine de l'offre.....	12
5. Forces et faiblesses vis-à-vis de la concurrence	13
5.1. Compétences.....	13
5.2. Domaines connexes	13
6. Positionnement du produit.....	14
7. Scénarios d'actions	14
7.1. AXE 1 : travaux de recherche et développement.....	14

7.2. AXE 2 : équipe pluridisciplinaire	16
7.3. AXE 3 : actions de communication	16
7.3.1. <i>Actions de communication orientées vers les acteurs institutionnels</i>	16
7.3.2. <i>Actions de communication orientées vers la communauté scientifique</i>	17
7.4. Architecture du projet en 1998	18

ANNEXES

Annexe 1. Résultats des enquêtes sur l'hydrogéologie des aquifères discontinus

A1-1. Questionnaire d'enquête

A1-2. Résultats de l'enquête

A1-3. Estimation du marché prévisionnel de l'hexagone pour l'AEP

A1-4. Thèmes de recherche à développer

A1-5. Potentiel d'experts au BRGM (SP et DR)

Annexe 2. Domaine d'activité des concurrents/partenaires

Annexe 3. Liste du personnel compétent dans le domaine des aquifères discontinus

Annexe 4. Principaux axes de recherche scientifique

A4-1. Déclinaison de ces axes de recherche au sein des différents modules du projet

1. Introduction

La présente étude a été élaborée à la demande de la Direction de la Recherche du BRGM dans le cadre de la phase d'étude de faisabilité du projet de développement PRD 324-98 intitulé « hydrogéologie des aquifères discontinus » (milieu du socle).

2. Cadre fondamental du projet

2.1. OBJECTIF GÉNÉRAL DU PROJET

Le principal objectif du projet est de valoriser et de développer, au sein du BRGM, une expertise dans le domaine de l'hydrogéologie des aquifères discontinus. Cette expertise s'applique non seulement au domaine de la ressource en eau mais aussi à ceux de l'environnement et du risque.

Cet objectif s'inscrit dans la démarche de développement de l'activité « eau » au BRGM, qui passe par un démarquage de son offre par rapport à celle de la concurrence, sur des critères de spécialisation et de technicité, et dans la démarche de reconstitution de son rôle de « référence » en matière d'hydrogéologie.

2.2. LES AQUIFÈRES DISCONTINUS

Avec les formations à porosité d'interstices et les milieux karstiques, les roches à perméabilité de fractures (roches de socle, volcaniques, etc.) forment les trois principaux types d'aquifères représentés à la surface du globe.

Les roches de socle constituent le substratum d'une part importante des terres émergées. Elles sont ainsi présentes à des degrés divers au sein de la plupart des pays du monde (le tiers environ de la surface de la France métropolitaine). Elles forment en outre la majorité de la superficie de l'Afrique, de l'Amérique du Sud, du Canada, de l'Inde, de l'Australie et de l'Europe du Nord.

Les débits exploitables n'atteignent en règle générale pas les valeurs élevées obtenues au sein des aquifères poreux ou surtout karstiques. L'ubiquité du développement de la fracturation permet néanmoins de disposer, de manière quasi systématique, de forages productifs à proximité des lieux de consommation.

2.3. SYNERGIE AVEC D'AUTRES PRODUITS BRGM

Le projet de développement s'inscrit dans une synergie avec les autres projets de recherche à vocation « eau » du BRGM : hydrosystèmes karstiques et littoraux (PRR301), inondations (PRR302), Gestion optimale des ressources en eau (PRD 320), écoulements et transferts dans les milieux poreux et fracturés (PRR 303), Bretagne eau pure (PRD 318), déprise minière et qualité des eaux (PRD609) et, pour ce qui concerne certains volets techniques, avec des projets de recherche ou de Service Public d'autres domaines que celui de l'eau.

3. Analyse et compréhension de la demande

Dans le but de connaître le marché potentiel dans les domaines de la ressource et de l'environnement, pour ce qui concerne les aquifères discontinus, des enquêtes ont été menées auprès des services régionaux du BRGM et des Agences ANTEA. La demande a été étudiée en France et à l'étranger. Le compte-rendu exhaustif de ces enquêtes est présenté en annexe 1-1. Les principaux résultats sont repris ci-après.

3.1. CLIENTS

En France, les clients peuvent être différenciés entre les utilisateurs (communes, industriels, collectivités locales, particuliers) et les organismes en charge de l'aménagement du territoire et de la gestion de la ressource en eau (Conseils Généraux et Régionaux, Agences de l'eau principalement). Pour les premiers, la motivation est de trouver une ressource en eau de qualité associée à un moindre coût ou de gérer des problèmes environnementaux (aménagement, pollution etc.) pour lequel le facteur « eau » est toujours primordial. Dans ce dernier cadre, mais également en terme de ressource et en particulier d'évaluation de l'impact local d'une exploitation les prescripteurs (services de l'état chargés de faire appliquer la législation) ont un rôle important dans le développement du marché. Pour les autres, les objectifs se situent sur un espace plus étendu et à plus long terme. Ils souhaitent disposer d'éléments permettant la gestion de la ressource en eau et, par voie de conséquence, d'orienter une politique d'aménagement du territoire ou d'orienter au mieux un projet dans son environnement en limitant les impacts.

Les départements concernés par les aquifères discontinus sont au nombre de 46, répartis dans 14 régions.

Régions	Nombre de départements
Alsace	2 sur 2
Auvergne	4 sur 4
Basse-Normandie	3 sur 3
Bourgogne	4 sur 4
Bretagne	4 sur 4
Corse	2 sur 2
Franche-Comté	2 sur 4
Limousin	3 sur 3
Languedoc-Roussillon	4 sur 5
Lorraine	1 sur 3
Nord-Pas-de-Calais	2 sur 2
Pays-de-la-Loire	4 sur 5
Provence-Alpes-Côtes-d'Azur	5 sur 6
Rhône-Alpes	6 sur 8

En Afrique, les clients sont les administrations, les sociétés des eaux, les sociétés industrielles, et les organisations non gouvernementales éventuellement. Leur motivation est l'AEP des populations rurales et des centres urbains petits, voire grands (Ouagadougou, Bamako,...). Les zones de socle et de sédimentaire ancien sont indiquées sur la figure 1.

3.2. MARCHÉ

3.2.1. France

Le socle représente environ 30 % du territoire métropolitain. Toutes les activités liées à la demande en eau et à l'environnement ont besoin de compétences dans le domaine « milieu fissuré ».

Pour ce qui concerne la ressource en eau, il apparaît que le marché :

- existe vraiment dans la plus grande partie du Massif Armoricaïn : en Bretagne, dans les Pays de Loire et en Basse-Normandie (Nord Cotentin seulement). Dans ces secteurs, il est couramment fait appel aux eaux souterraines pour satisfaire les besoins en eau ;
- est potentiel dans le reste de ce massif (Sud Cotentin, Orne, Manche) et dans les autres zones de socle (surtout dans le Massif Central) ; les eaux souterraines y sont encore faiblement sollicitées.

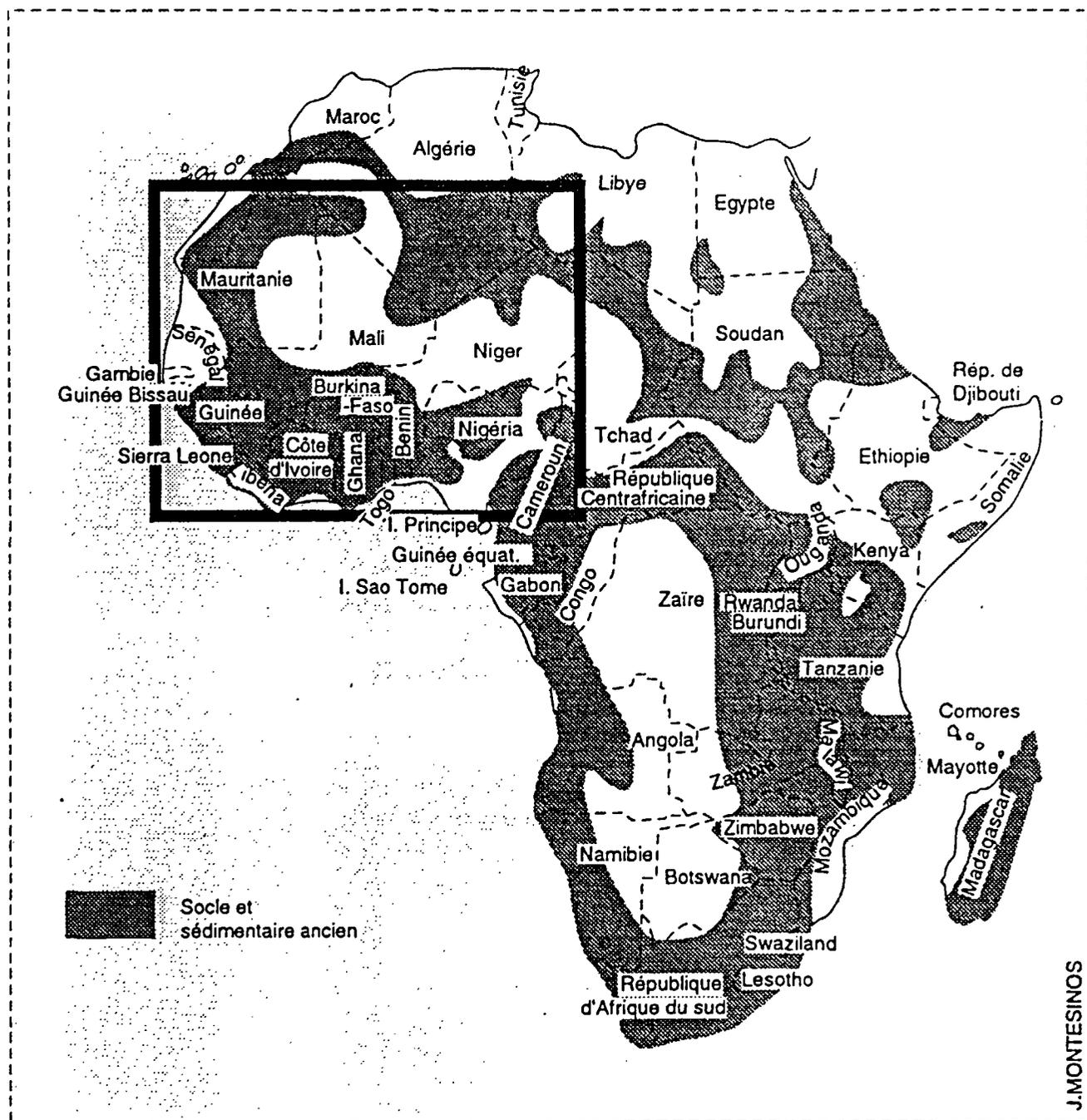


Fig. 1 – Zone de socle et de sédimentaire ancien

Quelques idées fortes ressortent de cette enquête :

