HISTOIRE DE L'HYDROGÉOLOGIE FRANÇAISE

Jean MARGAT Didier PENNEQUIN Jean-Claude ROUX

Association Internationale des Hydrogéologues
Comité Français d'Hydrogéologie

HISTOIRE

DE

L'HYDROGÉOLOGIE FRANÇAISE

Jean MARGAT Didier PENNEQUIN Jean-Claude ROUX

Association Internationale des Hydrogéologues
Comité Français d'Hydrogéologie
2013

HISTOIRE DE L'HYDROGÉOLOGIE FRANÇAISE

Jean MARGAT, Didier PENNEQUIN, Jean-Claude ROUX

SOMMAIRE

PRÉFACE 5

LISTE DES COLLABORATEURS 7

AVANT-PROPOS 9

Chapitre I — **Préludes : Des origines au XVIIIe siècle** 11
Les précurseurs aux XVIe et XVIIe siècles 11
XVIIIe siècle 14

Chapitre II — **XIXe siècle : d'un acte de naissance aux fondements d'une science exacte et naturelle** 17
Les ingénieurs prennent les devants 18
Les géologues entrent dans le jeu 22
Des captages des sources aux forages profonds 23
Premières spécialisations 24

Chapitre III — **XXe siècle : de 1900 à la Seconde Guerre Mondiale** 27
Les premiers inventaires 28
L'appel de l'Afrique 29
Naissance des traçages et de la géochimie des eaux 30
Développement de l'exploitation des eaux souterraines, premier cri d'alarme et première réglementation 30
Protection des captages d'eau potable 32

Chapitre IV — **De la fin de la Seconde Guerre mondiale aux années 1960 organisation, structuration, formation professionnelle** 33
Prise de conscience des enjeux liés à l'eau, structuration et recensement de l'exploitation 33
L'Afrique, l'autre terre d'apprentissage de l'hydrogéologie française 37

Chapitre V — **De 1964 aux années 2000 : Hydrogéologie moderne et gestion des ressources en eau** 39
Un nouveau concept, de nouveaux moyens 39
De l'hydrogéologie descriptive à l'étude du fonctionnement des ressources 41
Le développement d'un puissant outil de synthèse et de gestion des ressources en eau souterraine : le modèle mathématique 45
L'impulsion des sécheresses - Ouverture vers les ressources non conventionnelles et les outils d'aide à la décision 49
La qualité des eaux devient une préoccupation majeure - Montée en puissance de l'hydrogéochimie 51
La loi sur l'eau de 1992 - Préfiguration de la future Directive Cadre Européenne sur l'eau 55
La protection des captages s'organise, mais s'enlise... 57

L'intérêt des critères d'ordre économique 58
Et toujours l'hydrogéologue bourlingueur 59
L'hydrogéologue étend son domaine d'action 61
Eaux thermales et minérales 61
Géothermie 63
Stockages souterrains et sûreté des dépôts de déchets 64
Aménagement - Risques naturels 66
Exploitation minière 67
Sites et sols pollués 68

Chapitre VI **Le début du XXIe siècle : une grande ouverture vers les autres et à d'autres domaines du métier d'hydrogéologue** 71
La Directive Cadre sur l'eau : une organisation à l'échelle européenne 71
Changements globaux, changements climatiques et gaz à effet de serre 73
La grande ouverture 73

CONCLUSIONS 75

Chapitre VII **Principaux organismes ayant joué un rôle majeur dans le développement de l'hydrogéologie française** 77
Université 79
IFARE 91
École des Mines de Paris 97
École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy 99
BRGM 101
BURGÉAP 127
SOGREAH 134
Hydrogéologues territoriaux 147
Rôle des Agences de l'eau 153

Chapitre VIII **Portraits d'hydrogéologues français notoires du XXe siècle** 163
Édouard-Alfred MARTEL et Eugène FOURNIER 163
Henri SCHOELLER 165
Jean ARCHAMBAULT 169
Jacques AVIAS 171
Gilbert CASTANY 177
Louis SIMLER 181
Claude MÉGNIEN 183
Jean-Charles FONTES 185

Chapitre IX **Jalons chronologiques et bibliographies** 187
Jalons chronologiques dans l'histoire de l'hydrogéologie française 187
Contributions à l'histoire de l'hydrogéologie française 195
Principales publications qui ont jalonné et reflété l'évolution de l'hydrogéologie française 196
Principales thèses en hydrogéologie 204
Contributions françaises à l'hydrogéologie mondiale 206
Principales réunions hydrogéologiques en France 210

ACRONYMES 219

PRÉFACE

Dans toute discipline, la science n'est parvenue à son stade de développement actuel que par une lente démarche faite d'investigations, d'observations sur le terrain, de réflexions, d'idées nouvelles de théorisation et de quantification, parfois parsemée d'erreurs puis de changements de cap, alimentant ainsi de fructueuses controverses… Cependant, une fâcheuse tendance de la nature humaine est sa propension à oublier cette démarche, à croire que la science peut s'apprendre et se comprendre en ne s'intéressant qu'à la description synthétique de l'état actuel des connaissances, sans connaître le cheminement intellectuel qui a conduit à l'état présent.

Je crois que c'est une erreur, et que nous autres enseignants en sommes en partie responsables, pressés, il est vrai, par les programmes et la nécessité constante de réduire le volume horaire d'enseignement, d'augmenter le nombre des matières enseignées et la pluridisciplinarité, et de donner plus de place aux travaux personnels, aux lectures, à l'investigation autonome.

La faculté d'oublier est cependant essentielle à l'activité intellectuelle. Nous sommes soumis en permanence à un flux d'informations et de connaissance qui dépasse très largement notre capacité de mémorisation, et nous devons en permanence, de façon inconsciente, faire des choix, trier ces données, ne garder que celles jugées prioritaires, et rejeter celles qui pour nous ne le sont pas. C'est la qualité et la pertinence du tri que nous faisons quotidiennement qui caractérise une des facettes de l'intelligence, et qui nous permet, en mettant côte à côte des informations disparates et d'origine diverse, de comprendre tout à coup un phénomène inexpliqué, d'imaginer une autre façon de voir, un autre procédé ou une autre technique. Le processus intellectuel de l'innovation est donc basé sur les " briques " de ce que nous avons choisi de mémoriser, dans notre " histoire " personnelle, à partir desquelles nous construisons un raisonnement nouveau, ou simplement apportons une réponse sensée à une question technique ou scientifique difficile qui nous est posée.

Mais quelle est alors au juste la place de l'histoire écrite dans le processus intellectuel qui conduit au progrès scientifique ? Au-delà des dates et des noms qui jalonnent le récit, c'est, je crois, d'élargir notre mémoire personnelle, de nous rappeler l'ordre d'apparition des idées, la façon dont elles sont reprises par d'autres, transformées, modifiées ; c'est la manière dont les besoins exprimés par la Société se sont traduits par des réflexions, des essais, des recherches pour faire progresser la discipline.

S'agissant par exemple des travaux de Darcy (1856), ils sont postérieurs à ceux de Daniel Bernoulli (1738) qui avait démontré, bien avant lui, la loi d'écoulement permettant de calculer les pertes de charge dans une conduite, ou à ceux de Poiseuille (1844), pour les écoulements dans les tubes capillaires ; pour ceux-ci, la loi de pertes de charge devient linéaire. Le milieu poreux pouvant être assimilé à un ensemble de conduits capillaires, il était donc logique de penser, dès 1738 (mais personne ne l'a fait) que les pertes de charge dans ces milieux étaient linéaires. Darcy, qui n'ignorait pas les travaux de Bernoulli ou de Poiseuille, a cependant choisi l'approche expérimentale pour établir qu'effectivement c'était bien le cas, sans se référer à ces auteurs. Il en est resté là, ayant abouti à ce qu'il recherchait, c'est-à-dire la façon de dimensionner un filtre à sable. Darcy parle cependant des forages artésiens devenus fameux à cette époque avec les premiers forages profonds, comme celui de Grenelle terminé en 1841, mais ne fait aucun lien entre ces ouvrages et la loi d'écoulement de l'eau dans les nappes qu'il vient d'établir.

C'est Jules Dupuit (1857, 1863) qui établit l'équation de la diffusivité en régime permanent, et en fournit une solution radiale pour l'écoulement autour des forages, à laquelle il a laissé son nom. Il faudra attendre Thiem (1906) pour que le lien soit fait entre cette solution radiale et la mesure, par l'essai de débit en régime permanent, de la perméabilité *in situ*. En suivant la voie ouverte par Darcy, la perméabilité était une grandeur empirique, que l'on devait mesurer sur le perméamètre qu'il avait inventé. Ce n'est qu'une quarantaine d'années plus tard, après les travaux de Theis (1935) introduisant l'essai de débit en régime transitoire et la généralisation de son emploi, que l'on commence à se soucier de la comparaison entre les valeurs issues de l'essai de débit et celles basées sur des mesures au perméamètre sur des échantillons pris au même endroit. Évidemment, ça ne marche pas, à cause de l'hétérogénéité des milieux naturels, qui fait que l'essai de débit donne une valeur *moyenne* qui " homogénéise " cette hétérogénéité locale.

