

HISTOIRE DE L'HYDROGEOLOGIE AU BRGM

Des prémices aux années 2010

Les prémices de l'hydrogéologie

Ce n'est qu'à partir de 1956 que le BRGM, dont les activités étaient jusqu'alors uniquement dédiées à la recherche minière, s'implique progressivement dans l'étude et la recherche des eaux souterraines.

En effet en 1955, Jean Ricour, ingénieur en chef du BRGM, et Chef du département Géologie est sensibilisé au problème des ressources en eaux souterraines par Antoine Bonte, professeur d'Hydrogéologie à l'Université de Lille, qui constate la baisse inquiétante du niveau des nappes de la Craie et des calcaires carbonifères dans le bassin minier.

J. Ricour s'intéresse alors à l'hydrogéologie et publie, avec P. Lafitte, Directeur du BRGM, à l'occasion du Congrès du Centenaire de l'Industrie minière en 1956, un article intitulé « La Recherche minière, la plus importante en France métropolitaine : l'eau : rôle de l'hydrogéologue ». Cette note fit grand bruit auprès du président du BRGM, Monsieur Friedel, et des autorités de tutelle au Ministère de l'Industrie, mais fut très appréciée par Henri Nicolas, ingénieur en chef des Mines, chargé de l'aménagement minéralogique de Douai, confronté régulièrement aux problèmes de gestion de la répartition des prélèvements d'eau entre les différents utilisateurs.

Une commission nationale de l'eau est créée et le Président du BRGM en fait partie.

J. Ricour propose alors la création du premier service régional du BRGM, « l'Inventaire des Ressources Hydrauliques du Nord-Pas-de-Calais », à Douai.

Trois autres suivront dans des régions à forte exploitation d'eau souterraine (Seine-Maritime, Meuse et Gironde).



Antoine Bonte (en bas à droite) dans une galerie de mine du Nord - Pas-de-Calais, avec des techniciens du BRGM : de G. à Dr. MM. Balthazard, Cavalonni, Dezwarte, Dellery. BRGM



Relevé piézométrique à la sonde HWK. BRGM



Consultation de la Banque de Données du Sous-Sol. Rouen SGR Picardie-Normandie (1975). BRGM



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27

Le département Hydrogéologie en 1971

1. E. Berkaloff ; 2. J.-M. Dezwardt ; 3. L. Molinard ; 4. H. Galle Cavalloni ;
5. Faran ; 6. Melle Lhermitte ; 7. G. Castany ; 8. J. Margat ; 9. L. Monition ;
10. G. Paquin ; 11. M. Louvrier ; 12. F. Derec ; 13. M. Canceil ; 14. M. Bonnet ;
15. P. Ungemarch ; 16. P. Peaudecerf ; 17. P. Moussu ; 18. A. Lallemand-Barrès ;
19. O. Delarozière-Bouillin ; 20. Y. Vuillaume ; 21. M.-C. Bourin ; 22. J.-P. Sauty
; 23. Ch. Martin ; 24. M. Albinet ; 25. J. Auriol ; 26. R. Jolivet ; 27. H. Moussu.

BRGM

Ces services avaient pour objet de recenser les puits et forages, de rassembler la documentation géologique, hydrogéologique et technique relative aux captages, dispersée entre les archives des entreprises de forage, des diverses administrations et des collectivités, d'établir des cartes de situation des points d'eau et des surfaces piézométriques des nappes.



Jean Ricour (à Dr.) avec Haroun Tazief. J. Ricour

Les points d'eau étaient inventoriés dans toutes les communes (le " Ratissage "). Ils faisaient l'objet de dossiers intégrés dans la documentation du BRGM, puis dans la BSS (Banque des Données du Sous-Sol), consultables depuis quelques années dans " INFOTERRE ". Des cartes et des rapports de synthèse étaient d'abord publiés par 1/8^e de feuille topographique à 1/20 000, puis au 1/25 000, en collaboration avec les " géologues officiels " universitaires : Antoine Bonte et Gérard Waterlot à Lille, Henri Schoeller et Michel Vigneaux à Bordeaux, Claude Gouvernet à Marseille.

Progressivement ces travaux furent étendus à d'autres parties du Bassin de Paris (Champagne, Normandie, Picardie), puis à d'autres régions (Dordogne, Charente-Maritime, bassin de l'Adour...).

À l'époque actuelle, ces documents sont toujours très consultés par les bureaux d'études et les chercheurs, notamment sur le site INFOTERRE.

Très vite, les IRH ont pris une part active aux travaux : alimentation en eau de la Centrale thermique des Houillères à Férin (59) ; prospection géophysique dans le Synclinal carbonifère de Bachant - Ferrière-la-Petite (59) ; recherche d'eau pour les raffineries de Dunkerque et de Fos-sur-Mer, et dans la vallée de la Meuse.

Durant les premières années, ces études étaient effectuées par des techniciens et ingénieurs géologues.

Puis, dans les années qui suivirent, des hydrogéologues, de retour d'Afrique du Nord ou formés à l'ENSG et dans

les universités contribuèrent progressivement au développement des études et recherches du BRGM dans le domaine des eaux souterraines, constituant son " noyau dur " en hydrogéologie.

Des IRH au Département Hydrogéologie

Au début des années 60, avec le retour en France d'hydrogéologues confirmés travaillant en Afrique du Nord tels que G. Castany et Eugène Berkaloff de Tunisie, Jean Margat et Lucien Monition du Maroc, Marcel Bourgeois, Gustave Cornet, Guy Durozoy et Henri Moussu d'Algérie, l'activité hydrogéologique du BRGM se structure. G. Castany enseigne l'hydrogéologie au 3^e cycle de géodynamique externe de la Sorbonne, et publie, en 1963, le " Traité pratique des eaux souterraines ", mondialement connu.

À partir de 1963, les nouveaux Services géologiques régionaux du BRGM, sous la direction de Jean Ricour, reprennent et démultiplient les missions des IRH.

Plusieurs des premiers chefs de service sont des hydrogéologues rentrés d'Afrique du Nord (Marcel Bourgeois, Guy Durozoy) ou récemment promus de l'Université (Claude Mégny, Jean-Claude Roux).

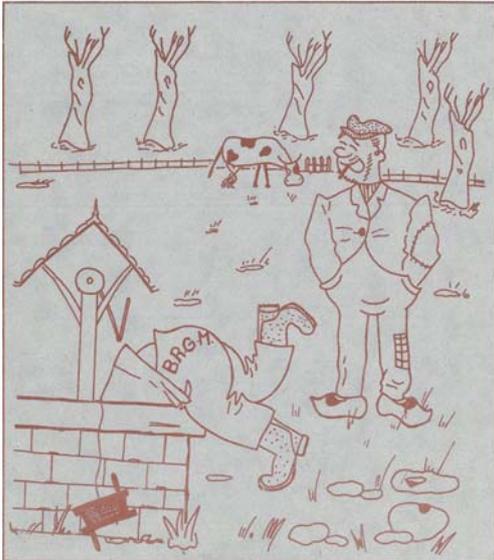
Ils développent progressivement l'activité du BRGM en hydrogéologie, qui jusqu'alors n'était connue auprès des Administrations départementales et des Collectivités, que dans le domaine de la recherche minière.

Après la constitution d'un Service d'hydrogéologie dans le cadre du département de géologie, en décembre 1962, un " Département Hydrogéologie " est créé en 1966, par Jean Margat. Les ingénieurs plus spécialisés qui le constituent établissent des guides méthodologiques (cartographie, piézométrie, méthodes de pompage d'essai, hydrochimie) et appuient les SGR ainsi que les travaux à l'étranger (interprétation de pompages d'essai, modélisation d'aquifères). Le département se développera par la suite dans le cadre du Service Géologique National dirigé par Claude Guillemin.



Marcel Bourgeois (à G.) et Jean Margat (Villequier - Seine-Maritime, 1966). J.-C. Roux

Bulletin de liaison et d'information du BRGM. Mars 1962



En 1967, la création des Agences de bassin entraîne des besoins en connaissance des ressources en eau du territoire national. Ces organismes confient au BRGM de nombreux travaux d'inventaire, de cartographie, de synthèses monographiques, de création de réseaux de contrôle piézométrique et de qualité des nappes. C'est le début des "actions concertées" et "travaux pour tiers", qui abondent les "crédits propres" du BRGM.

Dans le cadre du Programme Hydrologique International de l'UNESCO (PHI), la DGRST confie des travaux de recherche au BRGM avec, notamment, la mise en place du bassin hydrogéologique expérimental de l'Hallue (Somme) (cf. encadrés) et l'étude du système karstique de la Fontaine de Vaucluse.

Progressivement, dans les régions, les services du Génie Rural et des Ponts et Chaussées, les Services techniques des grandes villes et les industriels font appel aux compétences du BRGM pour leur approvisionnement en eau (implantation de forages, pompes d'essai...).

En 1972, la création du Ministère de l'Environnement a un impact important sur les activités hydrogéologiques du BRGM, avec le Service des Problèmes de l'Eau (SPEPE) qui lui confie des études méthodologiques ou de synthèse. La palette des spécialités s'agrandit avec le recrutement d'hydrauliciens modélisateurs (Marc Bonnet, Pierre Peaudecerf, Daniel Rousselot) et d'hydrogéochimistes. On passe progressivement des hydrogéologues généralistes aux ingénieurs spécialisés.

Grâce à son réseau d'hydrogéologues régionaux, le BRGM dispose d'une grande capacité d'identification de sites représentatifs qu'il fait, le plus souvent, évoluer vers le statut de sites expérimentaux, voire d'installations pilotes pour le développement de techniques d'intervention *in situ* : transfert de pollutions avec interaction eau-roche, phénomène de dispersion et/ou d'échanges thermiques avec le solide, dénitrification sur paille et finition par percolation dans la zone non saturée, effet filtre des berges colmatées des cours d'eau.

À la fin des années 70, la famille des hydrogéologues du BRGM atteint un effectif de 225 personnes.

En 1970, le Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine (SGAL.) est intégré au BRGM et devient un SGR. Dès 1960, sous la direction de L. Simler, il avait entrepris des études et recherches hydrogéologiques en Alsace sur la nappe phréatique de la plaine du Rhin (piézométrie, réseaux de contrôle, premières modélisations), et faisait figure de précurseur. Il réalisait également des études à l'étranger (en Iran, au Pérou).

SGR Picardie-Normandie à Mont-Saint-Aignan (76) en 1975. BRGM



SGR Aquitaine à Pessac (Gironde) en 1975. J.-C. Roux



Le bassin expérimental de l'Hallue

La rivière de l'Hallue est un affluent de rive droite de la Somme situé à 15 km à l'Est d'Amiens. D'une superficie de 219 km², son bassin est constitué par les formations de la craie du Nord du Bassin de Paris, homogènes et très aquifères.

En 1965, le bassin de l'Hallue a été retenu par la DGSRT comme bassin représentatif de la craie dans le cadre de la " Décennie hydrologique internationale ", et a fait l'objet d'équipements nombreux et perfectionnés de mesures, et d'observations détaillées sur les plans climatologique, hydrologique et hydrogéologique. Environ 300 000 francs en 1965 (45 735 €) ont été investis pour ces équipements et 850 000 francs (129 600 €) pour le fonctionnement de 1965 à 1976. La gestion du bassin expérimental a été confiée au BRGM.

Ces travaux et recherches avaient un double but :

- Tout d'abord, étudier les mécanismes d'infiltration des précipitations et de l'alimentation de la nappe de la craie, et d'estimer les réserves exploitables ;
- Ensuite, étendre les résultats obtenus à d'autres aquifères crayeux, la craie représentant le tiers des aquifères de la France.

La densité des points de mesure et leurs fréquences d'observation (permanentes ou journalières pour la plu-part) ont permis notamment :

- de connaître la zonation des pluies,
- de préciser la valeur des précipitations efficaces et la période d'alimentation de la nappe d'après les variations des niveaux piézométriques et des débits,
- de comparer les lames d'eau écoulées aux valeurs d'évaporation fournies par les appareils de mesure climatologique,
- de calculer les réserves d'après les courbes de tarissement,
- de mettre en évidence la parfaite corrélation entre le niveau moyen de la nappe et le débit du cours d'eau, le rôle des eaux souterraines dans l'alimentation du cours d'eau et la part du ruissellement.

Outre les chercheurs du BRGM, ceux de plusieurs organismes ont utilisé les données fournies par le bassin expérimental de l'Hallue : CENG de Grenoble, ENSMP, Institut de Géologie de Grenoble, C.I.G. de Fontainebleau...