- au niveau du contenu, le marché est en train d'évoluer de la prospection (actuellement en baisse) vers la résolution de problèmes liés à la qualité et à la gestion ;
- la concurrence des eaux de surface vis-à-vis des eaux souterraines est souvent indiquée. Les eaux de surface ont l'avantage d'être visibles et présentent moins d'incertitude pour évaluer les quantités qui peuvent être prélevées ;
- la réalisation de forages par des techniques économiques comme le marteau fond de trou tend à limiter les investissements dans les études préliminaires ;
- dans des contextes hydrogéologiques similaires, la prise en considération du potentiel en eaux souterraines dépend en fait de la compétence et de la motivation de techniciens (Services de l'Etat agissant en tant que conseil des collectivités en particulier) ;
- le recours aux eaux souterraines n'est pas envisageable par les collectivités ayant déjà engagé des investissements importants pour l'exploitation des eaux de surface. Même si l'exploitation des eaux souterraines est moins onéreuse, les autorités politiques souhaiteraient amortir d'abord les investissements réalisés.

3.2.2. Marché international

Concernant le marché international, nous reprendrons pour ce chapitre l'analyse du marché réalisée dans le cadre du business-plan de la gestion optimale des aquifères (GO/PRD320) pour au moins deux raisons. La première est qu'on peut considérer que l'hydrogéologie des aquifères discontinus en constitue un sous-ensemble. Ensuite, la spécificité « aquifères discontinus » n'est quasiment jamais mentionnée dans les sources d'information publique, comme les sites internet des bailleurs de fond. Aussi, une analyse des projets strictement identifiés en aquifères discontinus ne peut être menée faute de données accessibles aisément, sauf de manière indirecte en se référant à la zone couverte par le projet.

Le marché de l'Afrique francophone, relativement bien connu du BRGM et d'Antéa montre les caractéristiques suivantes :

- le groupe BRGM bénéficie d'une image favorable et forte grâce à sa place de leader sur le marché de l'hydraulique villageoise depuis 20 ans ;
- le marché des villes de petite taille est a priori plus abordable en raison des investissements de moindre importance. La cible des débits est aussi plus en concordance avec les potentialités du milieu fissuré ;
- il y a souvent compétition entre les eaux de surface et les eaux souterraines ;
- les clients recherchent une amélioration des performances de prospection et d'évaluation. Cette amélioration peut s'intégrer dans le sujet de l'hydraulique urbaine,

impliquant recharge artificielle (mais pas dans les aquifères discontinus) et contrôle de qualité ;

- les appels d'offre sont nombreux et la concurrence reste forte.

3.2.3. Perspectives commerciales

Une évaluation des retombées potentielles des travaux de recherche en cours peut être proposée, à titre d'exemple, pour les régions mieux connues par les acteurs du projet.

En **Guyane**, les premiers résultats relativement favorables obtenus (sur un échantillon de 10 forages, réalisés dans des conditions similaires à celles d'actions de prospection hydrogéologique opérationnelle, 70 % présentent un débit exploitable à long terme déterminé par pompages de 48 h, supérieur à 5 m³/h) laissent envisager de bonnes perspectives quant à la programmation, dans le cadre du prochain Contrat de Plan Etat Région, de travaux d'adduction en eau potable généralisés à l'ensemble des villages des Fleuves (Maroni, Oyapok). Le montant global des travaux (élaboration d'un schéma directeur, maîtrise d'œuvre, prospections, forages, équipement, mise en exploitation, etc.) pourrait atteindre plusieurs dizaines de MF sur une dizaine d'année, dont on peut évaluer que 20 % au moins pourraient revenir au groupe BRGM si celui-ci adopte une stratégie efficace. Des perspectives, plus ponctuelles, existent également pour l'AEP des villages et villes côtières. Le marché de la ressource en eau (étude, travaux) pourrait donc raisonnablement s'élever de 0,5 à 1 MF/an pendant 10 ans. L'exemple de la Guyane pourrait également servir de tremplin pour la prospection et le développement de nouveaux marchés en Amérique du Sud et Centrale ou en Afrique équatoriale.

Selon le même schéma, de bons résultats sur les forages de démonstration qui seront réalisés en 1999 en **Lozère**, permettraient, en collaboration avec ANTEA par exemple, de développer le marché de l'eau souterraine sur l'ensemble de la Lozère et, plus largement, sur le **Massif Central** et les autres régions de socle françaises, notamment sur le département de la **Loire**. A cet égard, l'obligation de régulariser les périmètres de protection des captages AEP devrait constituer une opportunité de privilégier la solution de prélèvement par forage qui permet de réduire significativement le nombre d'ouvrages de captage donc les coûts et servitudes associés aux périmètres de protection. En terme de montant de marché, environ 20 % des 50 communes situées sur le socle en Lozère ont des problèmes d'eau. Dans ces conditions, le marché peut être compris entre 2 et 5 MF (en estimant des dépenses comprises entre 200 et 500 kF par commune) pour le seul département de la Lozère. Si on suppose une répartition des investissements sur 10 ans, on obtient un marché annuel compris entre 200 et 500 kF/an.

On ne dispose de suffisamment d'éléments pour chiffrer le marché de la gestion de l'environnement, mais il ne peut que conforter les perspectives commerciales de l'hydrogéologie des aquifères discontinus.

4. Domaine de l'offre

Le domaine de l'offre a été exploré conjointement avec celui du projet GO. La spécialité de l'hydrogéologie des milieux fissurés si ce n'est par la localisation du projet est très rarement mentionnée dans les sources d'informations publiées par les diverses sociétés, bureaux d'études et organismes de financement. Ceci traduit souvent l'absence de spécialisation dans le domaine. Nous n'avons donc pas actuellement une image précise de l'offre présentée par les différents acteurs présents sur le marché. Le texte qui suit est commun avec celui du business plan du projet GO.

On a cherché à identifier les principaux concurrents étrangers. Les sources d'information consultées ont été GMI, ANTEA, les sites Internet des sociétés d'ingénierie. La liste de ces sociétés d'ingénierie n'est pas exhaustive (annexe 2). En effet, rien qu'aux États Unis d'Amérique, il existe des centaines de sociétés intervenant dans le domaine des eaux souterraines. On s'est donc attaché à identifier celles qui interviennent dans le domaine international. Ce tableau montre leurs compétences dans les principaux domaines couverts par GO.

Ce sont les sociétés d'ingénierie américaine ou du nord de l'Europe qui ont les sites Internet les plus développés et donc les mieux renseignés. En ce qui concerne l'Europe méditerranéenne, les informations recueillies se limitent souvent à une page de texte insérée dans des annuaires électroniques professionnels. Tahal (bureau d'étude israélien) est une exception à cette tendance Nord Sud.

En France et en Italie, nos principaux concurrents sont très souvent décrits assez succinctement voire seulement mentionnés dans les sites des groupes industriels qui les possèdent ou des annuaires professionnels.

Ces concurrents peuvent aussi être considérés comme des partenaires à l'occasion de montage d'offre : (i) soit pour des raisons commerciales parce que seul un groupement international d'entreprises a des chances d'être retenu : il s'agit donc dans ce cas d'un partage des prestations à des fins commerciales, (ii) soit pour des raisons techniques, en raison de l'expérience du BRGM dans le domaine des eaux souterraines lorsqu'il faut proposer une offre intégrée où le BRGM apporte sa spécificité « eaux souterraines », (iii) soit en raison d'une combinaison des deux raisons précédentes.

5. Forces et faiblesses vis-à-vis de la concurrence

5.1. COMPÉTENCES

Les compétences requises sont celles de l'hydrogéologie avec une expérience dans les aquifères discontinus. Ces compétences sont complétées en tant que de besoin par d'autres disciplines pratiquées au BRGM :

- géologie : spécialistes des formations cristallines, métamorphiques ou volcaniques, des altérites,
- géologie structurale : géométrie des réseaux de fractures, influence des états de contraintes,
- télédétection, Systèmes d'Information Géographique, analyse multicritère,
- hydrogéologie : de terrain, modélisation,
- géochimie (gaz et eau), hydrochimie,
- géophysique aéroportée et de terrain, etc.

L'ensemble de ces compétences existe au BRGM ; cela constitue une force. Il est cependant nécessaire de les fédérer pour un travail en commun sur des sujets.

Les effectifs identifiés dans le domaine de l'hydrogéologie des milieux fissurés (liste en annexe 3) se répartissent ainsi par niveau de maîtrise :

Niveau de maîtrise	Nombre d'agents (toutes catégories confondues) ayant une compétence en l'hydrogéologie des aquifères discontinus, disponibles actuellement au BRGM
Connaissance de base	7
Capacité confirmée	13
Expérimenté	18
Total	38

Source : Direction des Ressources Humaines du BRGM

5.2. DOMAINES CONNEXES

Dans un aquifère discontinu, un forage peut se révéler être sec et cependant être proche d'une anomalie positive. Dans ce cas de figure, il serait intéressant de disposer de méthodes géophysiques en forages qui soient rapides à mettre en œuvre et à interpréter (délai de 48 heures, durée maximale envisageable pour l'arrêt d'un chantier) et qui permettent de préciser l'implantation d'un nouvel ouvrage proche. Ce type de méthode est à développer.

6. Positionnement du produit

L'expertise dans le domaine de l'hydrogéologie des aquifères discontinus répond à la demande de disposer de débits plus importants dans les régions de socle. Comme décrit précédemment, cette expertise fait appel à des compétences variées et spécialisées. Notre force et notre originalité reposent sur le constat que ces compétences sont présentes et opérationnelles au BRGM ; cependant elles doivent être organisées pour la réalisation de travaux en commun.