Mais quelle moyenne ? Personne n'en sait rien, on donne d'abord des bornes (moyennes arithmétiques, harmoniques, bornes de Cardwell et Parsons, 1945) de ce que peut être la vraie moyenne. Il faudra attendre les travaux de l'école russe (Schwidler, Landau et Lifschitz, 1960, dans d'autres domaines de la physique) puis enfin ceux de Matheron (1967) pour établir précisément qu'en écoulement parallèle, c'est la moyenne géométrique qui s'applique. Mais pour établir cela, Matheron est obligé de définir la perméabilité comme une variable aléatoire, dont il faut définir la loi de distribution spatiale, ou au moins ses premiers moments… Pauvre Darcy ! Aurait-il pu imaginer ou simplement comprendre, qu'il soit nécessaire de définir la perméabilité qu'il venait " d'inventer " comme une variable aléatoire pour comprendre l'effet des hétérogénéités ?

L'histoire, c'est comprendre ce lent cheminement de l'esprit, à partir des observations, des besoins de la technologie, de l'évolution des concepts (parfois venus d'autres disciplines) qui engendre le progrès. Bien sûr, l'histoire ne dit pas comment construire, à partir de l'état présent, les nouveaux concepts du futur. Mais elle possède deux vertus : d'une part celle de servir d'analogie pour comprendre les enchaînements et la trame qui ont conduit au progrès, et d'autre part celle de rappeler l'existence de certains travaux, parfois oubliés, éliminés par notre mémoire sélective, et qui peuvent cependant servir de " brique " irremplaçable pour la construction de l'avenir.

Cet ouvrage tente de construire, ou de reconstituer, la " mémoire " de l'hydrogéologie française. Je lui vois un rôle important, dans les deux domaines cités ci-dessus. D'abord en enseignement pour connaître la construction intellectuelle de notre discipline et l'évolution des idées. Ensuite, en recherche ou ingénierie, pour s'inspirer du fourmillement des concepts, des écoles de pensée, des organisations ou des individus ayant œuvré dans la recherche ou le développement, pour rafraîchir notre mémoire sur cette " richesse " des contributions passées. Notons aussi qu'au Royaume-Uni, sous la coordination de John Chilton, l'AIH a édité en 2012 un ouvrage collectif en anglais sur l'histoire de l'hydrogéologie mondiale, auquel le Comité Français d'Hydrogéologie a apporté sa contribution. Il viendra utilement témoigner des grandes contributions faites hors de France, car fort heureusement notre discipline n'est pas fermée et a su importer et bénéficier des avancées majeures faites dans les pays étrangers, même si le terme d'hydrogéologie est né en France (Lamarck, 1802) et si un grand nombre des contributions majeures de la discipline y ont vu le jour.

Ghislain de Marsily

Professeur honoraire d'hydrogéologie à Paris VI
Académie des Sciences

LISTE DES COLLABORATEURS

(Chapitres VII et VIII)[1]

Maurice ALBINET	*Ancien du BRGM et de l'AERM&C*
Jean-François BERAUD	*Ancien de BURGÉAP*
Daniel BERNARD	*AEAP*
Pascal BILLAULT	*AELB*
René BISCALDI	*Ancien du BRGM*
Bernard BLAVOUX	*Professeur émérite, Université d'Avignon*
Julien BONNIER	*Office de l'eau de la Réunion*
Lucien BOURGUET	*Ancien du BURGÉAP*
Laurent CADILHAC	*AERM&C*
Bruno CANALETA	*SOGREAH*
Jean CHAMAYOU	*Ancien du BRGM*
Pierre CHAUVE	*Professeur honoraire, Université de Besançon*
Jean-Jacques COLLIN	*Ancien du BRGM*
Isabelle CZERNICHOWSKI	*BRGM Service Eau*
Stéphane FOURNY	*SOGREAH*
Cécile GARNIER	*AESN*
Albert GENTER	*BRGM Division Géothermie*
Roberto GONFIANTINI	*Instituto di Geochronologia et Geochimica Isotopica del CNR, Pisa, Italy*
Gérard GRANDAROVSKI	*Ancien du BRGM SGR Alsace*
Paul JARDIN	*Ancien de SOGREAH*
Serge LALLIER	*BRGM Service Eau*
Emmanuel LEDOUX	*École des Mines de Paris*
Alain MANGIN	*CNRS e.R, Ancien Directeur du Laboratoire de Moulis*
Pierre MARCHET	*AEAG*
Ghislain de MARSILY	*Professeur honoraire, Université Paris VI, Académie des Sciences*
Paul MÜNTZER	*Ancien de l'IFARE*
Henri PALOC	*Ancien du BRGM*
Jean PIRAUD	*Ancien du BRGM et d'ANTEA*
Michel PLAUD	*Ancien de l'AEAG*
Pierre POUCHAN	*Professeur honoraire, Université Bordeaux III*
Philippe OLIVE	*Ancien du CRG, Université Paris VI*
Serge RAMON	*Ancien du BRGM et de l'AERM*
Olivier RAZAKARISOA	*IFARE*
Jean RICOUR	*Ancien du BRGM*
Jacques RICOUR	*Ancien du BRGM et d'ANTEA*
Jean-Jacques RISLER	*Ancien du BRGM*
Claude ROY	*Conseil Général de Vendée, Chef du Service de l'eau, ancien Président de l'AHSP*
Bernard SANJUAN	*BRGM Division Géothermie*

1. Situation à la date de la contribution à l'ouvrage

Gerhard SCHÄEFER,	*Université de Strasbourg, ancien Directeur de l'IFARE*
Dominique THIERY	*BRGM Service Eau*
Henri TORRENT	*Ancien du BRGM et d'ANTEA*
Jean-Pierre VANÇON	*Ancien du BRGM SGR Alsace*
Michel VANDENBEUSH	*Ancien du BRGM et d'ANTEA*
Lothaire ZILLIOX	*CNRS e.R., ancien Directeur de l'IMF de Strasbourg et de l'IFARE*

Nous remercions sincèrement tous ces collaborateurs, ainsi que les personnes,les organismes et sociétés ayant communiqué des photos et illustrations, notamment : Ph. Crochet, Ph. Maget, P. Marchet, J. Ricour, J.-C. Soulé, Agences de l'eau, ANDRA, BRGM, BURGÉAP, IFARE, SAGEP, SOGREAH, VÉOLIA Propreté, Ville de Niort, et GEO-HYD pour le traitement des images.

Coordination générale : Jean-Claude ROUX

AVANT-PROPOS

L'histoire de l'hydrogéologie, c'est d'abord un chapitre de l'histoire des sciences de la Terre et des sciences de l'eau très interdépendantes. Mais elle ne peut se séparer de l'histoire des recherches et des exploitations d'eau souterraine, de leurs techniques et de la place de leur utilisation dans l'économie de l'eau, en France comme ailleurs, notamment dans les régions du monde où ont œuvré les experts français, en particulier en Afrique.

Les progrès scientifiques, de concert avec ceux des performances et de la diversification des méthodes d'investigation et de mobilisation des eaux souterraines ont contribué au développement de leur utilisation, en réponse à la croissance des besoins en eau, puis des soucis de leur protection. Ces développements et les nouveaux objectifs de gestion et de préservation des eaux souterraines ont motivé et favorisé les avancées de la recherche…

L'histoire de l'hydrogéologie est aussi celle d'un métier, celle de la profession d'hydrogéologue, à la fois parmi les spécialisations de la " Géologie appliquée " et les spécialités des Techniques de l'eau, ainsi que celle de l'enseignement supérieur consacré à sa formation.

Enfin, l'éclairage historique et l'hommage rendu aux hommes de science et aux ingénieurs français qui ont largement contribué, au cours des siècles, à la création et aux progrès de l'hydrogéologie, dans le territoire français et en bien d'autres, ne doivent absolument pas minimiser le caractère mondial de l'histoire des sciences et techniques, dans ce domaine comme en tous autres, le fait que leurs avancées ont été inséparables des échanges internationaux. C'est bien le cas de l'hydrogéologie dont les progrès ont été largement soutenus par l'Association Internationale des Hydrogéologues, précisément lancée par une initiative française en 1952.

Cet ouvrage dérive d'un premier essai plus condensé, le chapitre " France " de " History of hydrogeology " promu par l'Association Internationale des Hydrogéologues et structurée par pays, présenté à l'assemblée de Lisbonne en septembre 2007, publié en 2012. Il a été enrichi, notamment, par une deuxième partie mettant en valeur l'histoire et les réalisations des principaux organismes publics et privés et par la biographie d'hydrogéologues notoires qui ont marqué et influencé l'évolution de cette discipline, ainsi que par les références bibliographiques essentielles et une abondante illustration.
Bien entendu, cet ouvrage pourra paraître encore incomplet aux lecteurs avertis, mais il aurait été illusoire de vouloir en relater davantage tant l'histoire est riche et les réalisations nombreuses, notamment depuis le milieu du XXe siècle.