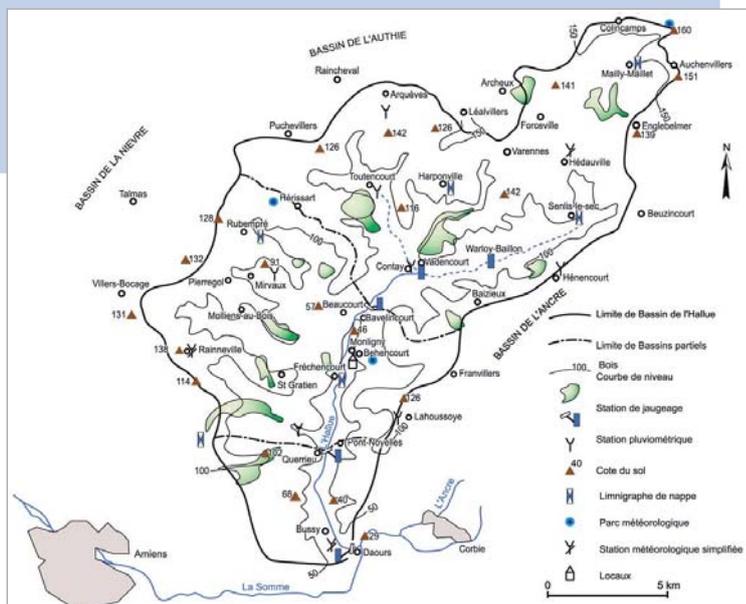
La nappe de la craie a fait l'objet des premières modélisations, les écoulements ont été simulés à moins de 15 % près. Un modèle de calcul de l'évapotranspiration a été mis au point. Plusieurs études statistiques ont été réalisées sur les relations pluies-débit, l'optimisation des points de mesures pluviométriques et piézométriques. Deux des stations de jaugeage (Bavelincourt et Querriou) sont toujours en service et gérées par la DREAL Picardie dans le cadre du réseau hydrologique régional, ainsi que la station piézométrique de Senlis-le-Sec, intégrée dans le réseau piézométrique Artois-Picardie. Par la suite, le bassin de l'Hallue, qui dispose de longues chroniques hydrologiques et piézométriques, a servi de terrain expérimental à plusieurs reprises, notamment de 1997 à 2000, pour l'étude de la migration des nitrates d'origine agricole dans l'aquifère non saturé, et en 2006, pour les mesures de dépression dans la zone non saturée, sur site tensiométrique expérimental.

Les données du piézomètre de référence de Senlis-le-Sec, suivi depuis près de 50 ans sont toujours utilisées, notamment pour caler le modèle prévisionnel des crues de la Somme.

Les ressources en eau du bassin de l'Hallue ont été captées à partir de 2004 au moyen de deux forages situés à Bussy-les-Daours, pour contribuer d'une façon importante à l'AEP de la Communauté d'agglomération amiénoise, avec un prélèvement de 600 à 700 m³/h.

Jean-Claude ROUX

Carte du Bassin expérimental de l'Hallue (Somme)



Bassin expérimental de l'Hallue

Période d'étude intensive 1966-1975

Équipement

- Climatologie : 3 parcs climatologiques et 10 pluviomètres.
- Piézométrie : 7 puits à enregistrement permanent, 65 à relevés périodiques (bi-mensuel, mensuel ou trimestriel).
- Hydrologie : 4 stations de jaugeage permanentes (déversoirs : 1 parschal, 1 seuil épais, 2 lames minces).

Caractéristiques géographiques

- Superficie : 219 km².
- Altitude moyenne : 96 m (mini 27 - maxi 160).
- Surface de plateaux : 123 km².
- Surface de vallées sèches et humides : 75 km².
- Surface des vallées humides : 5 km².
- Longueur du cours permanent : 15 km.
- Longueur du cours temporaire : 5 km.
- Longueur totale des vallées sèches et humides : 100 km.

Caractéristiques géologiques

- Craie du Sénonien et du Turonien supérieur, sous couverture de limons quaternaires (environ 5 m).
- Épaisseur du réservoir : 40 à 100 m (moyenne 70 m).
- Substratum : marnes (Dièves) du Turonien moyen.
- Épaisseur des alluvions : 2 à 10 m.

Caractéristiques climatologiques

- Précipitations moyennes annuelles : 700 mm.
- Écarts annuels de 200 à 250 mm entre l'amont et l'aval (20 à 35 %).
- Températures moyennes annuelles : 8,1 à 9,9 °C.
- Insolation : 1 500 à 1 700 h/an.
- Vents dominants : secteur Ouest, vitesse moyenne annuelle 2,5 à 3 m/s.
- Évapotranspiration moyenne annuelle : 516 mm.

Caractéristiques hydrogéologiques

- Milieu fissuré, assimilable à un milieu poreux.
- Craie compacte sous les plateaux, fissurée sous les vallées sèches et humides.
- Ruissellement : 1 à 2 %.
- Régime de la nappe : libre.
- Épaisseur de la nappe : 15 à 50 m (moyenne : 35 m).
- Profondeur de la nappe : 0 à 50 m (moyenne : 35 m).
- Variations piézométriques très régulières : hautes eaux fin hiver/début printemps - basses eaux octobre/novembre.
- Fluctuations moyennes : 2 m.
- Gradient hydraulique : 1 à 3/1000 en vallées, 10/1000 sous les versants.
- Écoulement vers les vallées sèches et humides. Drainage par le cours d'eau.
- Coefficient d'emmagasinement : 5 à 6 %.
- Réserves régulatrices : 4,6 à 34 Mm³/an (moyenne : 17,6 Mm³/an).
- Capacité d'emmagasinement : 21,6 Mm³/an.

Caractéristiques hydrologiques

- Débit moyen annuel : 1,14 m³/s ; d'étiage : 0,62 m³/s.
- Débit spécifique moyen : 5,2 l/s/km².
- Lane d'eau écoulée : 184 mm.
- Indice de variabilité des débits journaliers : variation annuelle 1 à 6 - variation interannuelle : 1 à 27.
- Grande régularité des débits.
- Corrélation parfaite entre débits et variations piézométriques.



Bassin de l'Hallue : Parc météorologique de Behencourt (1966). J.-C. Roux



Bassin de l'Hallue : Site expérimental de mesures de dépression dans l'aquifère de la craie non saturé, par mesures tensiométriques (Warloy-Baillon - Somme, 2006). L. Bertrand

Évaluation et connaissance des ressources en eau

Durant ces années, il s'agit surtout d'hydrogéologie descriptive. Les travaux consistent principalement à effectuer des inventaires intensifs ou descriptifs selon les régions, créer des captages publics et privés, dresser des cartes piézométriques et réaliser des synthèses documentaires.

La première carte des eaux souterraines de la France à 1/1 000 000, dressée à la requête de la DATAR, est éditée en 1965, suivie de la carte hydrogéologique du Bassin de Paris à 1/500 000 en 1966, et de cartes à 1/200 000 (Nord – Pas-de-Calais, Picardie...).

Le premier " Atlas des eaux souterraines de la France " par région administrative est réalisé en 1970 à la demande de la DATAR.

Les premières cartes hydrogéologiques détaillées à l'échelle de 1/50 000 (Douai, Amiens, 1963...) ou des cartographies régionales (Atlas des nappes aquifères de la Région parisienne, 1970), Causses du Quercy, Causses nord-montpelliéraines, Crau, Artois-Picardie, Rhin-Meuse, Seine-Normandie) sont publiées .

De nombreuses monographies hydrogéologiques détaillées, par nappe ou par bassin hydrologique, sont réalisées à la demande des Agences de l'eau ou des Services du Génie Rural (Val d'Authion, Maine-et-Loire), atlas départementaux (Seine-Maritime, Eure, Somme, Calvados, Vienne).

Les premiers réseaux de contrôle des niveaux piézométriques des nappes sont mis en place systématiquement à la fin des années 50 dans le Nord de la France (Calcaire carbonifère et Craie), puis étendus progressivement à l'ensemble du Bassin de Paris. Un réseau piézométrique a été créé en 1958 pour la surveillance de la nappe de l'Éocène inférieur et moyen de Gironde, puis étendu ensuite aux six aquifères de ce département..

Des jaugeages de sources et de cours d'eau étaient effectués régulièrement dans certaines régions (Nord, Pas-de-Calais, Picardie, Normandie), ces " réseaux hydrométriques " ayant pour objectif d'étudier les relations entre eaux souterraines et de surface dans les bassins sédimentaires, et d'effectuer des bilans de bassins hydrogéologiques.

Par ailleurs, le BRGM intervient de plus en plus pour des études régionales ou locales de recherche en eau potable et industrielle, par implantation et suivi de forages. Il contribue au renforcement de l'alimentation en eau aussi bien de grandes villes (Lyon, Nice, Paris, Lille, Rouen, Le Havre...), que de nombreuses collectivités rurales.



Présentation de l'Atlas hydrogéologique du département de Seine-Maritime (Rouen, mai 1978) à Dr. : André Bettencourt, Président de la Région Haute-Normandie; à G. : J.-C. Roux, Directeur du Service Géologique Régional du BRGM. BRGM/PNO

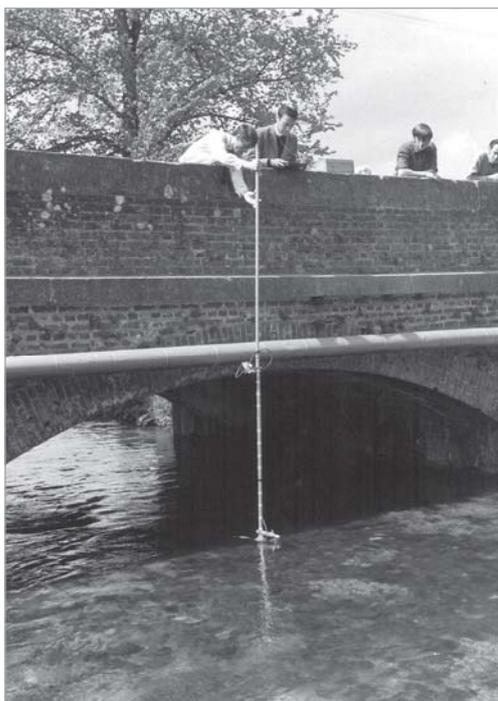


Henri Paloc (2003), auteur de la carte hydrogéologique de la région des Causses Nord-Montpelliéraines. J.-C. Roux



J. Margat sur le réseau piézométrique de la Zone Industrielle de Rouen (1973) J.-C. Roux

Jaugeage de rivière en Haute-Normandie par les techniciens du BRGM (P. Pascaud à G., J. Trémembert à Dr.), 1975.
BRGM



Ces études sont accompagnées par le développement des techniques de prospection géophysique, de télédétection et de diagraphie dans les forages, et ultérieurement par la mise au point de la Résonance Magnétique Protonique (RMP).

En 1967, les travaux de reconnaissance des ressources en eau de la nappe de la plaine de la Bassée (vallée de la Seine en amont de Montereau), destinée au renforcement de l'alimentation de Paris, sont les plus importants jamais réalisés, par le nombre de forages, piézomètres et pompes d'essai effectués, et les moyens humains mobilisés.

Les méthodes d'évaluation des ressources en eau sont établies, il s'agit désormais d' "Évaluation des Ressources Hydrauliques (ERH). C'est le passage définitif dans le quantitatif. La méthodologie de leur gestion est esquissée.

Gestion quantitative de l'eau

À partir des années 70, la gestion prévisionnelle des eaux souterraines s'intensifie avec le développement de l'hydrogéologie quantitative basée sur l'informatique hydrogéologique. Les modèles numériques remplacent les modèles analogiques.

Les hydrauliciens du BRGM créent des modèles hydrodynamiques maillés et des modèles globaux (hydrodynamique de nappe et d'exploitation) : GARDENIA (modèle global à réservoir pluie/débit), MARTHE (modèle maillé nappe/river), SESAME, VIKING, BICHE, CATHERINE, TIGRE, POPOFF...