7. Scénarios d'actions

7.1. AXE 1 : TRAVAUX DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

Les travaux de recherche et développement en cours en 1998 au sein du projet, prévus pour les années à venir dans le cadre des modules déjà programmés (cofinancés), ainsi que des propositions en terme de prospective, sont présentés en détail en annexe A1-4. Ils sont organisés selon trois types d'actions de recherche et développement :

La mise au point de **méthodologies et de techniques de prospection hydrogéologique** permettant de disposer, de manière économiquement acceptable, de forages d'eau à « gros » débit en contexte d'aquifères discontinus.

La maîtrise de ces techniques, qui peuvent de prime abord paraître plus du domaine d'action des bureaux d'étude que de celui du BRGM, est primordiale afin d'être à même de progresser dans la connaissance de la structure et du fonctionnement de ce type d'aquifère, connaissance sans laquelle le développement de produits innovants adaptés ne peut être envisagé. Elle est également indispensable pour promouvoir la mise en valeur de ce type d'aquifère (cf. Axe 3.). L'obtention de cofinancements importants sur ce thème (Guyane, Lozère) montre l'intérêt que suscite le volet « ressource » auprès de nos donneurs d'ordres. Le BRGM dispose en outre d'une avance technologique dans ce domaine, avec les méthodes émanométriques en particulier, qu'il serait préjudiciable de ne pas maintenir.

L'élaboration de **méthodologies d'évaluation de la ressource en eau**, à l'échelle patrimoniale, en contexte d'aquifères discontinus.

Ce type de produit répond directement aux attentes des donneurs d'ordres que constituent, en France ou à l'étranger, la puissance publique ou les agences d'objectifs. Les résultats qui en seront tirés de manière opérationnelle doivent permettre d'alimenter en données « amont », comme pour les autres types d'aquifères (poreux, karstiques), les outils de gestion globale de la ressource en eau, tels qu'ils sont par exemple envisagés dans le cadre du projet GO. Ce principe s'applique aussi aux aquifères volcaniques

Il faut également souligner l'intérêt, pour l'accroissement de la ressource, des techniques de recharge artificielle avec un contrôle de la qualité. C'est le cas pour tous les pays du Sahel en zone de socle. C'est un domaine inexploré et a priori ardu sur le plan technique. Néanmoins, un développement et une mise au point sont envisageables dans le cadre d'un projet de recherche. Une telle méthode pourrait être appliquée dans les zones où les ressources en eau sont déficitaires par rapport aux besoins. Nous avons connaissance d'une expérience en Australie sur laquelle aucune information n'a pu être récupérée..

La mise au point d'**approches spécifiques pour la gestion environnementale** de ce type d'aquifères (prévision de l'impact d'un aménagement, mitigation d'une pollution, établissement de périmètres de protection de captages, etc.).

Actuellement, la modélisation des aquifères discontinus est envisagée de deux points de vue différents :

- à petite échelle, en considérant l'aquifère comme un milieu poreux équivalent. Cette approche permet une analyse de sensibilité de la problématique à traiter mais n'autorise en aucun cas de prévision fiable à l'échelle du terrain,
- à grande échelle, en considérant chaque fracture de manière discrète. Seules les problématiques disposant de moyens d'investigation très importants (de type « stockage de déchets radioactifs » par exemple) peuvent être approchées de manière fiable. En outre, compte tenu des sites étudiés (zones de stockages profonds), la caractérisation du fonctionnement de la zone active et le couplage avec les formations superficielles (altérites en particulier) sont rarement abordés.

La résolution des problématiques environnementales en contexte d'aquifères discontinus passe donc par la recherche d'une approche médiane qui permette d'apporter des réponses d'une fiabilité acceptable pour un coût compatible avec les projets considérés. Cette approche pourrait par exemple reposer sur un traitement de type « milieu continu » pour les formations superficielles, un traitement stochastique du socle fracturé, informé à partir de données directes et indirectes (déduites des techniques d'implantation de forages par exemple) et un couplage des deux ensembles reposant sur la conceptualisation des écoulements au niveau de cet interface, en conditions naturelles ou influencées par pompage.

Il est proposé de traiter de manière chronologiquement enchaînée ces trois types d'actions de recherche et de développement. Les efforts de ces dernières années se sont essentiellement portés sur le volet « méthodologies de prospection » (projets Guyane, première partie du projet Lozère, etc.). Ils convergent actuellement vers les modalités d'évaluation de la ressource (projets SP, deuxième partie du projet Lozère, etc.). Il conviendrait de rechercher des opportunités permettant de les orienter également à l'avenir vers la problématique de la gestion environnementale de ce type d'aquifère

(projet de service public en cours concernant les guides pour l'établissement des périmètres de protection, projets d'environnement minier par exemple).

Les travaux de recherche mis en œuvre dans ce cadre concourent à une meilleure connaissance fondamentale de la structure et du fonctionnement des aquifères discontinus qui enrichit en retour les méthodologies développées. Des fiches produites sont à envisager pour valoriser les résultats attendus de la recherche.

7.2. AXE 2 : ÉQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE

Une équipe pluridisciplinaire est en cours de constitution, en particulier grâce aux travaux menés en commun dans le cadre des projets en cours (cf. annexe 4.). Elle doit fédérer des compétences citées au paragraphe 5.

Dans le cadre du Business Plan, un recensement plus large des compétences disponibles dans le domaine de l'hydrogéologie a été effectué.

7.3. AXE 3 : ACTIONS DE COMMUNICATION

Il est proposé de mener deux types d'actions de communication orientées vers les deux cibles que constituent les acteurs institutionnels d'une part et la communauté scientifique d'autre part.

7.3.1. Actions de communication orientées vers les acteurs institutionnels

Pour des raisons diverses, tant techniques qu'administratives, et variables selon les pays, la ressource en eau souterraine des régions d'aquifères discontinus est peu ou pas exploitée. Elle constitue donc souvent un nouveau gisement, susceptible de permettre un incrément de développement économique.

Dans les régions arides (Afrique sahélienne par exemple), les eaux souterraines constituent la seule ressource disponible ; l'eau des aquifères discontinus est déjà valorisée. Néanmoins, son utilisation est souvent limitée à de « l'hydraulique villageoise », dont les faibles débits ne justifient pas d'investissements importants en terme d'études préliminaires ou pour sa gestion. Ici encore, des potentiels restent donc inexploités. En France, les eaux souterraines des aquifères discontinus du Massif Central et d'autres zones de socle moins étendues sont encore largement sous-utilisés

Une communication à l'attention des acteurs institutionnels vise à provoquer une évolution des mentalités, par la prise de conscience (i) de l'existence d'une ressource en eau souterraine en contexte de socle, (ii) des possibilités de développement durable qu'elle offre, (iii) de ses avantages du point de vue de la qualité, de sa répartition par

rapport à celle des eaux de surface, des coûts de traitement et des infrastructures d'adduction, etc. Cette évolution des mentalités doit permettre de ne pas exclure a priori la solution « eau souterraine » des projets qui concernent le domaine de l'eau en contexte de socle, voire d'encourager l'utilisation de cette ressource, de manière autonome ou associée aux eaux de surface.

Deux types de moyens sont proposés pour mener cette « communication institutionnelle » :

- la participation à des conférences ou congrès non spécifiquement scientifiques où peuvent être transmis des messages plus politiques à l'attention des décideurs, des milieux associatifs, voire du grand public. Transmission d'éléments d'information à l'attention des participants BRGM à ces conférences. En 1998, une contribution a été apportée à la conférence internationale de l'eau de Paris du mois de mars. Il est également prévu de participer à un groupe de travail de la conférence internationale sur les « ressources en eau du monde à l'aube du XXI^e siècle » (Unesco, Paris, juin 1998), avec une présentation sur ce thème,
- par une valorisation médiatique et vis à vis des décideurs, à l'échelle locale et nationale, des actions de démonstration prévues dans le cadre des projets en cours : forages d'eau en cours en Guyane, forages prévus en 1999 en Lozère (qui comprennent bien entendu principalement un objectif de validation technique des travaux scientifiques mis en œuvre). Cette valorisation doit aussi être menée auprès des hydrogéologues départementaux.

En période de prise de conscience de l'importance de la problématique de l'eau à l'échelle mondiale, ce type d'action de communication devrait trouver sans grande difficulté des vecteurs de transmission efficaces vers les acteurs institutionnels. Le lobbying des eaux superficielles devra être pris en compte.

7.3.2. Actions de communication orientées vers la communauté scientifique

Il s'agit d'un mode de communication classique, académique, destiné :

- par le biais de publications dans des revues spécialisées, à valider sur des bases scientifiques solides les travaux de recherche menés dans le cadre du projet. Les années 1998 et 1999 seront ainsi mises à profit pour valoriser les travaux et résultats obtenus en Guyane. L'association avec l'équipe de l'Université de Paris VI (Pr. de Marsily) sur le module « Inde » devrait concourir à une large diffusion des publications envisagées,
- par l'intermédiaire de participations à congrès, ciblés sur la thématique particulière des aquifères discontinus, à intégrer l'équipe de projet à la communauté des spécialistes des aquifères discontinus. A cet égard, il est prévu de participer activement à la commission « Hard Rock Hydrology » de l'Association

Internationale des Sciences Hydrologiques (AIH-AIHS), prochaine rencontre prévue en Allemagne en octobre 1998, et, si possible, de monter une action COST sur l'un des thèmes présentés en 4.1

7.4. ARCHITECTURE DU PROJET EN 1998

Les propositions d'action présentées ci-dessus, s'intègrent, pour celles qui concernent le court terme, dans le cadre de l'organisation actuelle du projet.

En 1998, le PRD 324 comprend trois modules distincts de recherche et développement :

- « Villages des Fleuves » : démarrage en 1994, fin prévue en 1999,
- « Lozère » : début en 03/98, fin prévue en 2000,
- « Inde » : démarrage prévu 2^{ème} semestre 1998,

et un module comprenant conduite de projet, élaboration du Business Plan et actions de communication et montage de nouvelles opérations et recherche de cofinancements.