A noter que la publication de *Histoire de l'hydrogéologie française* coïncide avec le 40e anniversaire de la création du Comité Français d'Hydrogéologie par Gilbert Castany.

La Source de Nîmes à l'époque romaine

Préludes : des origines au XVIIIe Siècle

Dès l'antiquité, en Gaule comme en bien d'autres régions du monde, l'eau souterraine fut une source d'approvisionnement en eau des cités et des villages très répandue. En sus du captage des sources, l'art de creuser des puits, favorisé par l'étendue des domaines à eau souterraine accessible, était pratiqué, sans besoin de s'interroger sur l'origine des eaux puisées. L'utilisation des eaux de sources auxquelles étaient attribuées des vertus " médicinales ", voire magiques, est aussi très ancienne, le plus souvent prêtées aux " Romains ", mais certainement antérieure.

Les rares esprits savants soucieux d'expliquer la nature, notamment l'origine des sources – des " Fontaines " - se sont fiés longtemps aux conceptions de la plupart des philosophes antiques – Platon, Aristote – qui reliaient l'origine des eaux souterraines continentales à de mystérieuses circulations venues de la mer.

Ces conceptions ne visaient aucunement, de toute façon, à guider l'art des puisatiers.

Les précurseurs aux XVIe et XVIIe siècles

Renouant avec quelques initiateurs de l'Antiquité – du grec Anaxagore (Ve siècle av. J.-C.) au romain Vitruve (Ier siècle av. J.-C.) – ou du Moyen-Âge – les arabes Al Biruni (XIe siècle) et Al Qazwini (XIIe siècle) – plusieurs précurseurs français ont renversé la conception ancienne et compris l'origine des eaux souterraines.

Au XVIe siècle, le premier qui expose une vision juste sur les eaux souterraines est le pasteur et mathématicien Jacques Besson (trop méconnu, seul Martel le cite…) dans son ouvrage sur " *L'art et science de trouver les eaux et les fontaines cachées…* ", paru à Orléans en 1569, qui associe déjà compréhension et application. Il explique, pour la première fois, que " *les eaux vives des fontaines, & des ruisseaux, & lacs, & rivières qui s'ensuivent ont eu leur commencement, & vont continuellement en la mer, sans qu'elle croisse ou diminue, & en reviennent aussi, mais autrement que par soubs terre, à la façon qu'aucuns ont mal pensé* ".

À son tour, Bernard Palissy explique dans ses " *Discours admirables de la nature des eaux et fontaines, tant naturelles qu'artificielles,…* " (1580), savoureux dialogue entre

L'ART ET SCIENCE
DE TROVVER LES EAVX
ET FONTAINES CACHEES SOVBS
terre, autrement que par les moyens vulgaires
des Agriculteurs & Architectes, par Iaques Beſſon Dauphinois, Mathematicien.

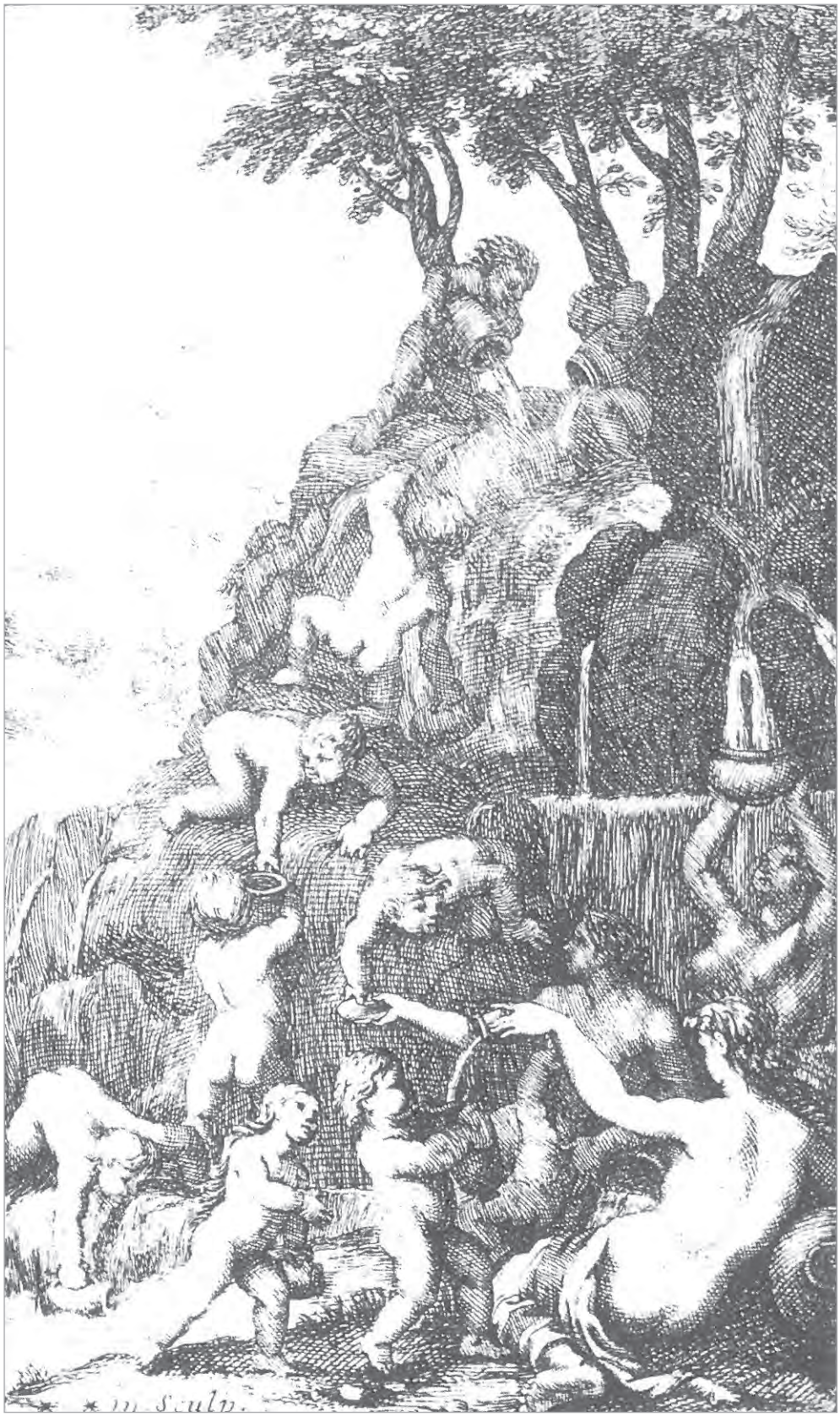
A ORLEANS,
Pour Pierre Trepperel, Libraire, en la rue de l'Eſcriuinerie, deuant la porte du cloiſtre ſaincte Croix.
M. D. LXIX.
Auec priuilege du Roy pour dix ans.
248.115

Art et science de trouver les eaux et les fontaines cachées, par Jacques Besson, 1569

DISCOVRS AD-
MIRABLES, DE LA NA-
TVRE DES EAVX ET FON-
TEINES, TANT NATVRELLES QV'AR-
tificielles, des metaux, des ſels & ſalines, des
pierres, des terres, du feu & des emaux.
AVEC PLVSIEVRS AVTRES EXCEL-
lens ſecrets des choſes naturelles.
PLVS VN TRAITE' DE LA MARNE, FORT
vtile & neceſſaire, pour ceux qui ſe mellent de
l'agriculture.
LE TOVT DRESSE' PAR DIALOGVES, ES-
quels ſont introduits la theorique & la practi-
que.
Par M. BERNARD PALISSY, *inuenteur des ruſtiques figulines du Roy, & de la Royne ſa mere.*
A TRESHAVT, ET TRESPVISSANT
ſieur le ſire Anthoine de Ponts, Cheualier des ordres du Roy, Capitaine des cents gentils-hommes, & conſeiller treſfidele de ſa maieſté.
A PARIS,
Chez Martin le Ieune, à l'enſeigne du Serpent, deuant le college de Cambray.
1580.
AVEC PRIVILEGE DV ROY.

Discours admirable de la nature, des eaux et fontaines, par B. Palissy

Bernard Palissy



Frontispice de l'ouvrage de Pierre Perrault, *De l'origine des fontaines*, Paris, 1674
Bibliothèque de l'ancienne faculté de médecine de Paris

“ *Théorique* ” et “ *Practique* ”, que “ *les eaux des puits sont esgouts continuels des pluyes : Quand j'ay eu bien long temps et de pres consideré la cause des sources des fontaines naturelles, et le lieu de là où elles pouvoyent sortir, en fin j'ai conneu directement qu'elles ne procedoyent et n'estoyent engendrees sinon des pluyes* ”.