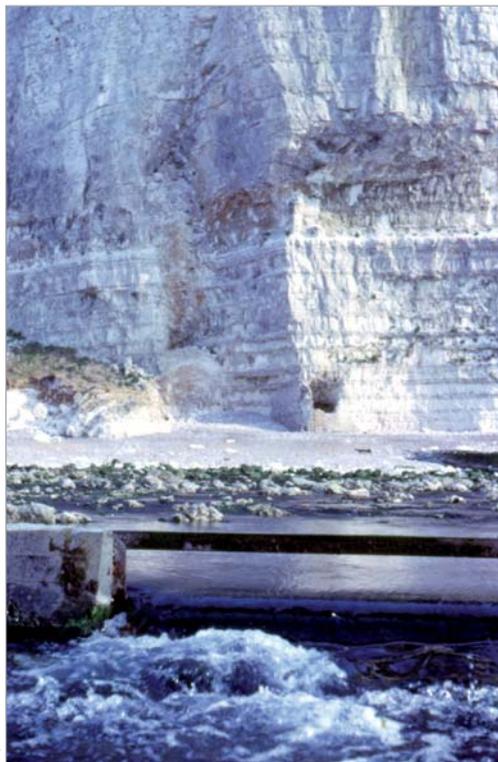
Puis, l'apparition des micro-ordinateurs, qui se substituent aux ordinateurs à " temps partagé ", conduit à des modèles de plus en plus performants, avec des approches analytiques des structures et des comportements hydrodynamiques des systèmes aquifères à toutes échelles et en 3 D, régime permanent puis transitoire, les capacités de calculs allant en augmentant.

Au fil des années, des grands aquifères seront modélisés : Grès du Trias (Lorraine), Calcaire carbonifère (Nord), aquifères multicouches d'Aquitaine, Nappe alluviale du Rhin (plaine d'Alsace), nappe de la Crau, Plaine du Roussillon, Infra-Toarcien en Poitou-Charente, nappe de la Craie de la Somme et certains modèles sont adaptés à la gestion des champs captants et à la gestion prévisionnelle des ressources.

Dans certains cas, l'économie de l'eau est prise en compte avec sa composante sociologique.

À l'étranger, certains aquifères sont également modélisés : modèles du SOUS (Maroc), du SAQ (Arabie), des Sables

Déversoir de jaugeage des Sources littorales d'Yport (Seine-Maritime) en 1967.
J.-C. Roux



Paul Sangnier plonge dans le conduit karstique des Sources d'Yport (1967).
J.-C. Roux



verts du Sénégal, du “ Main see level aquifer ” dans l’île de Malte.

En 1976, la notion de “ Systèmes aquifères ” est introduite par Jean Margat. Ceux-ci seront matérialisés par l’édition en 1980 de la “ Carte hydrogéologique de la France. Systèmes aquifères ” à 1/1 500 000, puis repris beaucoup plus tard, au début des années 2000, pour établir le “ Référentiel hydrogéologique de la France ” BD RHF[®], puis, en 2010, le référentiel - version 2 BD LISA[®].

En 1976, trois années successives de sécheresse conduisent à une diminution des ressources en eaux superficielles dans une grande partie de la France, particulièrement sensible dans le Massif armoricain, région de socle peu perméable, où l’alimentation des collectivités et des usines est essentiellement assurée par les eaux de surface.

Cette situation de crise attire l’attention des pouvoirs publics sur les eaux souterraines qui peuvent constituer des ressources d’appoint non négligeables.

L’hydrogéologie des roches fissurées cristallines se développe alors dans les massifs anciens, appliquant les techniques mises au point en Afrique de l’Ouest, et des centaines de forages obtenant des débits de quelques centaines de litres à 10-20 m³/h, et exceptionnellement de 50 à 100 m³/h. sont réalisés dans le socle avec la technique du “ marteau fond de trou ”. Leurs implantations sont favorisées par les apports des techniques d’identification et d’interprétation de la fracturation (images satellites, analyseur d’image, prospection radon, traitement informatique des données).

Au début des années 2000, les travaux de recherche dans les aquifères du socle se poursuivent avec les programmes SILURES, RAPSODI en Ille-et-Vilaine, et CASPAR.

Cette sécheresse préoccupe aussi l’Administration sur le risque d’assèchement des forages dans les bassins sédimentaires, et les hydrogéologues du BRGM établissent des prévisions de niveau de nappe à moyen terme à l’aide de modèles de calcul (GARDENIA), et participent aux “ Comités sécheresse ” du Ministère chargé de l’Environnement et des préfetures.

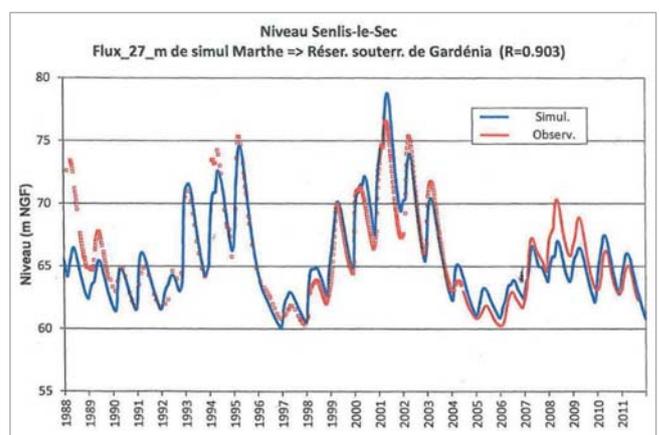
Les roches carbonatées font l’objet de nombreuses études et recherches dans les régions et massifs calcaires (Craie du Nord, du Bassin de Paris, Jura, Préalpes, Causses, Provence, Pyrénées). Parmi les plus célèbres, le système karstique de la Fontaine de Vaucluse et la Craie en Picardie (bassin de l’Hallue) qui ont fait l’objet d’un suivi permanent durant de longues années et de nombreuses recherches sur leur bassin d’alimentation, et la source sous-marine de Port-Miou près de Marseille, sur laquelle



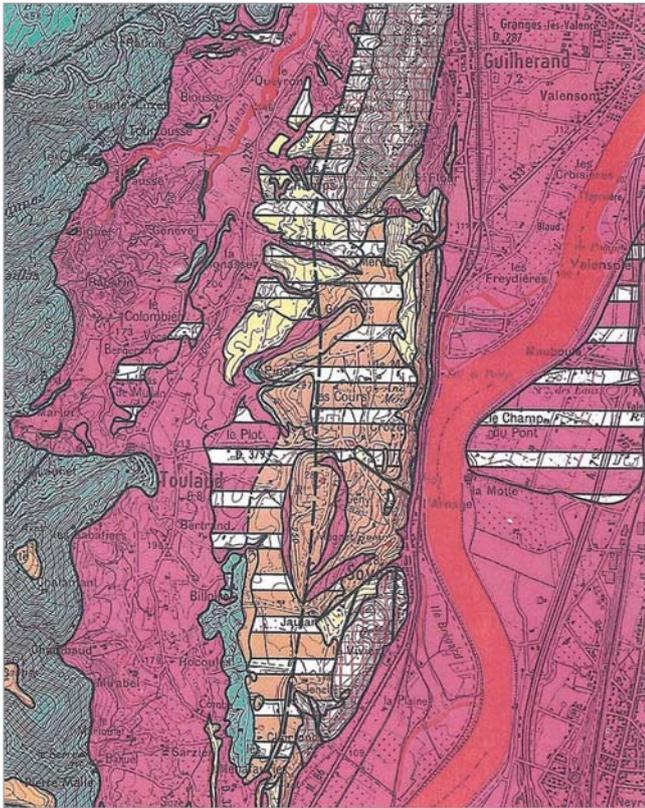
Recherche des zones aquifères fissurées par prospection géophysique électrique. BRGM



Pompage d’essai dans la nappe de la Craie à Radicatel (Seine-Maritime) pour l’AEP du Havre. J.C Roux, 1975



Modèles couplés MARTHE et GARDENIA pour la prévision du niveau de la nappe de la Craie dans le Bassin de la Somme (Senlis-le-Sec - 80). BRGM



Extrait de la Carte de vulnérabilité de Valence à 1/50 000. BRGM

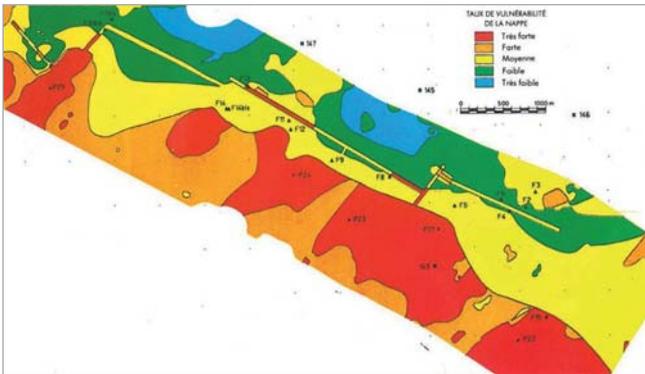
des études et travaux ont été réalisés par le BRGM et la Société des Eaux de Marseille, pour tenter son captage sans attirer l'eau salée, à l'aide d'un barrage à la base du conduit karstique.

Des expériences de surexploitation d'aquifères karstiques sont tentées (source de Nîmes).

Gestion qualitative de l'eau

Dès le début des années 70, la préoccupation de la connaissance de la qualité des eaux souterraines et de leur protection, à l'encontre des risques de pollution apparaît progressivement. Le critère qualitatif s'ajoute aux aspects quantitatifs.

La notion de vulnérabilité des nappes est introduite par Jean Margat. La première carte de vulnérabilité de la France à 1/1 000 000 est publiée en 1970, suivie de nombreuses cartes régionales à l'échelle départementale (Seine-Maritime, Eure...), locale (plaine du Var...) ou par coupures à 1/50 000 (Vallée du Rhône, Vallée de l'Al-lier, Lorraine...). La méthodologie est affinée par l'utilisation de méthodes multicritères.



Carte de vulnérabilité du champ captant de Houle-et-Moulle (Pas-de-Calais). BRGM

Les premiers réseaux de contrôle de la qualité des eaux souterraines sont mis en place dans plusieurs régions (Normandie, Nord, Centre du Bassin de Paris) afin de suivre l'évolution générale de l'hydrogéochimie des nappes ainsi que dans de grandes zones industrielles afin de détecter les pollutions spécifiques (Lyon, Rouen, Alsace, Bassin minier du Nord), dont certaines sont qualifiées d'"historiques".

Les études documentaires préalables à leur établissement mettent en évidence la croissance régulière des teneurs en nitrates depuis 1955-1960 dans la plupart des nappes libres du territoire et attirent l'attention des pouvoirs publics.



Dispositif expérimental de mesure de l'effet filtre des berges sur la rive du Rhône à l'île du Grand Gravier (Grigny - 69). BRGM, 1991

Des études *in situ* sur site expérimental à Connantré (51) et des datations isotopiques dans le Nord, démontrent la lente vitesse d'infiltration des nitrates, de l'ordre de 0,50 à 0,80 m par an, dans la Craie non saturée.

En 1980, la première carte des teneurs en nitrates des eaux souterraines en France à 1/1 500 000 met en évidence leur répartition géographique calquée sur les grandes régions d'élevage ou d'agriculture intensive comme la Bretagne, le Bassin de Paris ou le Poitou-Charentes.

En 1993, une nouvelle carte indique que les teneurs en nitrates dans les nappes libres n'ont pas diminué.

De surcroît, des nappes captives sont à leur tour contaminées par les milliers de forages les mettant en communication avec les nappes supérieures polluées.

La prévision d'évolution des teneurs en nitrates dans des sources : source de Provins, 77 (modèle BICHE), et dans des aquifères : nappe de Beauce (modèle SESAME) est effectuée.

En 1980, des phénomènes de dénitrification naturelle dans les nappes semi-captives sont mis en évidence dans la région de Douai à Emmerin (59). Ultérieurement, les mêmes phénomènes seront reconnus dans d'autres régions sédimentaires, puis dans le sous-sol granitique du Massif armoricain où la dénitrification est liée à la présence de pyrite (Bassin de Coët-Dan - Morbihan).

Le développement des analyses isotopiques dans les laboratoires du BRGM permet la datation des eaux souterraines par le dosage du Tritium dans les nappes libres et du Carbone 14 dans les nappes captives.

En 1985, est constitué un " Observatoire national de la qualité des eaux souterraines " (ONQUES) géré par le BRGM sous la tutelle des Ministères chargés de l'Environnement et de la Santé, comportant toutes les analyses d'eau des captages AEP. À partir de 2000, il sera relayé par le " volet qualité " de la base " ADES ".

Les progrès de l'infographie permettent des avancées significatives dans la cartographie avec les approches " multicritères ", associant paramètres géologiques, technologiques, socio-économiques (de la ressource en eau, de l'aptitude à l'assainissement individuel, de résistance à la sécheresse) ou encore des ressources en eau souterraine de l'Afrique de l'Ouest.

À partir de 1968, date de sa fusion avec le Service de la Carte Géologique de France, le BRGM joue un rôle dans l'établissement des périmètres de protection des captages d'eau destinés à la consommation humaine, nombre de ses hydrogéologues étant agréés en matière d'hygiène publique.

En 1989, un " guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau destinés à la consommation humaine " est publié. Il servira de base au décret d'avril 1995 du Code de la Santé publique.