Les deux premiers modules R&D font l'objet de cofinancements d'ores et déjà acquis. Le troisième module, pour lesquels les cofinancements, plus modestes (charges externes), ne sont pas encore acquis, s'inscrit dans le cadre d'une coopération franco-indienne.

D'autres opérations, en cours de montage (Ressource en eau des ophiolites d'Oman, Djibouti, etc.), pourraient, dans le cas d'une issue favorable, s'intégrer dans les années à venir au projet sous forme de nouveaux modules.

Ces travaux de recherche sont menés en parallèle avec des projets de Service Public, gérés au Centre Thématique Eau ou dans les SGR, en synergie avec et/ou directement par l'équipe du projet de recherche :

- « Ressource en eau du socle » (DR et CT Eau),
- « Ile de Cayenne » (DR et SGR/Guyane),
- « Les périmètres de protection en milieu fissuré : exemples et principes d'application » (CT Eau et DR),
- « Réseaux piézométriques en contexte de socle » (DR pour SGR/LIM, SGR/PAL).

Des synergies seront recherchées avec ANTEA tant pour ce qui concerne les travaux menés en métropole (AEP, ETM) qu'à l'étranger (Afrique, Inde, etc.).

- Annexe 1- Résultats des enquêtes sur l'hydrogéologie des aquifères discontinus

A1-1. Questionnaire d'enquête

Un questionnaire d'enquête a été préparé, comportant :

- le rappel de l'objectif général de projet : développement des techniques et méthodologie de prospection, mise en exploitation, et d'évaluation et gestion ;
- le rappel des principales actions de recherche concernant divers contextes hydro-climatiques en France et à l'étranger, et en terme d'évaluation, de protection des captages et de réseaux piézométriques ;
- les points à renseigner : clients, marché, concurrence, communication.

Ce questionnaire a été adressé :

⇒ pour la France : aux SGR et agences ANTEA concernés par les zones de socle, à savoir :

- **Massif Armoricaïn**

Les SGR Basse Normandie, Bretagne, Pays-de-la-Loire ;

Les Agences Basse-Normandie, Bretagne, Pays-de-la-Loire ;

- **Massif Central :**

Les SGR Auvergne, Bourgogne, Limousin, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Rhône-Alpes ;

Les agences Auvergne, Bourgogne-Franche-Comté, Poitou-Limousin-Touraine, Midi-Pyrénées, Rhône-Alpes ;

- **Massif des Vosges :**

Les SGR Alsace, Franche-Comté, Lorraine ;

Les agences Alsace, Bourgogne-Franche-Comté, Lorraine ;

- **Maures, Estérel, Corse :**

Les SGR Corse, Provence-Alpes-Côte-d'Azur ;

Les agences Corse, Provence-Alpes-Côte-d'Azur ;

- **Socle guyanais : le SGR Guyane ;**

⇒ Pour l'Afrique francophone : à ANTEA et à GMI.

A1-2. Résultats de l'enquête

A1-2.1. Pour la France

Concernant les SGR, les réponses sont parvenues des régions suivantes: Alsace, Auvergne, Basse-Normandie, Bretagne, Bourgogne, Lorraine, Pays-de-la-Loire, Poitou-Charentes, Rhône-Alpes ; pour la Franche-Comté, et le Limousin, on a utilisé les informations d'agents BRGM ayant œuvré dans ces régions.

Les agences ANTEA ayant répondu sont : Auvergne, Champagne-Ardenne, Lorraine, Midi-Pyrénées, Poitou-Limousin-Touraine.

Les résultats présentés ci-après sont ceux des SGR, sauf mention d'ANTEA.

A1-2.1.1. Le marché actuel, son développement sur place

Le marché existe principalement dans le Massif Armoricaïn, en Bretagne, dans les Pays-de-la-Loire et en Basse-Normandie (Nord Cotentin seulement), et à moindre titre dans le Massif Central (Auvergne, Creuse, Loire) et dans d'autres zones que celles de socle (Avesnois, Boulonnais).

- **Massif Armoricaïn**

En Basse-Normandie, dans le Nord Cotentin, le BRGM a réalisé antérieurement une étude de synthèse débouchant sur la réalisation d'un certain nombre de forages. Cette opération a permis de positionner ANTEA comme opérateur pour le District de La Hague.

En Bretagne et dans les Pays-de-la-Loire, les clients doivent être différenciés entre :

- les utilisateurs : collectivités de niveau communal, industriels, clients des bureaux d'études hydrogéologiques, qui sont ANTEA, AQUA-TERRA, GEOARMOR, LITHOLOGIC ;
- les aménageurs du territoire national : Conseils généraux et Agences de l'eau, qui sont les clients du BRGM et de certains bureaux d'études.

Dans ces deux régions, la motivation des utilisateurs est de trouver une ressource en eau de qualité associée à un moindre coût, ponctuellement et à court terme. Celle des aménageurs suit ce couple d'objectifs, mais sur un espace plus étendu, à plus long terme et à condition d'assurer en priorité l'amortissement des investissements déjà en cours (barrages, conduites d'interconnexion), comme c'est le cas dans les Côtes d'Armor.

Aussi, dans une optique de développement, l'intervention du BRGM sur ce marché devrait se concevoir comme l'apport d'un « plus » technique et économique, à terme variable selon les priorités des aménageurs, et dans le cadre d'une gestion globale et durable. Ce plus doit porter sur :

- l'identification à l'échelle départementale des zones possibles de recours aux ressources souterraines de milieu fissuré, dans un souci de complémentarité ou de subsidiarité progressive, par rapport aux ressources exploitées, à l'instar de ce que le BRGM a déjà réalisé dans le département de la Mayenne ;

la définition de méthodes de prospection :

- particulièrement efficaces, l'objectif de débit unitaire par ouvrage étant supérieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$;
- et devant anticiper la gestion, en intégrant la connaissance du bassin d'alimentation concerné et des relations rivière-nappe, en vue de la conservation du débit obtenu aux essais et de la détermination des périmètres de protection.

Ce « plus » reste à créer, qui permettrait d'éviter la concurrence, tout au moins dans un premier temps, et avec les réserves suivantes formulées dans l'analyse de G. Duermael.

En effet, si l'identification des zones de recours préférentiel aux eaux des milieux fissurés paraît envisageable en Bretagne, à l'échelle régionale, où les élus sont motivés, sa réalisation dans les Pays-de-la-Loire, en dehors de la Mayenne, où elle est faite, passe par la réussite préalable d'une communication efficace auprès des élus.

De ce fait, il conviendrait de changer l'image qu'ils ont des eaux souterraines, et aussi celle qu'ils se sont faite du BRGM sous l'influence de certains hydrogéologues départementaux. Leur vision des eaux souterraines est en effet empreinte de difficultés qu'ils ne cherchent pas à surmonter : ressource limitée, recherche aléatoire, et selon la profondeur, vulnérabilité aux nitrates ou présence de fer entraînant des surcoûts de traitement d'eau et de décolmatage des crépines. Mais modifier ce ressenti implique aussi de déjouer les contre-attaques des élus/sociétés de distribution d'eau préférant les eaux de surface.

Enfin, il apparaît que si le BRGM veut aller au-delà des études de type recherche en visant à développer l'activité eau en région, il n'a guère d'autre solution que de s'appuyer sur un financement incitatif de l'Etat (redistribution de la dotation) ou de

l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, à défaut de pouvoir entrer dans un système de lobbying (comme celui des bureaux d'études liés aux grands distributeurs d'eau, dont les études sont intégrées à des budgets d'investissement).

• **Massif Central**

En Limousin, dans le département de la Creuse, le recours aux eaux de surface (rivières, plans d'eau), aux nappes alluviales, et aux captages de sources, concurrence fortement la recherche d'eau dans les milieux fissurés qui n'intervient qu'à titre complémentaire. De plus, cette recherche n'implique au mieux que des études réduites au strict minimum : en effet, il revient moins cher de faire plus de forages au marteau fond de trou, en escomptant que sur le nombre, au moins un sera positif, compte tenu des faibles débits recherchés.

Dans la Vienne, les décideurs ne visent que les eaux de surface pour assurer l'AEP.

En Corrèze, 400 forages ont été réalisés au cours des quinze dernières années, à l'initiative de la DDAFF, mais se pose le problème de teneurs anormales en arsenic. Aussi, en fonction des solutions qu'il pourra apporter, le BRGM pourra pénétrer et développer ce marché.

En Auvergne, les ressources sont relativement méconnues. Pour faire démarrer le marché, des techniques efficaces de prospection sont à trouver, mais aussi une action de communication du BRGM serait nécessaire, par exemple dans le cadre du festival annuel international de l'eau de Besse (63). Par ailleurs la DIREN et les DDAF seraient prêtes à aider au développement de la recherche sur les milieux fissurés, le socle occupant 60 % de la superficie régionale.

Cependant ANTEA signale qu'un marché existe, dont il estime sa part à 1 à 2 MF/an. Celle-ci se répartit entre l'AEP (60 %) et les eaux minérales et thermales (40 %). La tendance de l'évolution de cette part est à la baisse depuis quelques années, et le marché se déplace de la prospection vers les problèmes de qualité et de gestion.

ANTEA attire également l'attention sur l'intérêt qu'il y aurait à mener dans cette région deux actions concernant les aquifères volcaniques, la troisième concernant les eaux minérales et thermales, à savoir :

- définir une méthode d'évaluation des ressources en eau mobilisables dans les coulées volcaniques (multicouches sans épontes semi-perméables) à l'échelle de l'exploitation,
- déterminer les moyens d'intervention en cas de pollution,
- procéder à une réflexion sur la notion de mélange, afin d'implanter les ouvrages en fonction des caractéristiques chimiques à retrouver.

En Rhône-Alpes, où la majeure partie du territoire permet le recours aux ressources des milieux fissurés, la préférence pour l'utilisation des eaux superficielles n'est pas évidente à changer. Ce changement est d'autant moins évident que les ressources d'appoint ou de substitution dégagées par les recherches se sont avérées d'intérêt économique moindre que les ressources existantes. Cependant le département de la Loire, dont la problématique se rapproche de celle de l'opération de recherche menée par le BRGM en Lozère, pourrait être un terrain d'application privilégié des techniques performantes éventuelles auxquelles cette opération pourrait conduire.