Il n'est pas moins clairvoyant sur les relations entre eaux souterraines et eaux superficielles, quand il ajoute : “ *Il y a aussi quelques puits voisins des rivières, desquels l'eau qui y est ne vient que de la rivière circonvoisine* ”.

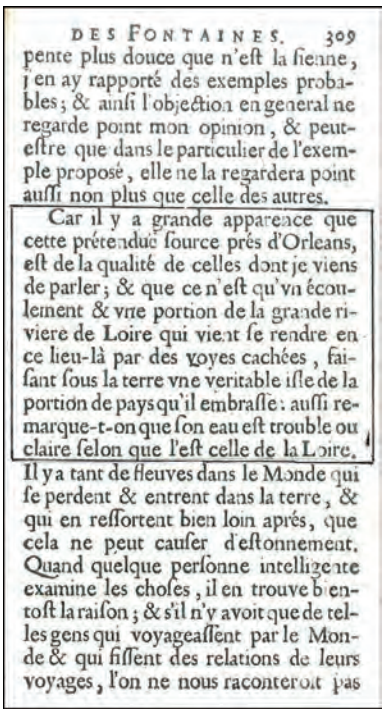
Et il explique aussi la variété des qualités naturelles des eaux souterraines, en attribuant “ *la bonté ou mauvaiseté des eaux provenant des sources naturelles* ” au fait “ *qu'il est impossible que le cours des fontaines puisse passer par les veines de la terre sans mener avec soy quelque espèce de sel, lequel estant dissoult dedans l'eau est inconnu et hors du jugement des hommes : et selon que le sel sera veneneux il rendra l'eau veneneuse* ”.

Bernard Palissy a exposé aussi la première vision juste de la voie atmosphérique qui boucle le cycle de l'eau quand il note que “ *les eaux des pluyes qui tombent en hyver remontent en esté pour retourner encore en hyver, et les eaux et la reverberation du Soleil et la siccité des vents frappans contre terre fait eslever grande quantité d'eau : laquelle estant rassemblée en l'aër et formée en nuées, sont parties d'un costé et d'autre… Et les vents poussant lesdites vapeurs, les eaux retombent par toutes les parties de la terre… et lesdites vapeurs sont converties en pluyes qui tombent sur la terre* ”.

Bernard Palissy fut aussi, on le sait moins, un praticien, puisqu'il réalisa, à la demande de Catherine de Médicis, vers 1566-67, le captage de sources à Saint-Cloud et l'aqueduc conduisant leur eau jusqu'aux Tuileries (via Boulogne et Auteuil), aqueduc construit en tuyaux de poterie émaillée, débitant 534 m³/j selon le calcul de Belgrand.

Au XVIIe siècle, c'est le Père jésuite Jean François qui précise à son tour, dans “ *La Science des eaux* ” (Rennes 1655) que “ *Toutes les eaux ont pour principe l'eau de pluye qui estant tombée dans la terre se fait eau de puits, en sortant devient fontaine…* ” (citation par P. Perrault). Il expose même un premier rudiment d'hydrogéologie en distinguant trois types de “ terres aquifères ” dans le sol : “ *sablonneuses, qui ne retiennent pas l'eau, argileuses ou de corroy, comme les avares la retiennent, les troisièmes sont spongieuses ou poreuses qui comme libérales en retiennent une partie et laissent couler l'autre* ”.

Ensuite Pierre Perrault, dans “ *L'origine des fontaines* ” (1674), est le véritable fondateur de l'hydrologie quantitative en établissant le premier bilan d'un bassin versant : le haut bassin de la Seine, pour les années 1668-1670, démontrant qu'il pleuvait assez pour expliquer l'écoulement des rivières (6 fois le débit de ce bassin…).



DES FONTAINES. 309

pente plus douce que n'eſt la ſienne, j'en ay rapporté des exemples probables; & ainſi l'objection en general ne regarde point mon opinion, & peut-eſtre que dans le particulier de l'exemple propoſé, elle ne la regardera point auſſi non plus que celle des autres.

Car il y a grande apparence que cette prétenduë ſource près d'Orleans, eſt de la qualité de celles dont je viens de parler; & que ce n'eſt qu'vn écoulement & vne portion de la grande riviere de Loire qui vient ſe rendre en ce lieu-là par des voyes cachées, faiſant ſous la terre vne veritable iſle de la portion de pays qu'il embraſſe: auſſi remarque-t-on que ſon eau eſt trouble ou claire ſelon que l'eſt celle de la Loire.

Il y a tant de fleuves dans le Monde qui ſe perdent & entrent dans la terre, & qui en reſſortent bien loin aprés, que cela ne peut cauſer d'eſtonnement. Quand quelque perſonne intelligente examine les choſes, il en trouve bientoſt la raiſon; & s'il n'y avoit que de telles gens qui voyageaſſent par le Monde & qui fiſſent des relations de leurs voyages, l'on ne nous raconteroit pas

La Source du Loiret (extrait de *L'origine des sources et fontaines*, par P. Perrault, 1674)

Les “ comptes ” de PERRAULT :

Sur un bassin de 6 lieues carrées de superficie, valant 31 245 144 toises [118,5 km²], tombent en une année 19 pouces 1/3 de pluies [485 mm] donnant 224 899 942 muids d'eau [57,5.10⁶ m³/an) ; la Seine débite pendant ce temps 36 453 600 muids [9,3.10⁶ m³/an], soit 16 % des pluies, 78 mm/an ou 23 l/s par km², l'évapotranspiration réelle étant de 407 mm.

Philippe de la Hire

En 1703, Philippe De La Hire, dans son mémoire à l'Académie des Sciences, fait aussi le lien entre l'eau de pluie et le débit des fontaines.
Quelques années plus tard, le physicien Edme Mariotte (“ *Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides* ” 1686) calcule à son tour le bilan d'un bassin, cette fois le

bassin de la Seine à Paris (estimé à 3000 lieues carrées) et il vérifie que le volume annuel des pluies, estimé à 714 150 millions de pieds cubes (d'après une hauteur moyenne de 15 pouces par an) est plus de six fois supérieur au volume écoulé annuel, chiffré à 105 120 pieds cubes. Il appuie par ailleurs les vues de Bernard Palissy sur l'origine pluviale des eaux souterraines, par l'observation des infiltrations reçues dans les carrières souterraines.

Cependant, ni Perrault ni Mariotte ne se sont préoccupés d'estimer la part d'écoulement d'eau souterraine dans ces bilans. Perrault restait même dubitatif sur la participation directe des précipitations à l'alimentation des eaux souterraines qu'il imputait plutôt aux pertes de rivières, en se basant sur des cas réels observés, mais particuliers, comme la relation entre les pertes de la Loire, en amont d'Orléans et les résurgences du Loiret, citée dans " *L'origine des Fontaines* ". Perrault écrit : " *Mon opinion est donc que les eaux des pluyes & des neiges qui tombent sur la Terre, sont la cause & l'origine des Fontaines… Néanmoins de la façon que je conçoy la chose, il y a une différence extrême entre ma pensée & celle de ceux qui suivent ce sentiment ordinaire. Car ils croyent que les eaux des pluyes & des neiges fondues tombant sur la Terre, la pénètrent jusques à ce qu'elles ayent rencontré de la terre grasse ou autre chose qui les arreste ; surquoy elles coulent vers quelque ouverture sur le penchant d'une montagne ; & moy je crois que la pluye ne penetre point la Terre ni ne descend point jusques sur cette terre grasse… Ils croyent aussi que ce sont les fontaines qui estant assemblées font les rivières, & que s'il n'y avoit point de fontaines il n'y aurait point de rivières ; & moy je croy que ce sont les rivieres qui font les fontaines, & que s'il n'y avoit point de rivieres il n'y auroit point de fontaines.* " Et Perrault précise : " *Après de grandes et longues pluies, je n'ai jamais trouvé la terre mouillée plus avant qu'un pied et demi ou deux pieds* ".

Malgré tout, l'observation et même la mesure ont commencé à prendre le pas sur l'imagination, et c'est l'apport majeur de cette époque.

La Source du Loiret (gravure du 19e s.)