Des études expérimentales (Ansereuilles, 59 ; Crépieux-Charmy, 69) mettent en évidence " l'effet filtre des berges " vis-à-vis des micropolluants métalliques existants dans le lit des cours d'eau.

La mise au point de logiciels informatiques de traitement multicritères de données, comme SYNERGIS, au BRGM, permet d'établir à la demande, des cartes de vulnérabilité de deuxième génération, véritables outils d'aide à la décision.



Laboratoire d'analyse des isotopes du BRGM. BRGM

Au cours de toutes ces années, les trois missions du BRGM : Service public, Recherche et Travaux pour tiers sont intimement liées, contribuant à la richesse de ses ingénieurs hydrogéologues pouvant allier recherche et pratique.

En 1994, est créée la Société ANTEA et les études d'ingénierie et de conseil du groupe BRGM en France et à l'étranger deviennent du domaine exclusif de cette filiale.

Une grande partie des effectifs d'hydrogéologues et hydrauliciens est transférée dans cette nouvelle structure, alors que par ailleurs les chercheurs sont affectés à la Direction de la Recherche du BRGM.

Le BRGM mettra plusieurs années à reconstituer et à développer un " Service eau " assurant à nouveau les missions de Service public, la recherche, et les travaux à l'étranger.

Les eaux souterraines : Enjeu national et européen

En 1992, la deuxième Loi sur l'Eau impose, notamment, l'établissement d'un SDAGE par grand bassin, comportant un volet " eaux souterraines ". Des hydrogéologues du BRGM participent aux groupes de travail.

En 1996, le rapport du Conseil Général des Mines sur " la Gestion durable des eaux souterraines " (" rapport Martin ") renforce encore le rôle du BRGM, et, à partir de 2002, le Ministère chargé de l'Environnement lui confie l'harmonisation et la centralisation des réseaux de surveillance des eaux souterraines au niveau national. La base ADES, contenant les analyses chimiques des captages et les historiques piézométriques, est créée, en liaison avec tous les détenteurs de données et gestionnaires de réseaux de bassins, régionaux et locaux. Elle est mise gratuitement à la disposition du public sur Internet.

La Directive européenne 2000/60/CE introduit le concept de " Masse d'eau " pour les eaux de surface et les

Hydraulique villageoise en Afrique de l'ouest

Sur l'initiative d'hydrogéologues détachés auprès du CIEH⁽¹⁾ basé à Ouagadougou, débuta au milieu des années 60, une grande étude hydrogéologique statistique du socle de l'Afrique de l'Ouest, réputé jusque-là " imperméable ". Cette étude, notamment au Ghana et au Nigéria, concluait par la possibilité de trouver des ressources en eau contenues dans les fractures et les fissures des roches granitiques à des profondeurs de l'ordre de 80-100 mètres.

Mais les techniques de forage traditionnelles ne permettaient pas de forer dans ces terrains très durs dans des délais raisonnables. Le transfert à l'hydrogéologie d'une technique de forage utilisée pour la prospection minière (dite du " marteau fond-de-trou " qui permet de forer un ouvrage de 100 mètres en une journée), fut la solution pour résoudre ce problème et devait conduire à la réalisation de campagnes de forages équipés de moyens de pompage manuels. Utilisée pour la première fois au Mali lors de la sécheresse des années 1972-1973, cette technologie a permis de réaliser rapidement, économiquement et avec succès, des forages d'eau dans les roches cristallines saines et d'équiper en quelques décennies au moins 12 000 villages en Mauritanie, au Sénégal, au Tchad, au Togo, au Gabon, au Niger, au Burkina-Faso... Les financements étaient assurés sur fonds de coopération français (FAC), européens (FED),

des banques de développement (BOAD, BAD...) et même de pays tiers (Arabie Saoudite, USA).

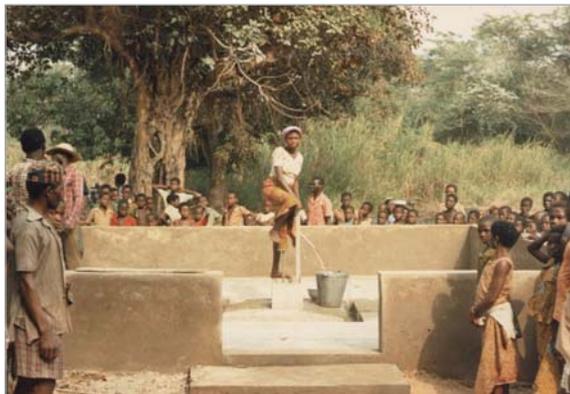
Cette vraie révolution a permis de fournir tout au long de l'année aux populations rurales (soumises au manque d'eau chronique en saison sèche et à de nombreuses maladies liées à la consommation d'eau puisée dans les marigots ou dans des puisards peu profonds), une eau saine, proche des utilisateurs. La disponibilité de l'eau a permis, en outre, la création de " petits périmètres irrigués " et le développement de cultures maraîchères, avec un impact bénéfique sur les carences alimentaires. Les méthodes de prospection mises au point au cours de ces programmes (utilisation des photographies aériennes et images satellite, géologie structurale, géophysique électrique, prospection du radon...) ont permis des taux de réussite de plus de 80 %, passant de trois forages par an à douze forages par mois.

La multiplication des ouvrages de captage dans le Sahel pouvant faire craindre un épuisement de la ressource, le BRGM a proposé à la communauté européenne, puis a réalisé en partenariat, une étude sur la recharge naturelle des aquifères par les pluies au Burkina-Faso.

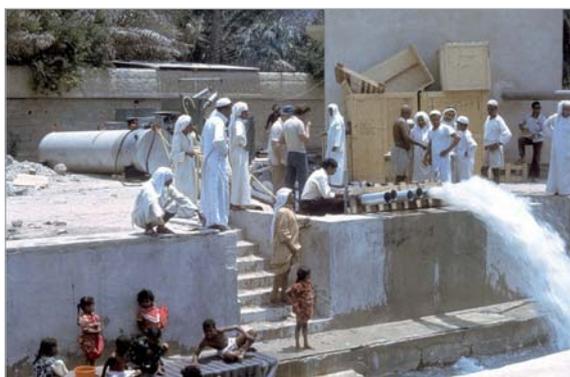
René BISCALDI

⁽¹⁾ Centre Interafricain d'Études Hydrauliques.

Hydraulique villageoise au Togo (1977).
R. Biscaldi



Pompage d'essai en Arabie.
BRGM



Forage dans les formations basaltiques du Rift à Addis-Abeba (Ethiopie) pour l'industrie alimentaire. *S. Lallier, 2009*

eaux souterraines. Le BRGM détermine alors les masses d'eau sur la base du référentiel hydrogéologique de la France en collaboration avec les hydrogéologues de la Direction de l'eau, des Agences de l'eau et des DIREN.

En 2001, les inondations catastrophiques dans la Vallée de la Somme provoquées par une remontée exceptionnelle de la nappe de la Craie, rappellent aux pouvoirs publics l'interdépendance des eaux souterraines et des eaux de surface.

Le Ministère chargé de l'Environnement confie au BRGM la réalisation d'un modèle pluie-transfert-niveau-débit permettant d'évaluer les probabilités d'occurrence des niveaux de la nappe et des débits du fleuve et de ses affluents, en fonction des précipitations observées, pour l'année suivante.

Ces prévisions sont réalisées à l'aide du modèle GARDE-NIA pour les crues et MARTHE pour l'identification des zones de nappes les plus contributives aux rivières.

Le BRGM est désormais associé à la prévision à moyen terme des crues de cours d'eau, principalement dans les bassins sédimentaires ; il apporte un appui au Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations..

Les missions Eau à l'international

Les travaux à l'étranger ont représenté une part très importante des activités hydrogéologiques du BRGM, principalement en Afrique de l'Ouest.

■ **En Afrique**, le BRGM a réalisé ou contribué à de nombreuses études (inventaire des points d'eau), puis de synthèses hydrogéologiques suivies de programmes de recherches pour l'alimentation des populations rurales : "Hydraulique villageoise" dans de nombreux pays (cf. encadré p. 112).

Au Cameroun, les "nappes en creux" ont été mises en évidence (nappe du Logone – Chari – Tchad).

Au Maroc, la coopération avec les Services de l'hydraulique et l'ONEP s'est poursuivie jusqu'au début des années 1990 avec le détachement ou des missions d'hydrogéologues du BRGM.

En Afrique du Sud, le BRGM est intervenu pour l'alimentation en eau de centres secondaires (en coopération avec le Geological-Survey sud-africain).

En Libye, dans le cadre du GEFLI, le BRGM a participé à cinq projets hydro-agricoles intégrés, en assurant le volet production d'eau à partir des ressources souterraines.

Au Sahara, l'étude des ressources en eau (projet ERESS), réalisée pour l'UNESCO, a permis d'étudier les ressources des nappes artésiennes du Continental intercalaire et du Continental terminal en Tunisie et Algérie.

La mise en valeur intensive, principalement pour l'irrigation des grands aquifères du Sahara et de la péninsule arabique (projet SAQ) (cf. encadré), a placé les autorités des pays concernés dans la nécessité d'améliorer la connaissance de leurs ressources en eaux souterraines non renouvelables et de se munir d'outils de gestion de ces ressources.

Le BRGM a largement contribué à l'amélioration des méthodologies nécessaires à ces évaluations : géologie de bassin, évaluation de la recharge et modélisation hydrodynamique.

■ **En Australie**, dans les années 70, des hydrogéologues du BRGM détachés auprès de la "Water Conservation and Irrigation Commission du New South Wales" ont apporté leur concours à l'étude, à l'évaluation et au développement des ressources en eau dans le versant ouest des reliefs côtiers.

Le projet SAQ

Réalisé de 1981 à 1986 en **Arabie Saoudite**, les études concernant le système aquifère multicouche dont celui des grès cambriens sur 370 000 km² au Nord-Ouest du pays sont exemplaires :

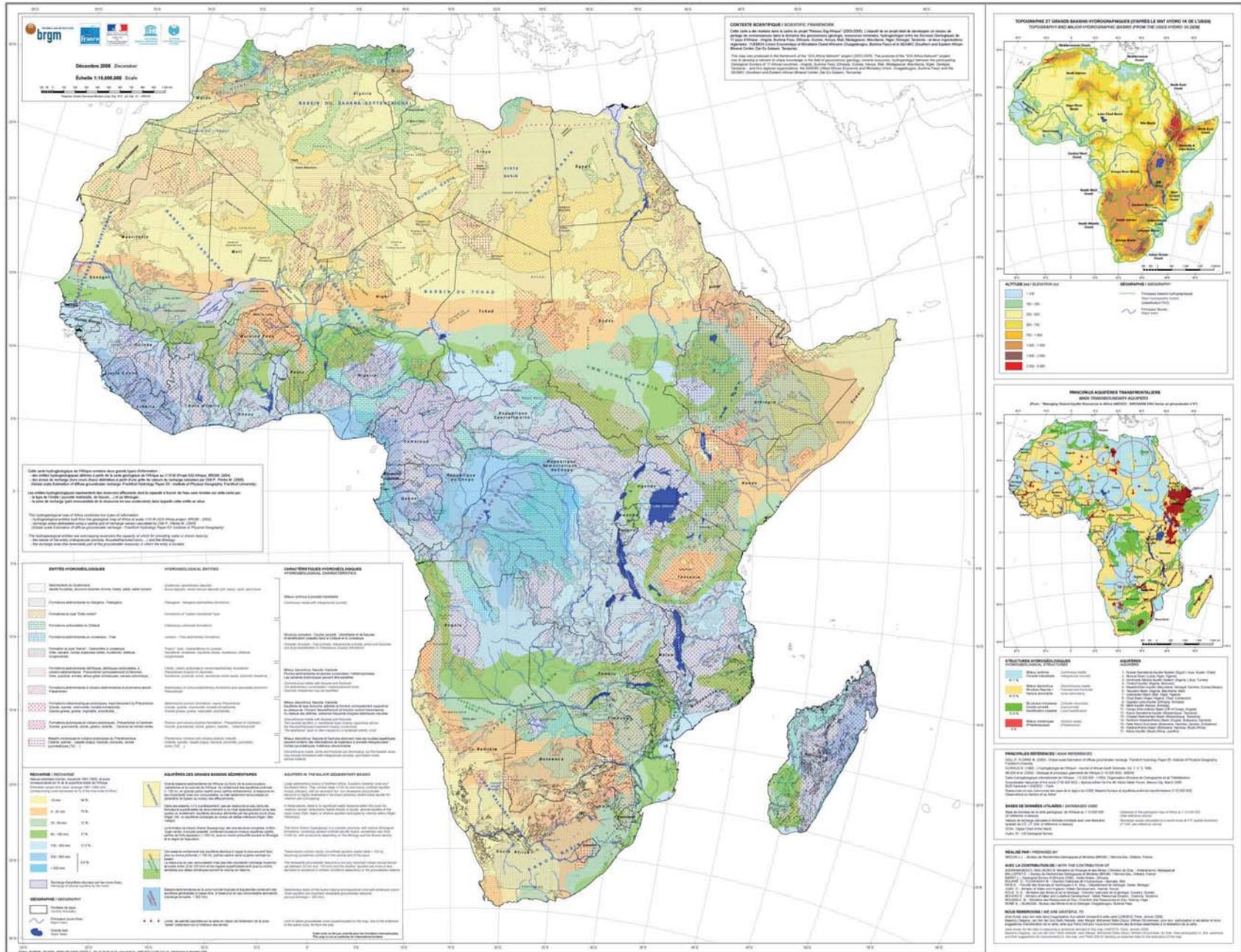
- collecte de toutes les données existantes, inventaire de 10 000 forages, création de fichiers informatisés,
- analyses chimiques de 15 000 échantillons d'eau,
- étude de la recharge,
- synthèse hydrogéologique et élaboration d'un modèle conceptuel sur la forme de deux systèmes aquifères multicouches et d'un modèle mathématique pour chacun de ces systèmes,
- réalisation de trente forages de 150 à 2500 m de profondeur,
- élaboration et simulation de scénarios d'exploitation sur 20 ans.