ANTEA constate que le marché est effectivement peu important, sa part étant seulement de 300 kF en quatre ans dans le département de la Loire, et les commandes se passant souvent de gré à gré des collectivités locales aux bureaux d'études présents (ANTEA, BURGEAP, HORIZONS). Elle a remarqué que les techniques de recherche d'eau utilisées (photo-interprétation, prospection du radon et géophysique) sont jugées satisfaisantes malgré l'absence de garantie des débits de production des ouvrages qu'elles conduisent à implanter.

- Vosges

En Lorraine, ANTEA précise que le marché est surtout orienté sur les eaux minérales. En effet, il n'y a pas de motivation pour les petites collectivités, situées dans les parties hautes du massif vosgien, à remplacer leurs captages de sources, très rarement à sec, parce qu'ils sont gravitaires, donc à frais d'exploitation limités, et que les sources bénéficient d'un environnement forestier qui les protège efficacement des pollutions. Quant aux collectivités plus importantes, situées en contre-bas, elles sont alimentées par les nappes alluviales.

- Guyane

Les premiers résultats relativement favorables obtenus (sur un échantillon de 10 forages, réalisés dans des conditions similaires à celles d'actions de prospection hydrogéologique, 70 % présentent débit exploitable supérieur à 5 m³/h) laissent envisager de bonnes perspectives quant à la programmation, dans le cadre du prochain Contrat de Plan Etat Région, de travaux d'adduction en eau potable généralisée à l'ensemble des villages des Fleuves (Maroni, Oyapok).

Le montant global des travaux (élaboration d'un schéma directeur, maîtrise d'œuvre, prospections, forages, équipement, mise en exploitation, etc.) pourrait atteindre plusieurs dizaines de MF sur une dizaine d'année, dont on peut évaluer que 20 % au moins pourraient revenir au groupe BRGM si celui-ci adopte une stratégie efficace. Des perspectives, plus ponctuelles, existent également pour l'AEP des villages et villes côtières.

Le marché de la ressource en eau (étude, travaux) pourrait raisonnablement s'élever à 1 MF/an pendant 10 ans. L'exemple de la Guyane pourrait également servir de tremplin pour la prospection et le développement de nouveaux marchés en Amérique du Sud et Centrale ou en Afrique équatoriale. Des opérations ont d'ores et déjà été signées avec des organismes de cofinancement (Villages des Fleuves, Lozère).

On ne dispose de suffisamment d'éléments pour chiffrer le marché de la gestion de l'environnement. Mais il conforte les perspectives commerciales de l'hydrogéologie des aquifères discontinus.

- **Autres zones concernées par les aquifères fissurés**

Le SGR Nord-Pas-de-Calais signale une forte motivation de l'Agence de l'eau Artois-Picardie pour la recherche dans l'Avesnois (calcaires et grès primaires) et le Boulonnais (calcaires primaires), et la bonne image du BRGM, du fait de son activité passée dans ce domaine, ainsi que l'absence de concurrence. Mais il est nécessaire d'acquérir au préalable une connaissance suffisante du fonctionnement de ces aquifères.

A1-2.1.2. Développement géographique du marché

Un marché potentiel existe dans d'autres secteurs des zones de socle présentées ci-dessus, à savoir :

Massif armoricain : Basse-Normandie (Sud Cotentin, Orne, Manche) ;

Massif Central : Limousin, (Corrèze, Haute-Vienne), Bourgogne (Saône-et-Loire), Languedoc-Roussillon (Lozère) ;

Vosges : Alsace, Franche-Comté (Haute-Saône), Lorraine.

Il est envisageable également dans d'autres zones de socle (massif cristallin alpin, Corse).

- **Massif Armoricain**

L'extension de la démarche réalisée par le BRGM dans le Nord Cotentin (étude de synthèse, cf. § 2.1.1) n'est pas évidente en l'absence de maître d'ouvrage identifié.

- **Massif Central**

Pour donner réalité à ce marché dans le Limousin, des actions de promotion de l'intérêt économique des ressources en eau des milieux fissurés sont nécessaires auprès des Conseils généraux, des Agences de l'eau et de la Direction Générale de la Santé (problème de l'arsenic), en tenant compte du contexte local de l'économie de l'eau.

Dans la région Bourgogne, en Saône-et-Loire, où les eaux superficielles des retenues (région du Creusot, Autun) posent des difficultés de traitement à cause de variations saisonnières de la qualité, il convient de bien situer le créneau des ressources souterraines de milieu fissuré (ressource de substitution à prélever de manière dispersée, en utilisant les vastes réseaux d'adduction existants).

Dans la région Languedoc-Roussillon, en Lozère, le conseil général mène une politique volontariste visant à prendre en compte les eaux souterraines, dans le cadre de schémas directeurs des ressources en eau, à double titre : limiter les investissements lourds (interconnexion et retenues de surface) et réduire des coûts d'établissement des périmètres de protection (remplacement de plusieurs captages par un seul).

Selon le même schéma que pour la Guyane (cf. § 2.1.1 ci-dessus), de bons résultats sur les forages de démonstration qui seront réalisés en 1999 permettraient, en collaboration avec ANTEA par exemple, de développer le marché de l'eau souterraine sur l'ensemble de la Lozère et, plus largement, sur le Massif Central et les autres régions de socle françaises, notamment sur le département de la Loire.

A cet égard, l'obligation de régulariser les périmètres de protection des captages AEP devrait constituer une opportunité de privilégier la solution de prélèvement par forage qui permet de réduire significativement le nombre d'ouvrages donc les coûts et servitudes associés aux périmètres de protection.

En terme de montant de marché, environ 20 % des 50 communes situées sur le socle ont des problèmes d'eau. Dans ces conditions, le marché peut être compris entre 2 et 5 MF (en estimant des dépenses comprises entre 200 et 500 kF par commune) pour le seul département de la Lozère.

Dans la région Rhône-Alpes, en Ardèche et dans le Rhône, on peut identifier comme clients potentiels, les conseils généraux et l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, ainsi que, plus particulièrement dans le Beaujolais, les syndicats des eaux. Il est nécessaire d'y mener une campagne d'information préalable sur les aquifères fissurés.

• Vosges

En Haute-Saône, il s'agit comme en Limousin, d'améliorer les conditions de captage (forages au lieu de sources), en terme de qualité, protection sécurisée, pénurie d'étiage évitée.

En Alsace une réflexion préalable est à faire sur la relation zone fracturée-présence d'arsenic.

En Lorraine, l'intérêt se situe au niveau de la méthodologie d'établissement des périmètres de protection, pour une application la plus rapide possible.

- **Massif cristallin alpin**

Dans les départements de l'Isère, de Savoie et de Haute-Savoie, les clients potentiels sont les conseils généraux et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse. Une campagne d'information préalable est nécessaire.

- **Corse**

Le SGR Corse indique seulement que le sujet intéresse fortement les administrations.

A1-2.2. En Afrique francophone (occidentale et centrale)

Les résultats sont fournis par YM. Le Nindre à partir de ceux de M. Laval (GMI), M. Gageonnet et H. Torrent (ANTEA). ANTEA et GMI s'accordent à considérer que les ressources en eaux souterraines de milieu fissuré constituent un gros marché à forte perspective de développement.

Les clients sont les Administrations africaines, Sociétés des eaux, Sociétés industrielles, avec, pour motivation, l'AEP des populations rurales et des centres urbains petits, voire grands (Ouagadougou, Bamako,...).

Le produit à développer correspond à l'amélioration des performances de prospection et évaluation, que le groupe BRGM a réussies (radon, fracturation hydraulique et recharge) pour obtenir des débits unitaires par ouvrage, supérieurs à 5 m³/h, et assurer une gestion durable. Il peut s'intégrer dans « le sujet technique n° 1 du 21^{ème} siècle », selon H. Torrent, de l'hydraulique urbaine, impliquant recharge artificielle et contrôle de la qualité.

Le groupe BRGM, à travers ANTEA, occupe la place de leader depuis 20 ans sur les programmes d'hydraulique villageoise, et dispose d'une image forte. Mais il doit engager une action de communication dans le cadre des projets d'hydraulique villageoise et semi-urbaine, pour rééquilibrer l'importance de la recherche d'eau par rapport aux aspects sociologiques de gestion des points d'eau par les populations.

Les appels d'offres sont nombreux, et la concurrence reste forte (BURGEAP, BCEOM, SOGREAH, IGP, DIWI, BELLER CONSULT, DORCH CONSULT, AQUAWATER, IWACO,...). Les entreprises de forages sont nombreuses (FORACO, COFOR, FORAFRIQUE, entreprises chinoises, PRAKLA,...). Les partenaires incontournables sont les bureaux d'études locaux.

A1-3. Estimation du marché prévisionnel de l'hexagone pour l'AEP

Le marché actuel et potentiel couvre les régions et le nombre de départements suivants :

Régions	Nombre de départements
Alsace	2 sur 2
Auvergne	4 sur 4
Basse-Normandie	3 sur 3
Bourgogne	4 sur 4
Bretagne	4 sur 4
Corse	2 sur 2
Franche-Comté	2 sur 4
Limousin	3 sur 3
Languedoc-Roussillon	4 sur 5
Lorraine	1 sur 3
Nord-Pas-de-Calais	2 sur 2
Pays-de-la-Loire	4 sur 5
Provence-Alpes-Côtes-d'Azur	5 sur 6
Rhône-Alpes	6 sur 8

soit 46 départements répartis dans 14 régions.

L'enquête fournit les parts de marché de ANTEA sur quelques départements de l'hexagone, à savoir :

- 75 kF/an dans la Loire,
- 150 à 300 kF/an, soit 225 kF/an comme moyenne départementale en Auvergne, soit une moyenne de 200 kF/an par département, actuellement.

En prenant pour hypothèse une part de marché de 200 kF/an par département, on obtient un montant prévisionnel de l'ordre de 10 MF/an, pour la part du marché qui pourrait être développée par le groupe BRGM.

A1-4. Thèmes de recherche à développer

L'enquête réalisée permet de dégager une liste exhaustive de besoins :

- en méthodologie nouvelle aux différents stades de la recherche d'eau, de l'exploitation, et de la mise en place des périmètres de protection des captages, que l'on a regroupé dans les sept rubriques suivantes,
- argumentation technico-économique à l'intention des décideurs, maîtres d'ouvrages et bailleurs de fonds.