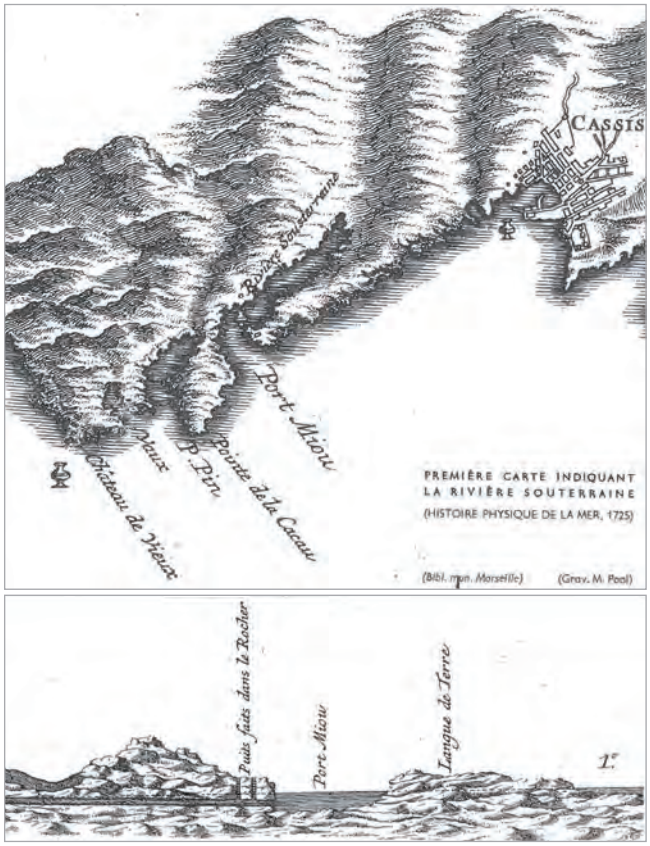
XVIIIe siècle

Comte de Marsili

C'est au début de ce siècle que, pour la première fois, un regard scientifique est porté sur une " rivière souterraine " : en 1706 le comte Louis Ferdinand de Marsili, académicien, examine et explique la source littorale et sous-marine de la calanque de Port-Miou, près de Cassis, et en publie le schéma dans l'" *Histoire physique de la mer* " (1725), premier essai de compréhension des circulations karstiques en zone littorale.

Pourtant, plus généralement, au " siècle des lumières " aucun éclairage nouveau n'est porté sur les eaux souterraines, dont l'origine reste sujette à controverse ; les avancées des siècles précédents n'ont pas convaincu tout le monde " savant ".

Les ouvrages de vulgarisation, par exemple " *Le spectacle de la Nature ou Entretiens sur les particularités de l'Histoire naturelle, qui ont paru les plus propres à rendre les Jeunes-Gens curieux, à leur former l'esprit* " (1752), et jusqu'à l'" *Encyclopédie* " dirigée par Diderot et d'Alembert (à partir de 1751), dont l'article " *Fontaine* ", rédigé par Desmarest,



Carte de situation et coupe de la rivière de Port Miou
Comte de Marsili, 1725

s'étend longuement sur le sujet en 74 pages, doivent toujours s'attacher à démonter la théorie de l'origine marine des eaux souterraines, couverte par l'autorité de Descartes, en insistant sur le mystère du dessalement… Si l'origine pluviale est plus généralement admise (par exemple par Alexis Clairaut, collaborateur de Buffon, qui démontre, en 1743, que " *le cycle de l'eau ne peut être qu'atmosphérique* ", l'infiltration directe des précipitations est encore souvent mise en doute en faveur d'apports des rivières comme le pensait déjà Perrault. Avec Buffon (" *Histoire naturelle* ", 1749) l'Académie affirme que l'eau ne pénètre pas la terre à plus de 4 pieds… Par contre, La Metherie (1791) détaille avec justesse les modalités de l'infiltration, de l'évaporation et du ruissellement.

Si les conceptions novatrices des précurseurs des XVIe et XVIIe siècles ont été une contribution majeure, elles ne se sont pourtant pas accompagnées d'une compréhension du comportement et des modes de circulation des eaux souterraines, restés obscurs et voués encore à des visions opposant les concepts de " conduits " et de " lacs souterrains ".

Pour Silberschlag (" *Théorie des fleuves avec l'art de bâtir dans leurs eaux et de prévenir leurs ravages* ", 1769) " *chaque rivière est un grand lac qui s'étend sous terre au loin* ". Ce qui fut traduit par le terme de " nappe " introduit pour la première fois en 1783 dans le " *Cours complet d'agriculture* " de Rozier.

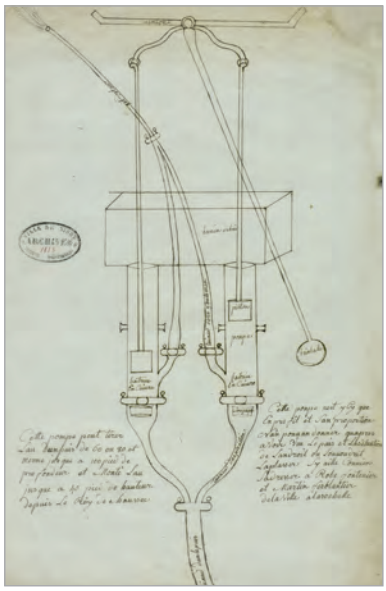
L'illustration de l'article " *Fontaine* " de l'Encyclopédie (vers 1760)[1] reflète ces conceptions, en conjuguant réservoirs et conduits, avec même des siphons, qui anticipent les connaissances sur la circulation karstique.

L'art de découvrir des " sources ", c'est-à-dire des écoulements souterrains accessibles et captables, n'en est pas moins pratiqué par des prédécesseurs de Paramelle. Celui-ci ne cite-t-il pas la " *découverte des sources de Coulange-la-Vineuse, de Courson et d'Auxerre, en Bourgogne* " en 1705, par l'ingénieur et académicien Couplet, célébré par Fontenelle.

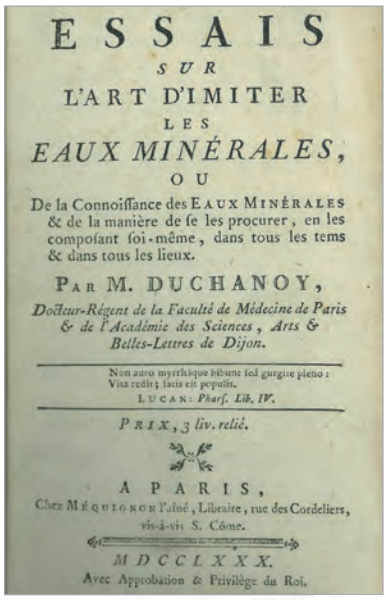
Pour conclure ce prélude, on peut remarquer que durant des siècles, l'art de prospection et de captage des eaux souterraines, pratiqué par les puisatiers et fontainiers, et transmis entre générations sans évolution notable, n'a eu aucun lien avec les interrogations et les conceptions sur l'origine et le comportement des eaux souterraines.
En fait, malgré les avancées remarquables survenues aux XVIe et XVIIe siècles, le débat entre théories de l'origine marine ou de l'origine pluviale des eaux souterraines s'est perpétué jusqu'au XIXe siècle, en s'appuyant inégalement sur les observations et les expériences.

1. Reproduite dans le " Dictionnaire raisonné de physique " de Brisson (cité par A. Guillerme in *Les temps de l'eau*, 1983).