La contribution de géologues de bassin très compétents a permis d'obtenir des modèles conceptuels précis.

Ces études ont ensuite connu des prolongements de moindre importance au Koweït, Oman... jusqu'en 1990 et au-delà, notamment avec de nouveaux contrats en Arabie dans les années 2000.

Henri TORRENT

CARTE HYDROGÉOLOGIQUE DE L'AFRIQUE À 1/10 M
HYDROGEOLOGICAL MAP OF AFRICA AT 1/10 M SCALE



Carte hydrogéologique de l'Afrique.
J.J. Seguin, 2005

■ **En Chine**, le BRGM a effectué en 2000 le “ volet eaux souterraines ” d’une étude portant sur l’apport de l’imagerie satellite SPOT au développement des surfaces irriguées de la province du Shandong.

■ **En Inde**, entre les années 1997 et 2000, il a étudié les aspects hydrogéologiques de deux études d’impact de mine : mines de fer de l’état de Goa, mines de chromites de Sukunda (Est du pays). En 1999, le BRGM crée, à la demande du gouvernement français, en partenariat avec le NGRI (National Geophysical Research Institute), le CEFIRES (CEntre Franco-Indien de Recherche sur les Eaux souterraines), toujours actif en 2012. Implanté à Hyderabad, au sein du NGRI, comprenant une quinzaine de chercheurs, doctorants post-docs français (BRGM) et indiens (NGRI) et servant de base logistique et de terrains expérimentaux pour les chercheurs du BRGM basés en France, il a notamment permis des progrès significatifs sur la connaissance des aquifères fissurés de socle (mise en évidence du rôle prépondérant joué par l’altération) et le développement d’outils d’aide à la décision pour la gestion des eaux souterraines à l’échelle du bassin versant, en prenant également en compte la composante géochimique.

■ **En Amérique centrale**, en partenariat avec SEURECA, le BRGM a effectué les études nécessaires à l’alimentation en eau de la capitale du Salvador.

■ **En Grèce**, il a dressé la carte hydrogéologique de Crète et effectué les recherches nécessaires à l’approvisionnement en eau potable de la ville de Thessalonique.

■ **À Malte**, dans les années 1990-91, le BRGM a effectué l’évaluation des ressources en eau souterraine de l’île et établi un modèle de gestion de l’aquifère calcaire karstifié, le “ Main sea level aquifer ”.

Depuis le milieu des années 2000, le BRGM intervient principalement à l’international dans le cadre de projets nationaux de type GIRE (Gestion Intégrée de la Ressource en Eau). Les thématiques abordées concernent majoritairement la composante ressource de la GIRE.

Ces activités prennent très largement en compte le recueil et la valorisation de données existantes sous forme de bases de données et de mise à disposition de l’information hydrogéologique sous supports cartographiques au travers de systèmes d’informations géographiques (SIG). Ces outils sont mis à la disposition des services gestionnaires de l’eau au sein des ministères ou services dédiés des États.

Les échelles de travail sont très variables : elles vont de la dimension multinationale (Carte Hydrogéologique de l’Afrique au 1/10 000 000), à nationale (cartographie



Prospection par sismique réfraction en Grèce. R. Biscaldi, 1972

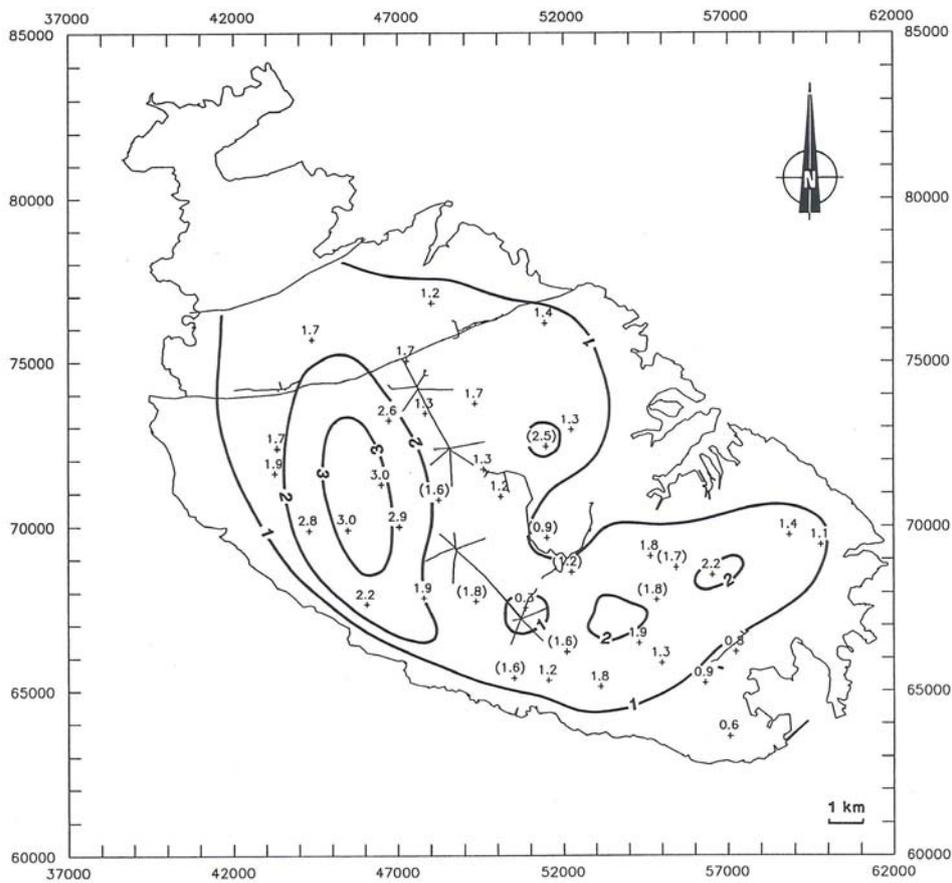


Forage en Grèce. R. Biscaldi, 1972

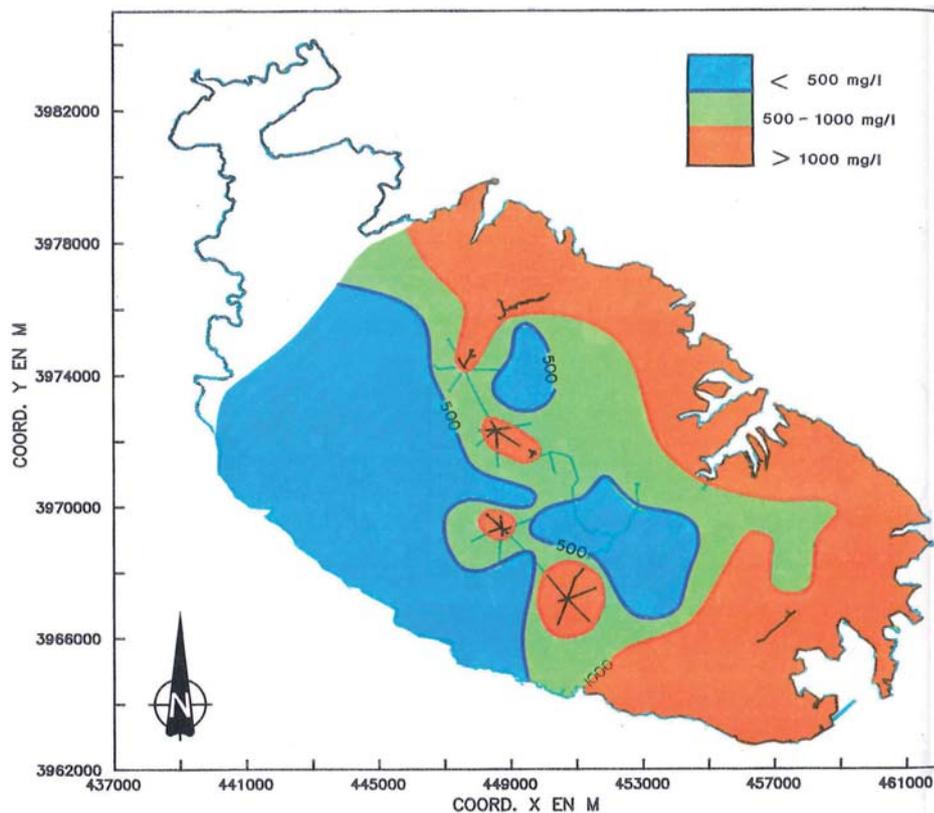
hydrogéologique du Sultanat d’Oman au 1/1 000 000) et régionale (cartographie des ressources en eau souterraine du Burundi au 1/250 000).

Au-delà de la valorisation de l’information existante, le BRGM participe activement à la gestion quantitative des ressources en eau souterraine en couplant modèles géologiques 3D et modèles hydrodynamiques performants. Ces activités trouvent leurs applications dans les zones de forte tension en matière de ressource en eau. Ainsi, sont plus particulièrement concernés les pays tels que l’Arabie Saoudite ou la Jordanie où une gestion prévisionnelle pertinente s’impose en raison de la quasi absence de recharge des aquifères. Sur le continent africain, après quelques années d’absence, le BRGM re-développe une activité en contexte de socle et en contexte volcanique dans l’Est Africain, notamment dans le cadre de développement d’activités industrielles dans le domaine de l’agroalimentaire (Nigeria, Éthiopie, Angola, Burkina Faso, RDC, Bénin...).

La dimension “ qualité ” des eaux souterraines constitue également un axe de développement de l’activité du BRGM à l’étranger. L’Inde offre un terrain expérimental pour le BRGM qui, dans le cadre d’une collaboration avec le NGRI à Hyderabad développe des méthodologies de recherche d’eau en contexte de socle et étudie les méca-



Carte piézométrique de la nappe du «Main sea level aquifer» de l'île de Malte en 1991. A. Guittierez, 1994



Répartition des teneurs de chlorures dans la nappe du «Main sea level aquifer» de l'île de Malte. A. Guittierez, 1994

nismes de contamination des eaux. L'étude de la contamination des aquifères par les radionucléides naturels constitue aujourd'hui un enjeu sanitaire majeur en particulier sur la péninsule arabique. L'étude de ces mécanismes fait actuellement l'objet d'un projet d'importance majeure pour le BRGM en Arabie Saoudite. Dans ce cadre, d'importantes campagnes de prélèvements et d'analyses d'eau sont réalisées et sont complétées par des forages destinés à l'acquisition des données à finalité scientifique.

En Tunisie, des études hydrogéologiques sont conduites dans une perspective de restauration de l'environnement naturel des oasis de la baie de Gabès.

Autres domaines d'intervention

Les hydrogéologues du BRGM ont apporté leur concours et expertise dans plusieurs secteurs spécialisés, tels les eaux minérales et thermales, la géothermie, la sûreté des sites de stockage de déchets, la décontamination des sols et nappes polluées, les travaux publics et grands aménagements urbains, et les stockages en aquifère (gaz, CO₂).

Eaux thermales et minérales

Le BRGM a apporté ses compétences à la définition des réservoirs géologiques et des aires d'alimentation des sources, à partir des années 50.

Il a créé un fichier national des sources minérales et thermales groupant les caractéristiques physico-chimiques et géologiques, en liaison avec les ministères de l'Industrie et de la Santé, et publié en 1973. Il établit la première carte des eaux minérales et thermales de la France à l'échelle à 1/1 000 000 (rééditée en 1994, puis en 2005).