L'enquête révèle l'urgence :

- à développer une méthodologie pour la détermination des périmètres de protection,
- à évaluer au préalable la qualité naturelle des eaux par rapport aux normes de potabilité. Pour cela, faciliter l'utilisation du fond géochimique permettrait de réduire les risques de trouver des teneurs métalliques rédhibitoires,
- et à informer les décideurs sur l'intérêt technico-économique des eaux des aquifères fissurés.

A1-4.1. Evaluation globale

Développer l'interprétation des débits des cours d'eau drainants (courbes de tarissement,...), comme cela a été réalisé par exemple dans la thèse de D. Jauffret en Basse-Normandie. L'évaluation globale a pour objectif la détermination de la ressource, évaluer la recharge, identifier les secteurs préférentiels.

Développer une méthode de cartographie des zones a priori favorables à la recherche d'eau en milieu fissuré à l'échelle départementale (1/100 000^e), et d'établir les relations entre la lithologie et les caractéristiques des ouvrages. Ces analyses pourraient être croisées avec les limites administratives des groupes de collectivités distribuées et leurs captages actuels ainsi qu'avec l'occupation du sol.

Généraliser l'utilisation du fond géochimique pour éviter les zones à teneurs métalliques excessives dans les eaux.

A1-4.2. Prospection

Photogéologie, radon, géophysique : évaluer l'efficacité de ces méthodes à l'aide des expériences des vingt dernières années en France et en Afrique ;

- Gaz : faire le point sur la technique multigaz (Rn, He, CO₂) ;

- « Hydrophotogéologie », selon le terme de H. Talbo : en définir et codifier les règles avec la recherche de la relation direction de fracturation/débit (ex : étude photogéologique des sites productifs en Afrique-Burkina) ;
- Géophysique : utiliser la résonance magnétique des protons .

A1-4.3 Evaluation des ressources en eaux mobilisables à l'échelle de l'exploitation

- Améliorer l'interprétation des tests de pompage en milieu fissuré,
- Définir les temps de pompages nécessaires ;
- Prendre en compte les relations avec les eaux superficielles ;
- Concevoir une méthode permettant d'affiner le bassin d'alimentation du forage d'exploitation (difficulté signalée par Y. Lemordant, dans le Finistère).

A1-4.4. Protection des captages

Développer une méthodologie de détermination des périmètres de protection.

A1-4.5. Traitement des eaux arséniquées

Mettre au point une méthode rustique, pour prévenir une évolution des teneurs en arsenic au cours de l'exploitation des forages.

A1-4.6. Valorisation des forages

- Faire le point sur les méthodes actuelles de développement de forages ;
- Mettre au point une méthode de valorisation d'un forage sec proche d'une anomalie ;
- Etudier la recharge (artificielle) ;
- Pour mémoire (eaux minérales) : Etudier la notion de mélange dans l'optique d'implanter des ouvrages en fonction des caractéristiques chimiques des eaux recherchées.

A1-4.7. Développement des réseaux de suivi

Concevoir ces réseaux de mesures piézométriques et hydrologiques en tant qu'outils de connaissance (relation pluie-débit, infiltration efficace,...) selon l'idée de H. Talbo.

A1-4.8. Intérêt technico-économique de l'eau des aquifères discontinus

Etablir une plaquette à l'usage des maîtres d'ouvrages et des bailleurs de fonds, sur les techniques de mobilisation et d'exploitation des eaux des aquifères continus et comparaison des coûts, adduction et traitement de l'eau inclus, avec l'utilisation des eaux superficielles.

A1-5. Potentiel d'experts au BRGM (SP et DR)

On dénombre 28 agents hydrogéologues, ayant l'expérience usuelle (19) ou occasionnelle (9) des milieux fissurés.

- Annexe 2 - Domaine d'activité des concurrents/partenaires

Sociétés	Groupe	Pays d'origine	CA (million)	Nombre d'employés	Gestion de la ressource en eau	Approvisionnement en eau	Eaux souterraines	Eaux de surface	Traitement des Eaux usées	Aménagement agricole	Environnement	Aménagement urbain	Process/ Aménage. Industriels	Formation	Logiciel	Economie	Développement Institutionnel
EUROPE																	
Dorsch		Allemagne	200 DM	1500		X	X	X	X		X	X			X	X	
Salzgitter	Indépendant	Allemagne		400	X	X	X	X	X	X	X						
Tractebel		Belgique	384000 FB	55000	X				X		X	X			X		
Carl Bro		Danemark	2100	2100	X						X		X		X		
COVI		Danemark	1325 DKK	2240	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
DHI		Danemark		220	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kampsax		Danemark	57 \$ EU	700		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
EPTISA	ARCADIS	Espagne			X	X	X	X	X	X							rurale
BCEOM	Scetauroute	France		325	X	X		X	X	X	X	X	X				X
Beture-Scetagr-bdpa	CDC	France			X					X	X	X					
BRL	s éco mixte	France			X	X	X	X	X	X	X						X
Burgeap		France			X	X	X				X	X					
C.Coteaux de Gascogne		France			X	X		X		X	X						
CIG	ARMINES	France			X		X	X			X			X			
Safeg	Suez-Lyonnaise	France			X	X	X	X	X		X	X					
SCP	s éco mixte	France			X	X		X		X							
Sogelerg Sogreah		France	550 MF	750	X	X	X	X	X		X		X				X
Aquater		Italie															
Bonifica	IRI	Italie	101 000 Lit	187													
Carlo Lotti		Italie	30 000 Lit	92		X				X	X	X					
Italconsult		Italie	24 000 Lit	48						X	X						X
Euroconsult	Heidemij	Pays-Bas	82 Dfl	400	X					X	X	X		X			X
Haskoning		Pays-Bas	317 Dfl	1000	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Iwaco	De Weger Consultancy	Pays-Bas	75 Dfl	500	X	X					X			X	X	X	X
TNO	Etat	Pays-Bas	97 2Dfl	4000	X	X	XX										X
DHV	Dvh Holding	Pays-bas	400 Dfl	2500	X	X			X	X	X	X	X	X			
Sir Alexander Gibb & partners		GB			X	Peu d'information sur les activités					X						
Halcrow	Indépendant	GB	£117	2500	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X
Mott MacDonald	Indépendant	GB		4400	X	X	X	X	X	X	X	X					
AMERIQUE DU NORD																	
SNC-Levalin		Canada	1413 \$EU(?)						X	X	X						
Camp Dresser & McKee		USA		2300		X											X
Dames & Moore		USA		5700		X	X	X	X			X	X		X		
Harza		USA		800		X				X		X	X				X
Louis Berger		USA			activités existantes mais non précisées sur le site Web						X	X	X				X
Montgomery Watson		USA		3300	X	X	X	X	X	X	X						X
MOYEN ORIENT AFRIQUE DU NORD																	
Tahal	privatisé 96	Israël	40 \$EU	350	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
SCET Tunisie	CDC = 50 %	Tunisie		50			X										
Studi		Tunisie			X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
EXTREME ORIENT																	
Nipon Coi		Japon	Informations trouvées en japonais														

Hydrogéologie des aquifères discontinus

- Annexe 3 - Liste du personnel compétent dans le domaine des aquifères discontinus

NOM PRÉNOM	NIVEAU DE QUALIFICATION	NIVEAU DE MAÎTRISE	Code NIVEAU DE MAÎTRISE
BERARD PIERRE	Ingénieur	expérimenté	Z
CARN ANNE	Ingénieur	expérimenté	Z
COMTE JEAN-PIERRE	Ingénieur	expérimenté	Z
CORNET JACQUES	Ingénieur	expérimenté	Z
DAESSLE MATERNE	Ingénieur	expérimenté	Z
GENTIER SYLVIE	Ingénieur	expérimenté	Z
JAUFFRET DOMINIQUE	Ingénieur	expérimenté	Z
LACHASSAGNE PATRICK	Ingénieur	expérimenté	Z
LEMORDANT YVES	Ingénieur	expérimenté	Z
POINTET THIERRY	Ingénieur	expérimenté	Z
POITRINAL DOMINIQUE	Ingénieur	expérimenté	Z
RAMPNOUX NICOLAS	Ingénieur	expérimenté	Z
SOLAGES SERGE	Ingénieur	expérimenté	Z
SOURISSEAU BERTRAND	Ingénieur	expérimenté	Z
STIELTJES LAURENT	Ingénieur	expérimenté	Z
TALBO HENRI	Ingénieur	expérimenté	Z
BICHOT FRANCIS	Ingénieur	capacité confirmée	Y
CRUCHET MARC	Ingénieur	capacité confirmée	Y
DUERMAEL GERARD	Ingénieur	capacité confirmée	Y
LAPORTE PIERRE	Technicien	capacité confirmée	Y
LOPOUKHINE MICHEL	Ingénieur	capacité confirmée	Y
MARDHEL VINCENT	Ingénieur	capacité confirmée	Y
MAUROUX BRUNO	Ingénieur	capacité confirmée	Y
MOULIN MARC	Ingénieur	capacité confirmée	Y
RICARD JACQUES	Ingénieur	capacité confirmée	Y
THIERY DOMINIQUE	Ingénieur	capacité confirmée	Y
VIGOUROUX PHILIPPE	Ingénieur	capacité confirmée	Y
WITWER CAROLINE	Ingénieur	capacité confirmée	Y
AQUILINA LUC	Ingénieur	connais. de base	X
BAUDOIN VIVIEN	Technicien	connais. de base	X
CAUDRON MARCEL	Ingénieur	connais. de base	X
DAGAIN JACQUES	Ingénieur	connais. de base	X
DAVID ANNE	Ingénieur	connais. de base	X
DUTARTRE PHILIPPE	Ingénieur	connais. de base	X
MARTELAT ANNE	Ingénieur	connais. de base	X

- Annexe 4 - Principaux axes de recherche scientifique

A4-1. Déclinaison de ces axes de recherche au sein des différents modules du projet

De l'amont vers l'aval, des techniques de mise en évidence de l'eau souterraine (implantation de forages efficaces en terme de productivité) aux modalités de gestion et de protection de la ressource des aquifères discontinus, les principaux points qui font actuellement ou pourraient faire l'objet à l'avenir de travaux de recherche scientifique dans le cadre des différents modules du projet sont présentés ci-dessous.