Plan de la source du Vivier alimentant la ville de Niort. *Ville de Niort*

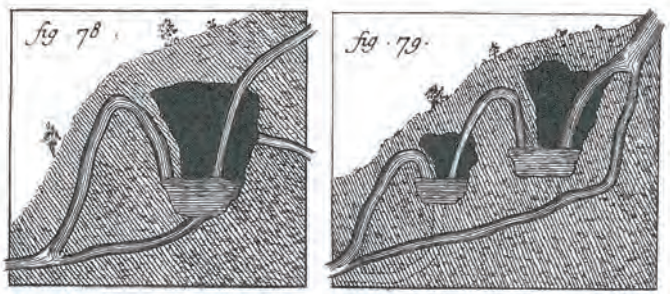


Pompe hydraulique alimentant la ville de Niort. *Ville de Niort*



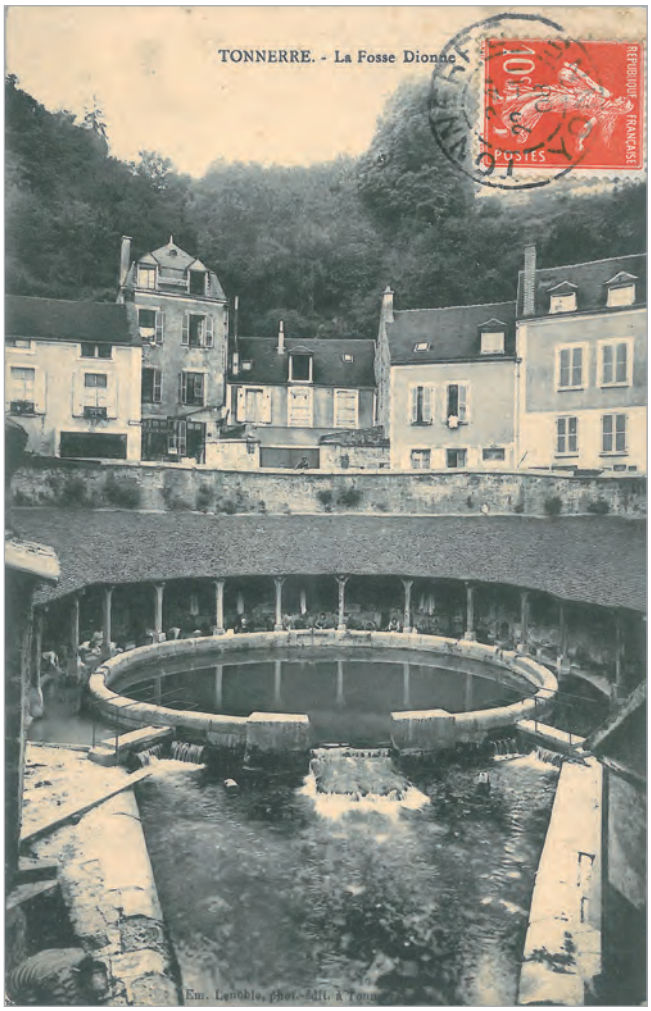
ESSAIS
SUR
L'ART D'IMITER
LES
EAUX MINÉRALES,
OU
De la Connoissance des EAUX MINÉRALES & de la manière de se les procurer, en les composant soi-même, dans tous les tems & dans tous les lieux.
PAR M. DUCHANOY,
Docteur-Régent de la Faculté de Médecine de Paris & de l'Académie des Sciences, Arts & Belles-Lettres de Dijon.
Non auro myrrhâque bibunt sed gurgite pleno : Vita redit; satis est populis.
LUCAN: Phars. Lib. IV.
PRIX, 3 liv. relié.
A PARIS,
Chez MÉQUIGNON l'aîné, Libraire, rue des Cordeliers, vis-à-vis S. Côme.
MDCCLXXX.
Avec Approbation & Privilège du Roi.

Essais sur l'art d'imiter les eaux minérales, par M. Duchanoy (19e s)



Principe de fonctionnement des sources intermittentes, *Encyclopédia universalis de Diderot* (planches «Physique»)

Source de la Fosse Dionne - Tonnerre (Yonne). *J.-C. Roux*



Le lavoir de la Fosse Dionne vers 1900

XIXe siècle : d'un acte de naissance aux fondements d'une science exacte et naturelle

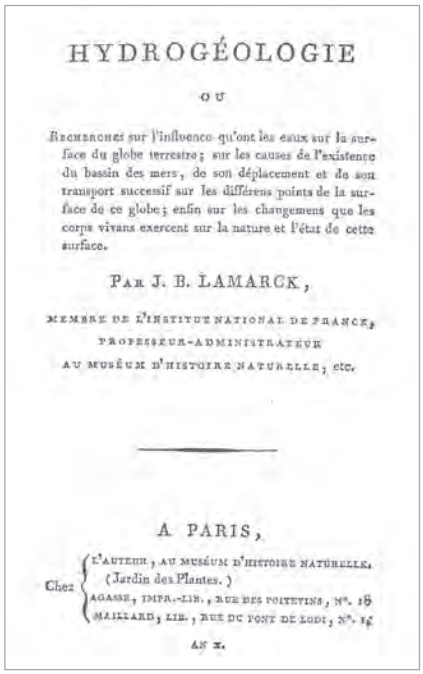
En créant le mot " *hydrogéologie* " en 1802, J.-B. Lamarck lui donnait le sens de " Recherches sur l'influence qu'ont les eaux sur la surface du globe terrestre… ", sens différent il est vrai de l'actuel mais qui n'anticipait pas moins les fondements de la " Science des eaux souterraines " qu'il désigna ensuite en se généralisant dans toutes les langues.

C'est au XIXe siècle que la science des eaux souterraines et l'art de les capter se fondent en France sur la mécanique du mouvement des eaux en milieu poreux et s'enracinent dans les sciences de la Terre en plein essor, à mesure des progrès de la connaissance et de la cartographie géologique du territoire français, sous l'impulsion du Corps des Mines.

Dès ses débuts la science des eaux souterraines mixe les concepts et les méthodes des sciences exactes et des sciences naturelles, de l'hydraulique et des sciences de la Terre, de même que son développement va associer intimement connaissance et application : compréhension des phénomènes propres à la genèse et à la circulation des eaux dans le sous-sol et guide de leur prospection et de leur captage, en mariant le savoir et l'art des ingénieurs avec l'esprit d'observation, de déduction et d'expérimentation des géologues naturalistes.

La cure à Vittel (peinture de Léonce Petit, 1878)

Statue de J.-B. Lamarck (Jardin des Plantes, Paris)



HYDROGÉOLOGIE

OU

Recherches sur l'influence qu'ont les eaux sur la surface du globe terrestre; sur les causes de l'existence du bassin des mers, de son déplacement et de son transport successif sur les différens points de la surface de ce globe; enfin sur les changemens que les corps vivans exercent sur la nature et l'état de cette surface.

PAR J. B. LAMARCK,

MEMBRE DE L'INSTITUT NATIONAL DE FRANCE,
PROFESSEUR-ADMINISTRATEUR
AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE; etc.

A PARIS,

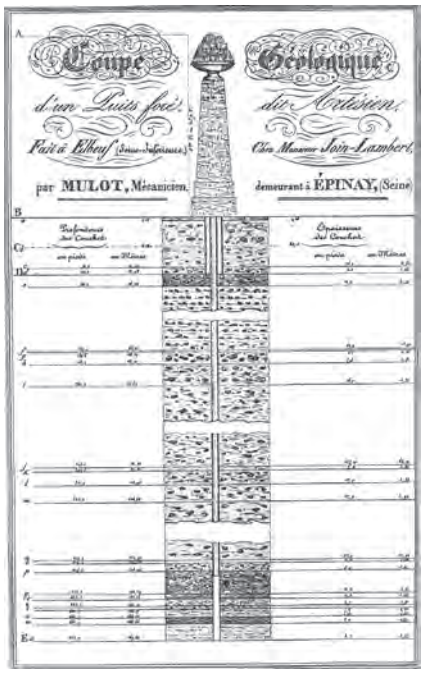
Chez { L'AUTEUR, AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, (Jardin des Plantes.)
AGASSE, IMPR.-LIB., RUE DES POITEVINS, N°. 18
MAILLARD, LIB., RUE DU PONT DE LODI, N°. 14

AN X.

Hydrogéologie, par J.-B. Lamarck

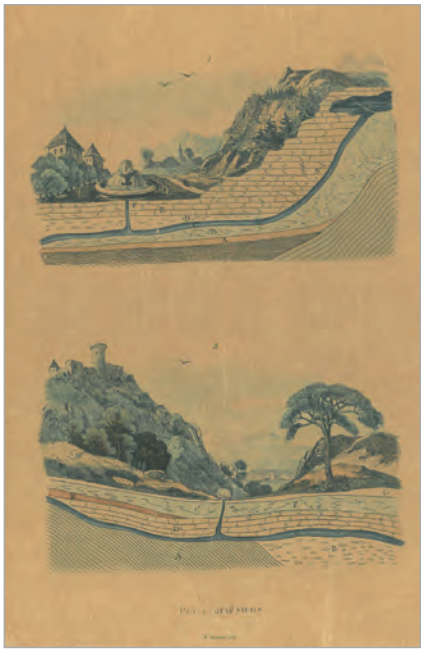
Les ingénieurs prennent les devants

Les premiers théoriciens et praticiens de l'hydrogéologie en France furent d'abord des ingénieurs, polytechniciens pour la plupart et versés en hydraulique, qui visaient des objectifs pratiques d'alimentation urbaine en eau potable (Paris, Dijon…) et même déjà de préservation de qualité des eaux souterraines, tout en appuyant leur démarche sur une théorie générale : Héricart de Thury, F. Arago, E. Belgrand, J. Dupuit puis H. Darcy. Ils inaugurèrent une lecture et une conversion " hydrauliciennes " des premières descriptions géologiques des formations de subsurface et profondes, notamment dans les grands bassins sédimentaires. Les premières observations du régime des nappes souterraines ont été engagées et les facteurs de leur dynamique ont été compris. Dès 1842, par exemple, l'ingénieur Dausse faisait remarquer l'inefficacité des pluies d'été pour l'alimentation des nappes.



Coupe géologique d'un forage à l'Albien à Elbeuf (Seine-Maritime)

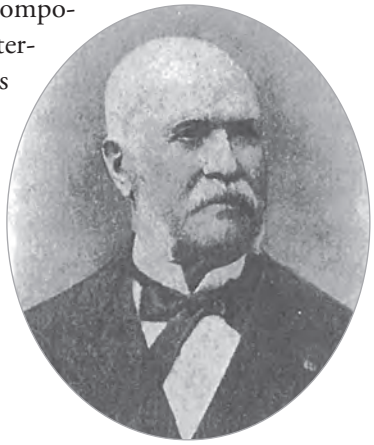
Arago, alors qu'il était en poste à l'hôpital de Lille, observa des variations du niveau hydrostatique du puits de l'hôpital qu'il attribua aux marées terrestres.