À partir de 1980, plusieurs travaux de re-captage en profondeur des sources ont été entrepris, soit pour augmenter leur production, soit pour les protéger des pollutions de surface : Boussanges (bassin de Vichy), Chaudes-Aigues, Aix-les-Bains, Luchon...

Des recherches ont été faites sur l'origine et l'âge des eaux et du CO₂, notamment par datation isotopique : Cauterets, Luchon, Perrier, Balaruc-les-Bains..., et sur la circulation des fluides géothermaux en profondeur (Cauterets, Luchon, Dax...), mettant en évidence des temps de transfert de plusieurs milliers d'années.

Ces études ont permis l'établissement des périmètres sanitaires d'émergence des sources thermales (Aix-les-Bains...) et la réalisation d'un guide méthodologique.

À l'étranger, les hydrogéologues du BRGM sont intervenus pour la recherche de sources minérales pour le compte de sociétés françaises (Vittel en Californie, 1978).



Forage jaillissant à Ax-les-Thermes (Ariège).
J.C. Soulé



Réalisation d'un forage à Cauterets (Hautes-Pyrénées).
J.C. Soulé

Recherche et exploitation de l'énergie géothermique haute température à Bouillante (Guadeloupe)

De 1969 à 1977, deux forages de 338 m et 2 500 m de profondeur (BO-2 et BO-4) sur un total de quatre, ont permis de capter une eau entre 242 et 250 °C. Néanmoins, seul le forage BO-2 était suffisamment producteur (150 t/h d'eau dont 30 t/h de vapeur utilisée) pour être connecté à une centrale expérimentale de 4,4 MW (Bouillante I), exploitée par EDF entre 1986 et 1992. Après trois ans d'arrêt et des travaux de réhabilitation complète, l'exploitation de cette centrale est reprise en 1996 par Géothermie Bouillante SA, filiale créée en 1995 par les groupes BRGM et EDF, et se poursuit toujours actuellement. Jusqu'en 2003, année de sa fermeture, BO-2 a été pratiquement le seul puits producteur à alimenter cette centrale, même si une opération de stimulation thermique réalisée en 1998 sur le puits BO-4 avait permis d'améliorer sa productivité de façon significative.

Entre 2000 et 2001, trois nouveaux puits de production déviés, - d'une profondeur moyenne de 1 000 m étaient forés sur la même plate-forme que celle de BO-4 -. Parmi ces puits, seuls deux étaient suffisamment producteurs avec un fluide à 250-260 °C, au fond des puits. Ils ont été raccordés, avec le forage BO-4 stimulé, à la nouvelle centrale, constituée de l'ancienne unité Bouillante I, appelée aussi unité GB1, et d'une autre unité de 10-11 MW, appelée GB2. Cette nouvelle centrale, qui a été mise en service au début de l'année 2005,

est alimentée par un débit maximum d'eau proche de 600 t/h, dont la séparation des phases à 160 °C, permet de produire 120 t/h de vapeur, soit une production d'électricité pouvant atteindre un maximum de 15 MW. Cette nouvelle centrale fournit 6 à 7 % des besoins annuels en électricité de l'île. Afin de stabiliser, de sécuriser et d'optimiser la production de cette centrale, la réinjection partielle des fluides de production dans le sous-sol est prévue. Une opération de ce type à partir de l'ancien puits BO-2, qui servait de puits d'observation, est en cours de mise en œuvre. Actuellement, seuls les deux nouveaux puits de production alimentent la centrale car le forage BO-4 est utilisé comme puits d'observation, à la place de BO-2.

Un nouveau projet de développement au Nord de la baie de Bouillante, nommé Bouillante III, qui bénéficie des connaissances des nombreuses études de recherche menées par le BRGM, est prévu à court, moyen terme, avec la réalisation d'une nouvelle campagne de forages d'exploration pour valider les données existantes. Si ces forages aboutissent à des résultats positifs, des forages de production et de réinjection seront réalisés, ainsi qu'une nouvelle centrale, indépendante de la première, dont la capacité de production attendue est de 20 à 40 MW, portant ainsi la production d'électricité autour de 20 % des besoins de la Guadeloupe.

Bernard SANJUAN



Réalisation d'un forage géothermique à Bouillante (Guadeloupe) en 2001. COFOR



Centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe), 2006. BRGM im@gé

Géothermie

Le premier forage géothermique a été réalisé en 1961 pour le chauffage et la climatisation de la Maison de la Radio à Paris, mais c'est surtout le choc pétrolier de 1973 qui déclencha un grand programme de recherches pour effectuer des économies d'énergie, ce qui provoqua de nouveaux types d'interventions du BRGM, à la demande de l'AFME : inventaire des potentiels géothermiques par bassins, régions et départements, réalisation de guides géothermiques, implantation et suivi de forages dans le Bassin de Paris et le Bassin aquitain (Bordeaux, Creil, Meaux, Melleray, Montreuil, Orly...) pour le chauffage urbain, ainsi qu'à Djibouti.

Par ailleurs, l'utilisation de la géothermie très basse température (10 à 15 °C) par pompe à chaleur eau / eau, a connu un grand succès et a développé considérablement l'activité des hydrogéologues par la création de plusieurs milliers de forages, principalement en nappes alluviales. Des cartes thématiques d'aptitude des nappes à l'alimentation de pompes à chaleur ont été établies (Nord, Lorraine, Champagne, Vallée du Rhône...).

Soultz-sous-Forêts

Un site référence en géothermie profonde

Le projet franco-allemand de géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts dans le Nord de l'Alsace est localisé sur une anomalie thermique connue grâce à l'exploitation pétrolière ancienne. Un consortium d'industriels franco-allemands regroupés au sein d'un GEIE (Groupeement Européen d'Intérêt Économique) baptisé "Exploitation Minière de la Chaleur" pilote ce projet initié dans les années 90, côté français, par le BRGM.

Les forages profonds ont recoupé les formations sédimentaires du Tertiaire et du Secondaire du fossé rhénan pour atteindre un massif de granite fracturé d'âge carbonifère dans lequel circulent des fluides hydrothermaux salés (100 g/l).

Plusieurs phases de reconnaissance par forage profond ont jalonné l'histoire et le développement de ce projet : une phase au toit du granite (1 400 - 2 000 m), une phase vers 3 500 m, puis la phase actuelle à 5 000 m de profondeur où trois puits géothermiques ont atteint une température de 200 °C. Compte tenu de la faible perméabilité initiale du granite naturellement fracturé, ces puits qui produisent respectivement 30 l/s à 175 °C et 12 l/s à 145 °C, ont fait l'objet d'un programme de stimulations hydrauliques et chimiques et de circulations hydrauliques inter-puits avant la construction

La seule centrale géothermique haute température de production d'électricité en France, est située à Bouillante en Guadeloupe, sur la côte ouest de Basse-Terre (cf. encadré p. 118). Sa réalisation, son fonctionnement et son développement sont fortement redevables des travaux d'exploration, de suivi et de recherche menés, avec le soutien financier de l'ADEME, par des géologues, hydrogéologues, géochimistes et géophysiciens du BRGM ainsi que de sa filiale CFG Services.

Enfin, le BRGM a pris une part active au Programme de Recherche franco-allemand d'exploitation de la chaleur en "roches fracturées sèches" dans le granite à Soultz-sous-Forêts, en Alsace, au Nord de Strasbourg (cf. encadré ci-dessous).

La surenchère des coûts énergétiques ne fait que remettre à l'ordre du jour, la mise en valeur de ces ressources naturelles renouvelables, avec les outils de gestion qui leur sont associés.

d'une centrale et sa mise en service en juin 2008. Ce type de géothermie est maintenant baptisé EGS pour "Enhanced Geothermal System".

La centrale géothermique de Soultz est munie d'un cycle binaire fonctionnant selon le principe du cycle de Rankine capable de produire une puissance brute maximale installée de 2,2 MWe. Pendant l'exploitation, cette centrale fait l'objet d'un programme d'accompagnement scientifique et technique soutenu par l'ADEME et des fonds institutionnels allemands (BGR/BMU).

Le GEIE et ses partenaires scientifiques et techniques réalisent des études dans le domaine du réservoir (micro-sismicité induite, traçages, fluides), des technologies de surface et sub-surface (corrosion, dépôts, pompes de production) et des études environnementales (acceptabilité sociale, radioactivité naturelle). La mise en œuvre de ce programme permet de disposer d'une plate-forme expérimentale grandeur nature autorisant un retour d'expérience industriel immédiat et permettant la constitution à court terme d'une expertise dans le domaine de la géothermie profonde.

Albert GENTER

Stockages de déchets dangereux

Les hydrogéologues du BRGM ont joué un grand rôle dans la quête de la sécurité des sites de stockages de déchets ménagers, industriels et radioactifs.

Les études ont commencé dès le début des années 70 pour les déchets ménagers ou industriels, avec des inventaires régionaux de sites peu perméables favorables à l'implantation de décharges, ou nationaux (sites POLMAR) ainsi que pour l'enfouissement de cadavres d'animaux en 1973, en cas d'épidémies. Elles se sont ensuite appliquées à la caractérisation des sites (vulnérabilité de la nappe, mesures des très faibles perméabilités avec mise au point de matériels de mesure, rôle des couvertures).

Plusieurs sites ont fait l'objet d'études expérimentales sur la migration des polluants dans le milieu saturé et les nappes (stockage de boues industrielles à Mézières-les-Cléry (Loiret), décharge d'ordures ménagères de Fretin (Nord), digue de stériles de la mine Pb – Zn de Saint-Salvy (Tarn)...).

Membres du Comité Sol-Déchets du Ministère de l'Environnement, des ingénieurs du BRGM contribuent alors à la mise au point de la réglementation sur les "barrières passives" et les "barrières actives" des sites d'enfouissement des classes I et II, et à la caractérisation des lixiviats.

Le BRGM a joué aussi un rôle majeur sur le plan de la sûreté du stockage des déchets nucléaires.

En 1974, à la demande du CEA, ses hydrauliciens travaillaient sur la simulation des écoulements au sein des atolls du Pacifique.

De 1976 à 1980, le BRGM coordonne l'inventaire des formations susceptibles d'accueillir des déchets radioactifs, lancé par la Communauté des États Européens, à l'initiative de l'AIEA, en collaboration avec les services géologiques des 6 pays membres pour la sélection des formations selon des critères hydrogéologiques (perméabilité, gradient hydrodynamique...). Un Atlas *ad hoc* est publié.

À la suite de ces études, le site de Soulaines-Dhuis (Aube) est sélectionné, puis étudié pour le stockage de déchets radioactifs de faible et moyenne activité. Il deviendra opérationnel en 1992.

Le choix de ce site est particulièrement original. Implanté sur une couche sableuse contenant une petite nappe perchée et surmontant une épaisse couche argileuse, il permet de contrôler en permanence, la qualité de la nappe sous le dépôt et aux émergences de la nappe par un réseau de galeries drainantes placées sous les silos.



Perméamètres PANDA et PRECI, 1989. BRGM/M. Barrès



Site expérimental d'étude de la migration des boues industrielles dans le sol à Mézières-les-Cléry (Loiret), 1979. BRGM/M. Sauter



Suivi de la migration des métaux dans la digue à stériles de la mine Pb-Zn de Saint-Salvy (Tarn), 1978. BRGM/M. Barrès

Parallèlement, les hydrogéologues du BRGM travaillent sur le site de stockage "Manche" à La Hague, sur les sites des centrales nucléaires EDF et au recensement des formations à prospector pour le stockage en profondeur des déchets à haute activité (granite, schistes, argiles et sel), puis au suivi des expérimentations dans les forages de reconnaissance.

En 1985, l'ANDRA lui confie la maîtrise d'œuvre des forages de reconnaissance sur le site de Moncornet (Aisne) dans les argiles callovo-oxfordiennes.

À partir de 1992, le BRGM, puis sa filiale ANTEA, dont les ingénieurs sont issus du BRGM, participe aux études sur les sites de la Vienne, du Gard et de la Meuse (caractérisations géologiques et lithologiques, tests hydrodynamiques *in situ*, mesures de très faibles perméabilités et approches hydrogéologiques globales).

En 1999, le site de Bure (Meuse) concernant les argiles callovo-oxfordiennes, reconnues à Montcornet, situées à 420-550 m de profondeur, est sélectionné pour y implanter un laboratoire souterrain.