A4-1.1. Techniques d'implantation de forages d'eau à « gros » débits

L'application directe des techniques et méthodologies présentées ci-dessous concerne l'implantation des forages d'eau en contexte de socle.

Dans un tel environnement géologique, les **systèmes aquifères** sont constitués schématiquement :

- du substratum rocheux. Il est très perméable localement, au droit des fractures qui l'affectent, mais n'offre en général qu'une très faible capacité de stockage d'eau souterraine à l'échelle du massif,
- des formations d'altération (ou de recouvrement) de ce substratum, les altérites (ou arènes), qui le recouvrent sur une épaisseur variable (de zéro à plusieurs dizaines de mètres). Du fait de leur composition argilo-sableuse, elles sont caractérisées par une perméabilité relativement faible, mais par d'importantes capacités de rétention d'eau. Cette partie du système assure une fonction de stockage des eaux souterraines.

Le principal objectif est de disposer d'un débit acceptable en terme de rentabilité (débit obtenu/investissement).

En contexte de socle, il est considéré qu'un forage d'eau produit un « **gros** » débit lorsque il peut être exploité à long terme (à l'échelle annuelle) à plus de 5 m³/h, soit environ 100 m³/j. Ce type d'ouvrage est ainsi susceptible de satisfaire les besoins en eau de villages ou quartiers urbains de plusieurs centaines d'habitants, ou de petits périmètres irrigués. A titre de comparaison, en hydraulique villageoise, un forage est généralement considéré comme positif lorsqu'il permet de fournir un débit de l'ordre de 0,5 m³/h (10 m³/j).

Des débits de l'ordre de la dizaine de m³/h sont régulièrement obtenus ; certains ouvrages exceptionnels peuvent atteindre plusieurs dizaines de m³/h.

Pour atteindre cet objectif, il convient de localiser une ou plusieurs fractures très perméables, au moins localement, pour l'implantation du forage. Cette fracture doit en outre présenter de bonnes connexions avec un réseau « d'extension hydraulique » maximale, permettant de drainer un volume d'altérite le plus important possible.

La **méthodologie d'implantation** des forages d'eau mise au point au BRGM depuis plusieurs années et en cours d'amélioration et d'adaptation à différents contextes géologiques et climatiques, repose sur le phasage suivant, qui permet, comme dans toute étude hydrogéologique, de progresser des petites vers les grandes échelles et de retenir, pour chacune de celles-ci, les méthodologies les plus adaptées et efficaces :

- sélection de sites de prospection sur des domaines d'étude de **plusieurs centaines à plusieurs milliers de km²**,
- prospection radon sur l'intégralité de la superficie de ces sites, d'une superficie de **un à quelques kilomètres carrés**. La densité du maillage radon (70 à 100 m, resserré dans les zones anormales) est destinée à identifier et localiser de manière exhaustive à la manière d'une prospection tactique, les anomalies émanométriques,
- prospections géophysiques au droit des anomalies radon les plus favorables, sur des superficies de l'ordre de **quelques milliers de m²** (profils sériés),
- implantation de sondages de reconnaissance avec une précision de l'ordre de **5 à 10 m**.

Ce caractère phasé n'exclut bien entendu pas des allers retours entre chaque phase qui permettent de préciser l'analyse (exemple : sélection des anomalies radon les plus favorables en les confrontant aux informations géologiques -lithologie, épaisseur des altérites-, structurales -identification à des linéaments repérés par photo-interprétation-, hydrogéologiques, etc.). Le croisement de méthodes permet en effet de passer d'indices non significatifs à eux seuls à une synthèse concluante.

L'expérience acquise peut également être valorisée pour des applications moins directes en contexte d'aquifères discontinus : critères d'implantation d'ouvrages de surveillance piézométrique, de remédiation de pollution, protection des captages, etc.

A4-1.2. Sélection de sites de prospection

La méthode de sélection de sites de prospection a été développée en 1998 dans le cadre du projet « Lozère ». Elle repose sur une analyse multicritères basée sur le modèle conceptuel de fonctionnement de ce type d'aquifère (la structure des deux principaux compartiments constituant l'aquifère, altérites et substratum fracturé) :

- Altérites :

- détermination, à l'échelle du 1/50.000 environ, de l'épaisseur des altérites par modélisation des paléosurfaces d'altération ;
- approche hydrogéologique pour préciser l'épaisseur mouillée des altérites.

- Substratum :

- analyse comparée de la productivité potentielle des différentes formations géologiques : cartographie géologique synthétique et confrontation aux données hydrogéologiques disponibles (synthèse bibliographique, travaux antérieurs, « expérience » des hydrogéologues en l'absence de données, etc.). Dans les régions où de nombreuses données de forage sont disponibles, cette analyse comparée peut être menée à partir de statistiques (e.g. : travaux réalisés en Bretagne ou en Afrique) ;
- identification de la fracturation potentiellement active du point de vue hydraulique : analyse linéaire et géologique, identification et caractérisation des réseaux de fractures et confrontation aux états de contraintes actuels ;
- qualité prévisionnelle des eaux souterraines, en relation, en métropole, avec le fond géochimique de l'inventaire minier par exemple.

Cette liste de paramètres n'est pas exhaustive. En contexte aride, il convient également de considérer, à ce stade, les modalités d'alimentation du système aquifère et de sélectionner des secteurs d'intérêt proches de ces zones de recharge potentielle (zones de convergence des écoulements de surface, placages sableux, etc.).

Ces paramètres purement techniques peuvent être complétés par des critères de type socio-économique (contraintes en terme de proximité des lieux de consommation, des adductions existantes, etc.).

Les outils de type SIG sont particulièrement adaptés à la mise en œuvre et à la présentation de ce travail de synthèse.

Les relations entre qualité des eaux souterraines et données du fond géochimique de l'inventaire minier national sont développées par L. Chery et Ph. Dégranges au sein de projets indépendants du PRD324. *L'approche qu'ils développent a été utilisée dans le cadre du projet Lozère en 1998.*

Cette méthodologie de prévision des potentialités en eau souterraine pourrait également être développée dans le cadre des volets « eau » du projet « Géotraverse Africaine ». Elle pourrait aussi servir d'élément de réflexion pour la définition des modalités d'élaboration de la « carte géologique du futur » orientée « eau » en contexte de socle.

A ce stade, un travail de réflexion mériterait d'être mené sur le thème de la valorisation des données des prospections aéroportées (aéromagnétisme, spectrométrie, etc.) par la

prévision des activités radon à partir de la distribution de ses éléments fils (spectrométrie du Bi^{214}) qui peut être appliquée à la cartographie du risque radon, à la prospection hydrogéologique et à la caractérisation du champ des contraintes actuelles. Une proposition en ce sens a été rédigée en 1997 en collaboration avec J. Perrin (SGN/I2G).

A4-1.2.1. Identification des réseaux de fractures les plus favorables

Les travaux de recherche portent sur la valorisation des connaissances sur les contraintes tectoniques actuelles afin d'identifier les réseaux de fractures les plus favorables du point de vue hydraulique (fracturation « ouverte » et bien connectée).

Cet axe de recherche est développé dans le cadre du module « Lozère » du projet, en collaboration avec l'Université de Montpellier II. En interne au BRGM, J.L. Blès a été chargé, dans le cadre du PRD324, de réfléchir aux synergies qui pourraient être trouvées sur ce thème entre les différents thématiciens qui l'abordent au sein de l'entreprise : structuralistes, spécialistes des contraintes actuelles, métallogénistes (actualisme « inversé » à partir des paleocirculations de fluides), hydrogéologues (eaux thermo-minérales et communes), etc.

Il pourrait également être poursuivi dans le cadre d'une éventuelle collaboration avec l'IPGP (relations sismicité - contraintes actuelles - hydraulicité de la fracturation, concurrence colmatage hydrothermal des fractures - réactivation sismique, durée de « vie » de la fracturation ouverte en contexte hydrothermal, etc.) sur le projet « Djibouti », en cours de montage en 1999.

Une attention particulière sera portée, dans le cadre des phases ultérieures du projet « Lozère », aux relations pouvant exister entre la morphologie des anomalies radon (axes d'allongement en particulier) supposées permettre de localiser les zones privilégiées de dégazage (cf. ci-dessous), les réseaux de fractures et les contraintes actuelles. L'étude des anomalies radon pourrait en effet constituer, dans les régions où les états de contraintes ne sont pas, ou sont très mal connus (*en particulier en Guyane, projets Ile de Cayenne et Villages des Fleuves, opérations SP*), un moyen d'approcher ces dernières.

Certaines méthodes géophysiques reposant sur des mesures d'anisotropie (exemple : méthode du carré tournant en géophysique électrique, développée par P. Louis, Université de Montpellier II) pourraient également permettre d'approcher de manière indirecte les états de contraintes locaux (cf. travaux de Bruel et Petit, UMII). L'approche électrique mériterait d'être testée dans le cadre du projet Lozère, à l'occasion des travaux de géophysique prévus pour l'implantation des forages expérimentaux (cf. 1.3. ci-dessous).

A4-1.2.2. Lithologie et puissance des altérites

Cet axe de recherche est développé par R. Wyns, essentiellement sur le terrain de jeu que constitue le Massif Armoricaïn, au sein d'un projet de recherche indépendant du PRD324 et avec des applications non limitées à l'hydrogéologie (géotechnique, ...). Cette méthodologie a été mise en application dans le cadre de la première phase du module « Lozère » du projet, ce qui a permis de la confronter à un contexte morphologique et géodynamique différent de celui du Massif Armoricaïn.

A4-1.2.3. Prospection émanométrique

Les travaux en cours actuellement en Guyane (forages de validation) *dans le cadre des projets Villages des Fleuves (+ opérations SP mettant en œuvre les méthodologies développées) et Ile de Cayenne* montrent la faisabilité de la méthode radon en contexte tropical humide et d'épaisse couverture altéritique, voire même de recouvrement alluvial.

Compte tenu de sa légèreté de mise en œuvre, ne nécessitant en particulier pas de layonnage préalable, elle est même particulièrement adaptée au contexte tropical humide.