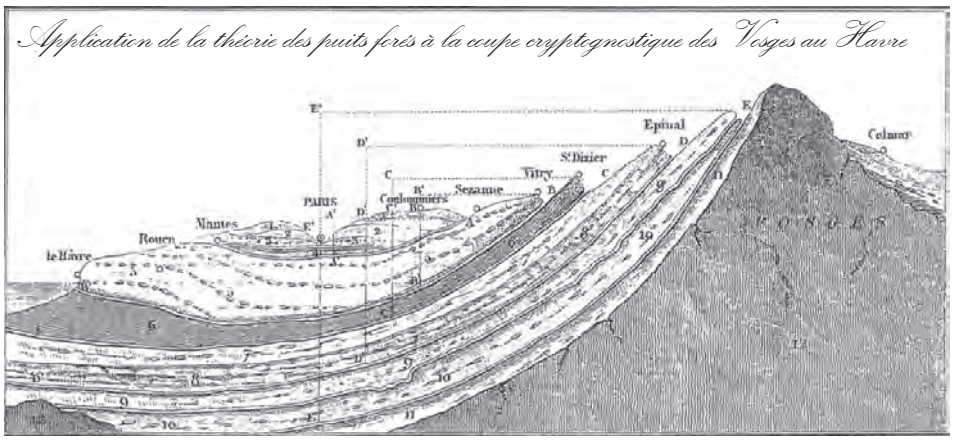
Représentation traditionnelle des puits artésiens dans un ouvrage du milieu du 19e s.

L'acte fondateur majeur est l'expérimentation par Henry Darcy, en 1856, sur l'écoulement d'eau à travers le sable, dont l'expression de la relation linéaire entre le flux et le gradient de charge, dénommée " Loi de Darcy " par J. Dupuit en 1857, est devenue un pilier de l'hydrogéologie quantitative ou hydraulique souterraine (cf. encadré).

E. Belgrand étudia aussi, le premier, les relations entre la composition des eaux souterraines et la nature des terrains traversés, prémices d'hydrogéochimie relancées par Ed. Imbeaux, polytechnicien et médecin, à partir de 1897.



Eugène Belgrand



Artésianisme - Théorie d'Héricart de Thury (1829)

La Loi de DARCY

Henry Darcy, Polytechnicien, ingénieur des Ponts et Chaussées, est né à Dijon en 1803.
Tout d'abord, en 1840, il fut un précurseur de l'alimentation en eau potable urbaine en France en concevant et en dirigeant les travaux de dérivation de la Source du Rosoir dans le Val Suzon à l'Est de Dijon, au moyen d'un aqueduc de 12 kilomètres aboutissant au réservoir de la Porte Guillaume à l'entrée de Dijon.
Au plan international, Darcy est surtout connu pour la loi qu'il a établie sur les écoulements dans les milieux poreux ; car en 1856, dans son ouvrage " Les fontaines publiques de la ville de Dijon ", il fut le premier à proposer une loi sur l'hydrodynamique des écoulements dans les milieux poreux, appliquée aujourd'hui par les hydrogéologues et hydrauliciens du monde entier.
En fait, ces travaux avaient pour objectif de calculer le " filtrage des eaux " destinées à la distribution publique.
Ses expériences furent réalisées en 1854/1856 dans la cour de l'hôpital de Dijon où il avait installé une colonne de 2,50 m de hauteur et 0,35 m de diamètre, laquelle était emplie de " sables de Saône " supportée par une toile métallique à mailles de 2 mm disposée à 0,20 m au-dessus du fond.
Il pouvait faire varier la grosseur des sables et la hauteur d'eau (pression).
H. Darcy arrive à une équation qui exprime le débit en fonction de la porosité.
Il écrivait : " *Ainsi, en appelant e l'épaisseur de la couche de sable, sa superficie, P la pression atmosphérique, h la hauteur de l'eau sur cette couche, on aura P + h pour la pression à laquelle sera soumise la base supérieure ; soient, de plus, P ± h, la pression supportée par la surface inférieure, k un coefficient dépendant de la perméabilité de la couche, q le volume débité*, on a :

$$q = h \frac{s}{e} (h + e \pm h_0) \text{ qui se réduit à } q = \frac{s}{e} (h + e)$$

Au cours du temps, la formulation a évolué pour s'écrire plus simplement :

$$V = K.i$$

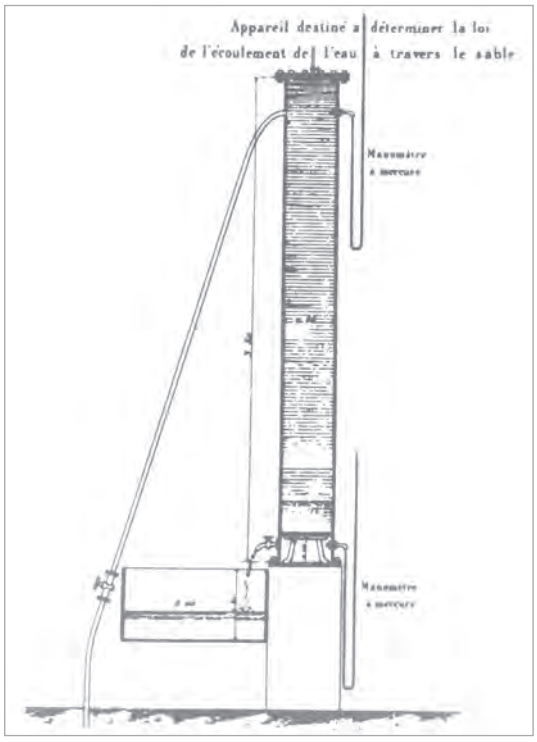
V = vitesse de déplacement du fluide
K = coefficient de perméabilité
i = gradient

À partir des résultats expérimentaux, H. Darcy conclut " *Il paraît donc que pour un sable de même nature, on peut admettre que le volume débité est proportionnel à la charge et en raison inverse, de l'épaisseur de la couche traversée* ".
Ce n'est que plus tard que Dupuit applique cette formule à l'écoulement dans les aquifères.
Elle s'applique également de façon très générale à l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux (huile ou gaz) et ce sont les " pétroliers " qui ont donné le nom de Darcy au coefficient de perméabilité intrinsèque, transmuté en " Darce " pour être cohérent avec le système SI (Norme AFNOR).

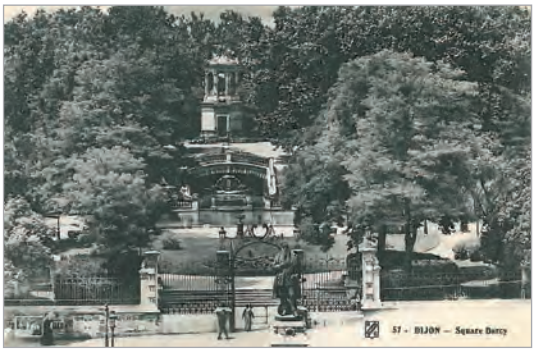
Henry Darcy - 1803 - 1858

Henry Darcy (1857)

Médaille Darcy
(1803 - 1858)

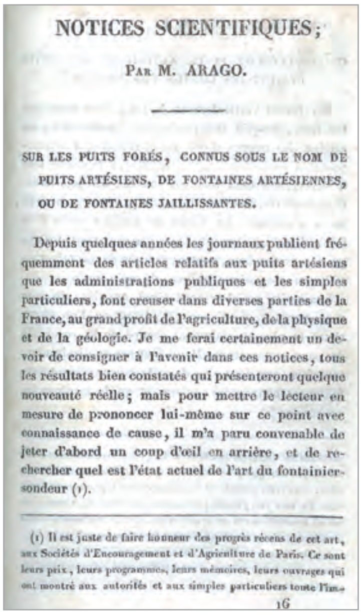


Colonne expérimentale de Darcy



Le square Darcy à Dijon vers 1910

Comètes - Lune - Puits - Petites machines



NOTICES SCIENTIFIQUES;

PAR M. ARAGO.

SUR LES PUITS FORÉS, CONNUS SOUS LE NOM DE PUITS ARTÉSIENS, DE FONTAINES ARTÉSIENNES, OU DE FONTAINES JAILLISSANTES.

Depuis quelques années les journaux publient fréquemment des articles relatifs aux puits artésiens que les administrations publiques et les simples particuliers, font creuser dans diverses parties de la France, au grand profit de l'agriculture, de la physique et de la géologie. Je me ferai certainement un devoir de consigner à l'avenir dans ces notices, tous les résultats bien constatés qui présenteront quelque nouveauté réelle; mais pour mettre le lecteur en mesure de prononcer lui-même sur ce point avec connaissance de cause, il m'a paru convenable de jeter d'abord un coup d'œil en arrière, et de rechercher quel est l'état actuel de l'art du fontainier-sondeur (1).