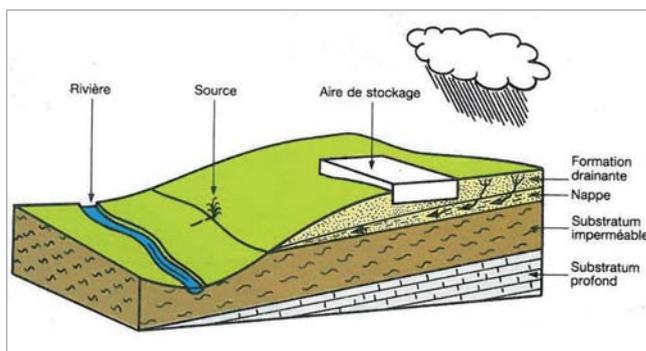
L'ANDRA confie à ANTEA la maîtrise d'œuvre scientifique du creusement des deux puits, de 5 et 6 mètres de diamètre, atteignant cette formation argileuse, puis des galeries joignant ces ouvrages. Cette phase s'est étalée de 2002 à 2006.

Les travaux réalisés conjointement par le BRGM et ANTEA ont porté principalement sur la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie des formations reconnues par ces ouvrages, contribuant à apporter des données précieuses aux modèles de sûreté élaborés par l'ANDRA.

Décontamination des sols et des nappes

Dans les années 1990, de nouvelles préoccupations environnementales apparaissent avec les sites et sols pollués. Tout naturellement les hydrogéologues et hydrogéochimistes du BRGM, puis d'ANTEA vont s'investir dans ce domaine et tout particulièrement dans la décontamination de nappes polluées par d'anciens stockages industriels : décharges, sites miniers, lagunes... (pollution historique) ou des déversements accidentels : c'est l'ère de l'"hydrogéologie réparatrice".

Citons en particulier, parmi ces travaux de dépollution effectués par le BRGM, ou ANTEA, la nappe de la plaine d'Alsace au Nord de Mulhouse contaminée par les terrils de sel des MDP, les déversements d'hydrocarbures consécutifs aux accidents ferroviaires de La Voulte et de Chavanay (vallée du Rhône), le site du Grand Stade de France à Saint-Denis, les anciennes usines Renault



Caractéristiques hydrogéologiques du site de Soulaines (Aube)



Accident ferroviaire de Chavanay (Loire)

dans l'île Seguin à Boulogne-Billancourt, Metaleurop à Noyelles-Godault, et le terril d'arséno-pyrite de Chessy.

Travaux souterrains - Risques naturels

Ce sont les conditions hydrogéologiques qui déterminent pour une large part la faisabilité et le coût des ouvrages exécutés dans le sous-sol : fondations profondes, grandes fouilles et déblais, mines et ouvrages souterrains, etc. Le dossier hydrogéologique est donc un élément essentiel des projets correspondants ; il doit être suffisamment détaillé pour pouvoir estimer à l'avance les venues d'eau à attendre en tout point lors des travaux, et adapter en conséquence les méthodes d'exécution. Ce dossier comprend classiquement quatre chapitres :

- Définition du modèle hydrogéologique (dédit lui-même de la configuration géologique du site), afin de bien délimiter les horizons aquifères ;
- Estimation de la perméabilité de chacune des unités hydrogéologiques concernées ;
- Estimation de la charge hydraulique dans chaque unité et de ses variations saisonnières ;
- Calcul prévisionnel de l'exhaure au cours des diverses phases de travaux, compte tenu des méthodes d'exécution envisagées.

Les spécialistes de l'eau du BRGM ont apporté leur concours aux études préalables à la réalisation de grands

travaux de Génie Civil, tels que le tunnel du Canal du Nord dans la Somme, les métros de Lille, Lyon, Marseille, les Halles Châtelet à Paris, le centre tertiaire de Lille, les Centrales EDF du Blayais, de Nogent-sur-Seine et de Fessenheim, le tunnel sous la Manche et le tunnel ferroviaire Lyon-Turin, ou encore pour le drainage et la stabilisation de la falaise de la Côte des Basques à Biarritz.

Les exemples suivants illustrent ces types d'intervention.

> Tunnel sous la Manche

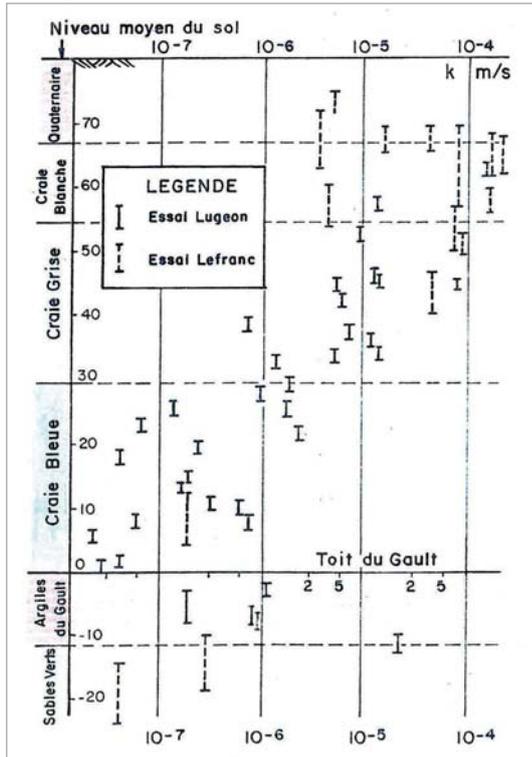
Dans les années 1880, près de 4 km de galeries de reconnaissance avaient été creusés sous la mer, par les Français et les Anglais, en vue d'un futur tunnel. Situées entièrement dans la Craie bleue à la base du Cénomanién, ces galeries non revêtues n'avaient produit qu'un débit d'exhaure réduit (1,3 l/mn/ml, côté français) : cette faible perméabilité a été confirmée par les résultats de 84 essais LUGEON effectués dans les essais en mer, au cours des deux principales campagnes de reconnaissance (1972-73 et 1986-88).

Le log de la perméabilité de la Craie bleue a une répartition remarquablement gaussienne, avec une moyenne logarithmique de $1,7 \cdot 10^{-7}$ m/s. Sachant que des perméabilités beaucoup plus fortes devaient être attendues au passage de nombreuses failles repérées côté français, il a été décidé de creuser les tunnels dans la Craie bleue avec des tunneliers à confinement, capables d'équilibrer la pression hydrostatique. Mais il faut souligner que les deux grandes cavernes de croisement entre tunnels ferroviaires, situées sous la mer au tiers et aux deux tiers du Détroit, ont été creusées en méthode conventionnelle, avec des parois nues qui n'ont fourni que des débits minimes ; elles avaient bien sûr été implantées dans les zones que l'on savait dépourvues de toute faille potentiellement aquifère.

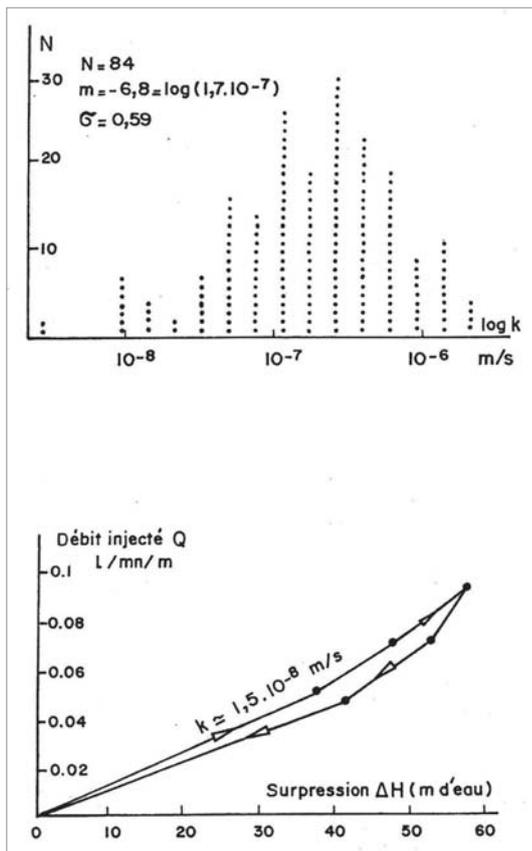
> Tunnel ferroviaire d'Ambin

Le projet, long de 52 km entre Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie) et Suse (Piémont), a fait l'objet d'études hydrogéologiques approfondies lors de l'élaboration de l'avant-projet en 2005-2006. Ces études se sont basées sur trois ensembles de données :

- Le bilan de l'exhaure des galeries hydroélectriques d'EDF en Maurienne, qui, sur un linéaire total de 104 km, ont donné en moyenne un débit spécifique stabilisé de 9,5 l/s/km ;
- L'étude de 961 points d'eau (sources, captages, puits, torrents...) identifiés au voisinage du tracé et susceptibles d'être impactés par les travaux ;
- Les résultats des 294 essais d'eau de type Lugeon effectués dans les forages de reconnaissance le long du tracé, et qui ont permis d'estimer la perméabilité moyenne des



Tunnel sous la Manche : décroissance de la perméabilité avec la profondeur (mesures dans les forages à terre de Sangatte (Pas-de-Calais). BRGM/J. Piraud



Tunnel sous la Manche : distribution gaussienne des perméabilités de la Craie bleue, mesurées dans les forages en mer. BRGM/J. Piraud

10 principaux ensembles hydrogéologiques recoupés par le projet. À noter que deux forages déviés jusqu'à l'horizontale ont été réalisés, dont l'un sur une longueur totale de 3 km, avec exécution d'essais de perméabilité en fond de trou avec une sonde pompée à travers le train de tiges.

La synthèse de ces données a permis de calculer au sein de chacun de ces ensembles, d'une part le débit transitoire prévisible dans les 100 m suivant le front de taille, d'autre part le débit stabilisé loin du front, compte tenu de la perméabilité, de la profondeur et de la réalimentation par les pluies. En fin de compte, le débit d'exhaure prévisionnel devrait atteindre entre 1,2 et 2,3 m³/s à la sortie du tunnel côté français. De plus, 37 points d'eau sensibles susceptibles d'être impactés ont été identifiés en surface, et des mesures compensatoires ont été étudiées en cas de tarissement partiel ou total du fait des travaux du tunnel.

> *Falaises de la Côte des Basques*

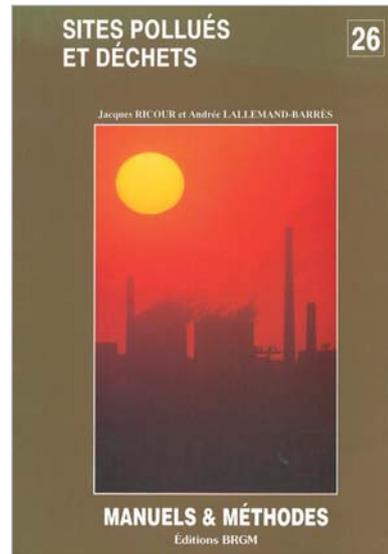
Les falaises de la Côte des Basques, au Sud de Biarritz, sont constituées par des marnes tertiaires surmontées par une dizaine de mètres d'alluvions sableuses, baignées par une nappe soutenue par les marnes. Ces falaises, urbanisées en tête, sont sujettes à de nombreux glissements de masse, dus à la fois à l'écoulement de la nappe et aux attaques de la mer en pied. Pour les stabiliser, des travaux considérables ont été entrepris dans les années 1990 sous la maîtrise d'œuvre du BRGM, puis d'ANTEA : rabattement de la nappe par puits à drains rayonnants, murs de soutènement, béton projeté en surface, ancrages précontraints en profondeur, digue d'enrochements en pied de falaise, etc.

Confinement géologique du CO₂

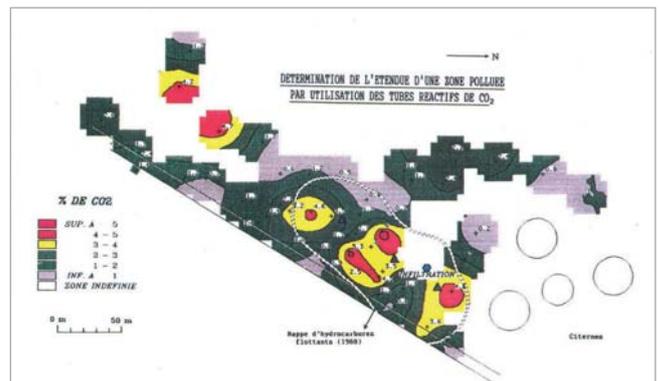
Dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, le recours au captage à la source d'émission du dioxyde de carbone d'origine industrielle et à son confinement en formation géologique profonde, est une des mesures nécessaires pour limiter l'impact de ce gaz sur le climat de la planète.

Les types de confinement géologique envisageables sont le stockage dans des aquifères salins profonds, dans des gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés ou en phase de déclin, et dans des veines de charbon profondes inexploitées.