Les travaux de recherche actuels, *mis en œuvre par J.C. Baubron et J.L. Pinault dans le cadre des projets Ile de Cayenne et Villages des Fleuves*, et qui poursuivent les actions engagées dans le cadre de projets de développement de techniques de prospection des gisements métalliques, portent sur l'explication de l'origine des anomalies radon dans un tel contexte (les premiers résultats obtenus suggèrent que le radon, d'origine très superficielle -premiers mètres du sol- jouerait un rôle de traceur d'autres gaz d'origine profonde) : mesures de teneurs en autres gaz (He, CO₂, CH₄, etc.) sur des anomalies radon, suivi en continu des teneurs en radon et des paramètres hydrométéorologiques et déconvolution du signal par modélisation inverse, etc..

A4-1.2.4. Prospection géophysique

Dans le cadre des projets *Ile de Cayenne et Villages des Fleuves*, une approche géophysique de type sondages puis traïnés électriques a été mise en œuvre, au droit des anomalies radon, pour la localisation des zones de fractures du substratum et l'implantation précise (pas de mesure 10 m) des sondages de reconnaissance.

Elle repose sur la localisation, au moyen de profils géophysiques (traïnés électriques), des zones d'approfondissement de l'interface socle - altérites qui présentent, dans le contexte des altérites intertropicales, un fort contraste de résistivité (altérites argileuses conductrices / substratum sain très résistant). On considère en effet classiquement, en

hydrogéologie des roches de socle, que les zones de fracturation du substratum correspondent à des secteurs privilégiés de pénétration de l'altération supergène.

Compte tenu du caractère linéaire des objets recherchés (« gouttières ») et de leur faible largeur (quelques mètres à quelques dizaines de mètres), la réalisation de profils, éventuellement sériés, semble la mieux adaptée ; en outre, elle est relativement facile à mettre en œuvre en contexte de forêt (et peu coûteuse en terme d'investissement en layonnage). Leur orientation est déduite de la connaissance des axes d'allongement des anomalies émanométriques (profils perpendiculaires à ces derniers). Elle pourrait éventuellement être précisée par des mesures d'anisotropie électrique (cf. plus haut).

Cette méthodologie a apporté des résultats intéressants en Guyane. Elle a cependant montré certaines limites (en terme de précision de l'implantation des sondages de reconnaissance au droit des anomalies conductrices : dans la mesure où l'on ne dispose, sur chaque profil, que d'une seule profondeur d'investigation, l'implantation perd de sa précision au sein des zones conductrices larges). Plusieurs axes d'amélioration pourraient donc être explorés, en collaboration avec les collègues géophysiciens :

- la réalisation, au sein des couloirs conducteurs identifiés lors du premier traîné, de traînés électriques complémentaires, de plus grande longueur de ligne, qui constitueraient ainsi une amorce de panneaux électriques, focalisés uniquement sur les zones d'intérêt (importance d'une recherche d'optimisation coût/efficacité). Un des intérêts de la méthode de traîné électrique est le caractère lisible sur le terrain des résistivités apparentes qui permet à l'opérateur d'ajuster en direct la profondeur d'investigation de son dispositif,
- la mise en oeuvre éventuelle d'autres types de méthodes (EM34, VLF, etc.) mais lourdes à mettre en œuvre, plus adaptées au contexte des altérites métropolitaines (moins argileuses ?) et/ou permettant de localiser la fracturation de manière directe au sein du substratum sain,
- la fourniture, lors de la remise des résultats de la campagne géophysique, d'une estimation de la profondeur d'investigation au droit de chacune des stations des différents traînés (basée sur un modèle géophysique déduit des sondages électriques ?) : un profil de profondeur d'investigation estimée pourrait ainsi accompagner le profil de résistivité apparente. Lors de la réalisation des premiers sondages de reconnaissance, il pourrait être précisé par calage sur les informations lithologiques tirées de ceux-ci.

Le volet « prospection » du projet « Lozère » pourra être mis à profit pour explorer ces voies de recherche.

A4-1.3. Evaluation et protection de la ressource

Les travaux de mise au point d'une **méthodologie d'évaluation de la ressource en eau souterraine** (en contexte de socle) en cours (*projet SP « Ressource en eau du socle », volet « évaluation de la ressource en eau » du projet Lozère* débuté en 1998 et à poursuivre en 1999 et 2000) concernent essentiellement l'échelle patrimoniale, qui intéresse le gestionnaire institutionnel (Agence de l'eau, Département, communauté de communes, etc.) et non celle de l'exploitant d'un champ captant. Ils se situent dans le prolongement des projets SP réalisés en région Bretagne et Pays de la Loire ces dernières années. Ce thème de réflexion est original. Il est très peu présent dans la littérature scientifique et technique.

A l'échelle du champ captant néanmoins, un suivi est en cours en Guyane, dans le cadre du projet « *Villages des Fleuves* », sur le site de Grand Santi, afin de préciser les relations hydrauliques existant entre l'aquifère fissuré et le fleuve (conditions de réalimentation éventuelle, modalités de protection des captages, etc.). Cet aspect est d'importance à l'échelle de la Guyane puisqu'un développement important de ce type d'unités d'AEP y est prévu à terme.

A l'échelle patrimoniale, l'axe de recherche exploré repose sur une analyse comparée, à partir d'un « instantané » hydrologique d'étiage (débits spécifiques déduits de jaugeages différentiels, de jaugeages de sources, etc., corrigés des variations spatiales des pluies efficaces), de l'aptitude relative des différentes formations géologiques à la restitution à long terme. Cette productivité pourra être rapportée à des unités « homogènes » (en terme de lithologie du substratum, des altérites, de morphologie, etc.) et devrait permettre (en tenant compte des épaisseurs des altérites saturées, de la zone active du milieu fracturé, etc.) une évaluation globale de la ressource renouvelable et des stocks d'eau à l'échelle du bassin versant, voire son extrapolation à d'autres bassins de caractéristiques similaires. Les chroniques temporelles de débit disponibles pourraient être utilisées pour préciser en valeur absolue cette estimation relative (analyse des tarissements, déconvolution ou modélisation inverse, etc.).

Ce travail sera mis en œuvre, au cours des étiages 1998 et 1999 et à une échelle relativement fine, sur le bassin versant lozérien de la Truyère, qui aura fait l'objet par ailleurs d'une caractérisation géologique et hydrogéologique détaillée (cf. ci-dessus).

Ces recherches sont menées en parallèle avec les travaux SP de « faisabilité de réseaux piézométriques en région de socle » (en prestation pour SGR/LIM par l'équipe du PRD324, approche similaire menée au SGR/PAL) et doivent permettre de dégager des éléments de complémentarité, en région de socle, entre les informations intégrées que constituent les débits d'étiage et celles, plus ponctuelles, déduites de la piézométrie.

Cette approche purement hydraulique mériterait d'être complétée, au moins au cours de l'étiage 1999, lorsque le travail aura été dégrossi sur le plan hydraulique, par une

approche hydrochimique (isotopes du Strontium, cf. travaux de Ph. Negrel sur le Cézalier et en Guyane ; travaux de B. Ladouche, etc.), non budgétée actuellement au sein de la convention avec le Conseil Général de la *Lozère*. Si les résultats purement hydrauliques obtenus en 1998 en justifient l'intérêt, il sera proposé en 1999 d'intégrer, sur financement DR, un volet hydrochimique à ce module. Une caractérisation détaillée, hydrogéologique et hydrochimique, en *Lozère*, permettrait également de valoriser plus finement les résultats des campagnes de prélèvement mises en œuvre sur le Maroni (*Projet Villages des Fleuves*) et ses affluents en 1996.

Les travaux de recherche proposés dans le cadre du projet de module « *Oman* », intègrent ces deux volets, hydraulique et hydrochimique, dans un contexte différent, celui d'une région aride.

Par ailleurs, les problématiques de nature **environnementale** (prévention et prévision des transferts de polluants en particulier) sont particulièrement délicates à traiter en contexte d'aquifères discontinus. Les exploitations minières étant pour la plupart implantées en contexte de roches de socle, elles concernent de manière importante ce type d'aquifère. Les connaissances acquises dans le cadre du projet pourront le cas échéant être valorisées et développées dans le cadre des opérations en cours au Département Eau (*Evaluation environnementale de zones minières, Goa, Sukinda - Inde*) ou à la Direction de la Recherche (*PRD609 « Déprise Minière et qualité de l'eau »*).

A4-1.4. Structure et fonctionnement des aquifères discontinus

L'ensemble des travaux présentés plus haut contribue à une meilleure connaissance conceptuelle, en terme de structure et de fonctionnement des aquifères discontinus.

Le travail en commun, dans le cadre du *projet Lozère*, d'équipes ayant d'un côté plutôt une expérience des terrains de jeu métropolitains (Bretagne en particulier) et d'un autre côté une expérience des zones intertropicales (Sahel, Guyane) devrait permettre de confronter les conceptualisations des hydrosystèmes de socle.

Quelques points de débat concernent en particulier :

- l'importance relative de la « fissuration » (fractures horizontales de décompression, fissuration/fracturation supergène liée à des modifications minéralogiques -gonflements- au sein de la frange superficielle de la roche saine) par rapport à la fracturation d'origine tectonique, en terme de constitution de la perméabilité du substratum « sain ». Le premier phénomène semble prépondérant dans le contexte breton ; en est-il de même dans les autres régions de socle métropolitaines et outre mer ? Par ailleurs quels paramètres hydrodynamiques (T, S) attribuer à cet horizon fissuré/altéré ?

- les différences lithologiques pouvant exister entre les profils d'altération des régions intertropicales actuelles et ceux des paléaltérites métropolitaines. Ainsi, dans les profils développés sur granites, les horizons d'arènes sableuses de base de séquence semblent beaucoup plus développés, en terme de puissance et de fréquence, au sein des altérites du Massif Central que dans les régions intertropicales actuelles.

Par ailleurs, les informations tirées de forages « profonds » (300 m), acquises récemment en Bretagne (débits atteignant 50 m³/h au soufflage, avec contribution importante, jusqu'à plus de 50 %, de la tranche 150-300 m), mériteraient d'être précisées et replacées dans le contexte actuel de la connaissance des circulations profondes au sein des socles fracturés.