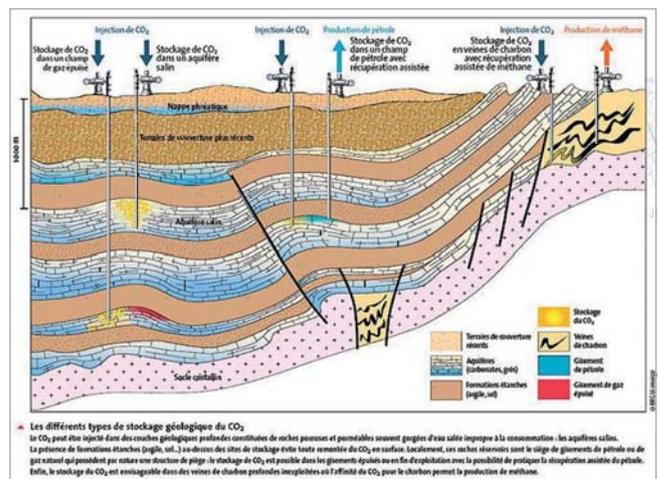
Dans tous les cas, la présence d'une couche-écran imperméable au-dessus de la roche réservoir est indispensable pour empêcher toute remontée du CO₂, vers la surface, et la profondeur doit être suffisante pour atteindre des conditions de pression et de température qui déterminent



Sites pollués et déchets, J. Ricour et A. Lallemand-Barrès



Détermination d'un sol pollué par hydrocarbures par mesure du CO₂. BRGM



Conditions de confinement du CO₂ dans le sous-sol. BRGM/ I. Czernichowski

son passage à l'état dense supercritique, la profondeur minimale nécessaire étant de l'ordre de 800 mètres.

Le BRGM s'est avéré pionnier dans ces recherches, ayant participé au premier projet européen "The Underground Disposal of Carbon dioxide" (de 1993 à 1995) qui a permis de démontrer la faisabilité de cette technique.

Depuis, le BRGM participe, en partenariat avec de nombreux organismes de recherche et des industriels majeurs, français et européens (IFP, Total, GDF, BP, BGS...) à un grand nombre de projets de recherche dont la conception d'outils d'aide à la décision pour la sélection de sites de stockages, le piégeage du CO₂ dans les réservoirs en France, la faisabilité du stockage dans les mines de houille de Gardanne et de Carling, l'étude du comportement à long terme de la faisabilité du stockage en aquifère sur

des sites en Europe qui portait sur la caractérisation et la sélection de sites, l'optimisation des conditions d'injection, l'étude du comportement du CO₂ à court et à long terme dans le réservoir, la sécurité et la surveillance des stockages. Il participe également aux recherches menées sur les pilotes et démonstrateurs effectuées en France et dans le monde.

En matière de reconnaissance des réservoirs pour le stockage dans les aquifères profonds, l'expérience de ses hydrogéologues et hydrodynamiciens est fondamentale.

Grâce à ses spécialistes des sciences de la Terre (géologues, géophysiciens, hydrogéologues, géochimistes, minéralogistes, modélisateurs), le BRGM joue un rôle primordial en France et en Europe dans la filière de captage et de stockage du CO₂.



Journée des hydrogéologues du BRGM «La planification et la gestion des eaux» (17 sept. 1992) De G. à Dr. : R. Gouzes (BRGM), L. Zilliox (IMF Strasbourg), J.-J. Collin (BRGM), B. Moussié (BRGM), G. Barrocu (Univ. Cagliari, Italie), L.-A. Lecler, (Cemagref), L. Clark (WRC), J. Margat (BRGM), J.-M. Royer (BRGM), S. Ramon (AERM), J. Ricour, (BRGM Lille), R. Llamas (Univ. Madrid). BRGM

Depuis 2010, un pilote intégré de captage - transport - stockage de CO₂ est réalisé par Total à Lacq (40) à 4000 mètres de profondeur dans un ancien gisement de gaz naturel. Il s'agit du premier pilote intégré dans le monde.

D'autres démonstrateurs sont en projet dans le Dogger et le Trias du Bassin de Paris.

Le BRGM est très actif dans l'animation de réseaux européens, notamment CO₂ Geonet, réseau d'excellence européen sur le stockage du CO₂.

Coopération scientifique et enseignement

Dans le domaine de l'eau et de l'environnement, le BRGM a conduit une politique de coopération scientifique et le transfert technologique tant avec les pays les plus avancés (USA, Allemagne...) qu'avec des pays moins développés, notamment les pays de l'Europe de l'Est. Avec le Service de l'hydraulique de Chypre, la recherche a porté sur le milieu fissuré et les méthodes de prospection par géologie structurale. Avec l'Espagne, la coopération a été particulièrement active dans le domaine de la formation (Université de Madrid, École des Mines, École Polytechnique de Barcelone) et sur l'épuration des eaux usées avec l'ITGE.

Des hydrogéologues du BRGM ont été désignés à de multiples reprises comme experts auprès des représentants de la France dans le cadre de réunions internationales sur les ressources naturelles et l'eau (Tokyo, Nairobi, Khartoum...) et auprès de grands organismes (UNESCO, Banque Mondiale...).

Situé au carrefour des thèmes socio-économiques de l'hydraulique des milieux fissurés et de l'évaluation de la recharge pluviale sous conditions sévères, un grand programme soutenu par la CE était lancé au Burkina-Faso " l'eau pour le développement durable ". La problématique était la suivante : grâce à la capacité de découvrir des sites de forage à relativement fort débit, autorisant le développement de périmètres irrigués, ne s'approchant pas trop près des limites d'une ressource insuffisamment renouvelée et trop compartimentée. De petits périmètres cultivés, irrigués par l'eau des forages, ont ainsi été réalisés sous le contrôle de chercheurs du BRGM.

Dans les années 90, le Département " Eau " participait au programme EPOCH de la CE qui tentait d'apporter les premières réponses aux questions posées par l'évolution climatique, notamment avec le volet " eau souterraine " (plaine du Roussillon) du projet MEDALUS.

Bien que le BRGM n'ait pas eu officiellement de mission d'enseignement, ses ingénieurs ont largement contribué à

la formation d'hydrogéologues et d'ingénieurs plus généralistes. Dans le cadre de partenariat de recherche avec les Universités, il a accueilli de nombreux étudiants et thésards avec co-pilotage professeur-ingénieur.

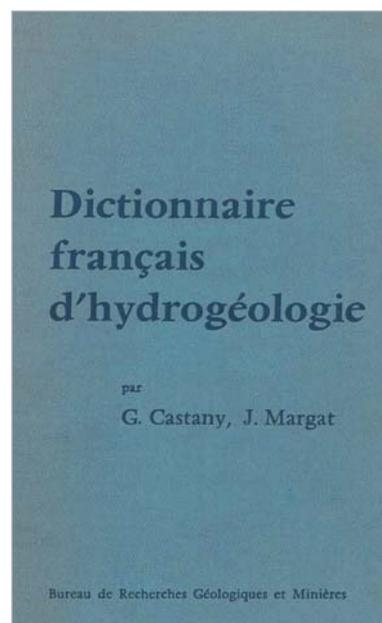
De même, les coopérations avec les services de l'hydraulique des pays francophones comportaient fréquemment un volet " formation " de leurs jeunes cadres.

Les hydrogéologues du BRGM ont participé régulièrement aux enseignements dans les universités et dans des ministères (Agriculture, Équipement, Industrie) ou des organismes de formation professionnelle.

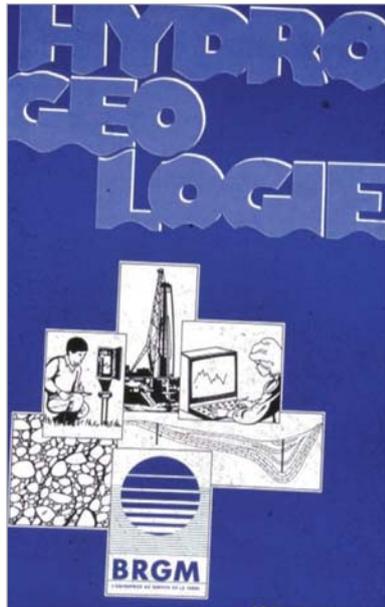
Diffusion des connaissances et éditions

Les travaux du BRGM dans le domaine des eaux souterraines ont toujours été largement diffusés à travers :

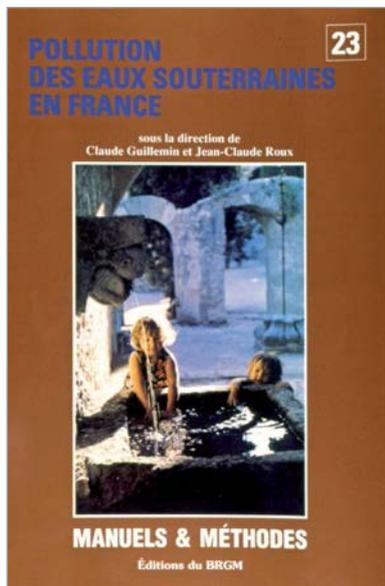
- l'édition d'ouvrages de référence (cf. chap. IX) parmi lesquels :
- " *Dictionnaire Français d'hydrogéologie* " (1977), " *Atlas des eaux souterraines de la France* " (1970), " *Pollution des eaux souterraines en France* " (1992), et de nombreux ouvrages dans la série " Documents du BRGM ", les collections " *Manuels et Méthodes* ", " *Les enjeux des géosciences* ", ou les " *Collections scientifiques et techniques* ".
- la coédition d'ouvrages réalisés par ses ingénieurs ou des associations professionnelles : " *Les eaux souterraines, connaissance et gestion* " (2004), " *Aquifères et eaux souterraines en France* " (2006).



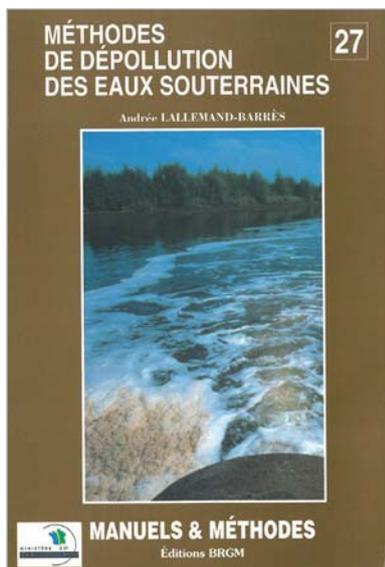
Dictionnaire français d'hydrogéologie, G. Castany et J. Margat, 1977



Revue Hydrogéologie



Pollution des eaux souterraines en France, C. Guillemin, J.-C. Roux (1992)



Méthodes de dépollution des eaux souterraines. A. Lallemand-Barrès, 1995

- les publications cartographiques : cartes hydrogéologiques à différentes échelles, cartes de vulnérabilité, cartes de qualité des eaux, atlas des eaux souterraines, carte des eaux minérales et thermales.
- la revue “ Hydrogéologie ” publiée durant 30 ans, référence francophone dans le domaine des eaux souterraines.
- le bulletin “ Situation hydrologique et prévision des basses eaux ”.
- une large diffusion des rapports scientifiques et techniques et des résumés de recherches scientifiques) avec la mise à disposition du public dans ses bibliothèques ou en ligne sur Internet.
- l’organisation ou la co-organisation de nombreux colloques nationaux et internationaux (cf. chap. IX) consacrés à l’hydrogéologie, parmi lesquels “ *Eaux souterraines et approvisionnement en eau de la France* ” (1977), “ *Sécurité des stockages de déchets dangereux et radioactifs* ” (1988), “ *L’eau souterraine : un patrimoine à gérer en commun* ” (1990), , “ *Géoconfine* ” (1993), “ *Captage et stockage du CO₂* ” (2007).

L’activité “ Eau et Environnement ” constitue désormais une thématique majeure du BRGM, notamment en ce qui concerne les problèmes de qualité, de quantité et de gestion des ressources souterraines. Près de 80 agents (hydrogéologues, hydrologues, économistes, hydrogéochimistes, hydrauliciens, modélisateurs...) et plus de 100 intervenants dans toutes les régions de métropole et d’outre mer interviennent dans ces domaines.

En 50 ans, le chemin parcouru est immense.

En 2012, le “ Service Eau ” a été intégré dans la nouvelle Direction “ Eau, Environnement et Ecotechnologies ”(D3E), unité “ Evaluation et Valorisation des connaissances sur l’Eau ” (EVE).

Jean-Claude ROUX
(Extrait de « Histoire de l’Hydrogéologie Française » par Didier Pennequin, Jean Margat et Jean Claude Roux Edition du Comité Français d’Hydrogéologie (C.F.H.) Orléans 2013)