(1) Il est juste de faire honneur des progrès récens de cet art, aux Sociétés d'Encouragement et d'Agriculture de Paris. Ce sont leurs prix, leurs programmes, leurs mémoires, leurs ouvrages qui ont montré aux autorités et aux simples particuliers toute l'im-

16

Notes scientifiques d'Arago sur les «puits artésiens»

François Arago (1786 - 1853)

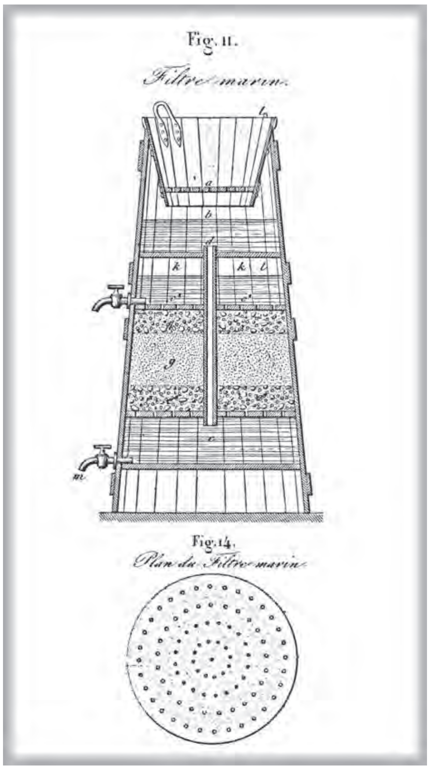
Les puits artésiens

Une tradition, toutefois non attestée avant le XIXe siècle, attribue à l'Artois, province du Nord de la France, le rôle éponyme de la dénomination des puits qui font jaillir l'eau d'une nappe souterraine captive. La mention la plus ancienne trouvée est celle de F. Garnier :

> “ *Les premières recherches sur les fontaines jaillissantes paraissent avoir été entreprises dans l'étendue de terrain que comprend le département du Pas-de-Calais, composé de l'ancienne province d'Artois, du Boulonnais, du Calaisis, de l'Ardrésis et d'une très petite portion de la Picardie. Au moins, cette opinion est générale, et ce qui paraît la confirmer, c'est la dénomination de puits artésiens donnée aux fontaines du même genre établies dans d'autres pays.* ”
>
> (“ *De l'art du fontenier-sondeur et des puits artésiens* ”, 1821)

F. Arago écrit à son tour, en 1834, que “ *le plus ancien puits artésien connu est, dit-on de 1126. Il existe à Lilliers, en Artois* ”…
Mais il s'agissait alors de puits peu profonds, à coffrage de bois, exploitant la frange captive de l'aquifère de la craie.
Le qualificatif *artésien* désignait à la fois la méthode et la mise à profit de la pression de l'eau souterraine, épargnant l'effort de puisage ou de pompage, et les conditions hydrodynamiques qui le rendait possible, d'où les expressions de nappe et source artésienne, puis de bassin artésien, universalisées ensuite en nombreuses langues et différents pays, dont le Great Artesian Basin d'Australie est le plus célèbre.

C'est seulement au XIXe siècle que des puits artésiens profonds ont été réalisés en France. Le plus célèbre fut le “ Puits de Grenelle ”, projeté par F. Arago, foré à Paris de 1833 à 1841, à une profondeur de 548 mètres, pour atteindre la nappe des Sables Verts, dont l'eau jaillit initialement à 33 m au-dessus du sol, avec un débit de 160 m^3/h.



Colonne expérimentale de Dupuit

Jules Dupuit

DE L'ART
DU
FONTENIER SONDEUR
ET DES PUITS ARTÉSIENS,
OU

MÉMOIRE SUR LES DIFFÉRENTES ESPÈCES DE TERRAINS DANS LESQUELS ON DOIT RECHERCHER DES EAUX SOUTERRAINES, ET SUR LES MOYENS QU'IL FAUT EMPLOYER POUR RAMENER UNE PARTIE DE CES EAUX A LA SURFACE DU SOL, A L'AIDE DE LA SONDE DU MINEUR OU DU FONTENIER,

PAR F. GARNIER,

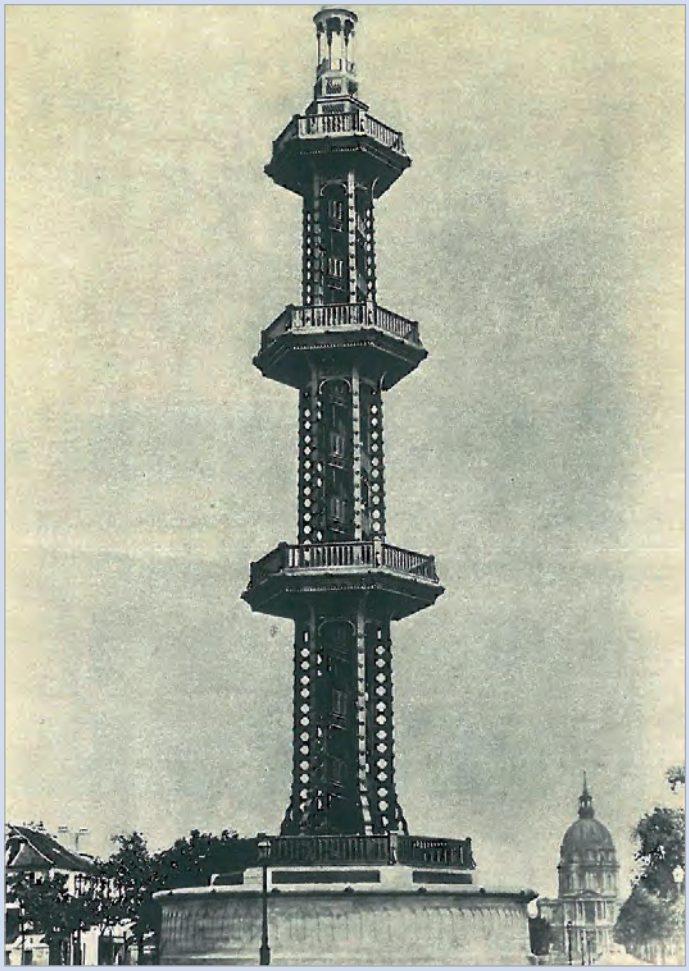
Ingénieur au corps royal des mines, ancien élève de l'École polytechnique.

(Ce Mémoire, imprimé par ordre du gouvernement, a été couronné par la Société d'Encouragement de Paris dans sa séance générale du 3 octobre 1821.)

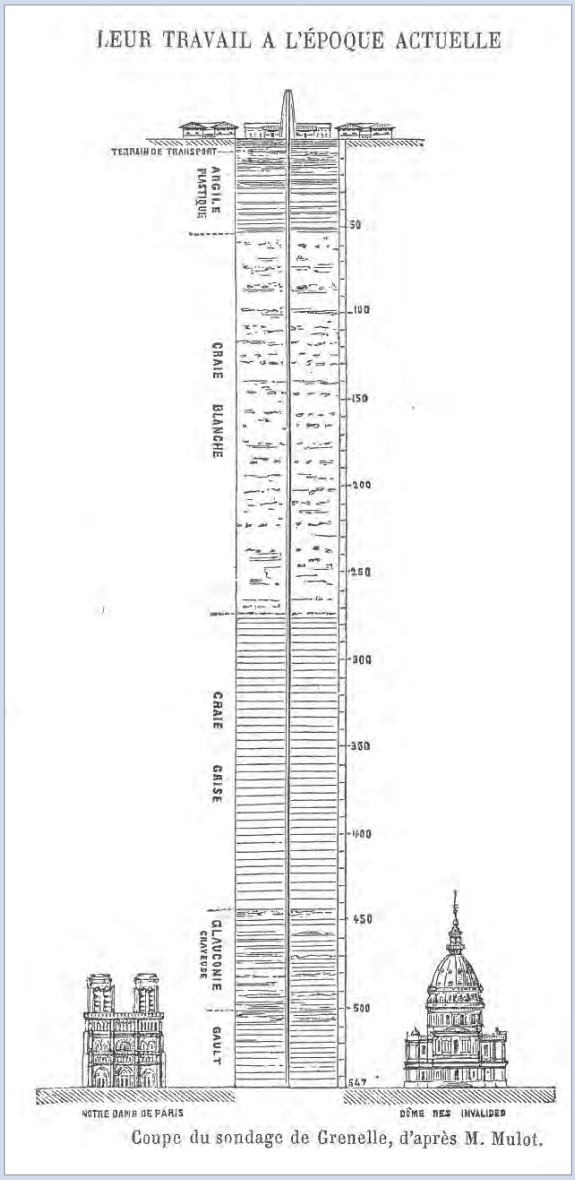
A PARIS,
DE L'IMPRIMERIE DE MADAME HUZARD,
(Née Vallat la Chapelle),
Rue de l'Éperon Saint-André-des-Arts, n°. 7.
1822.

De l'Art du Fontenier sondeur et des puits artésiens, par F. Garnier, 1822

Le puits artésien de Grenelle

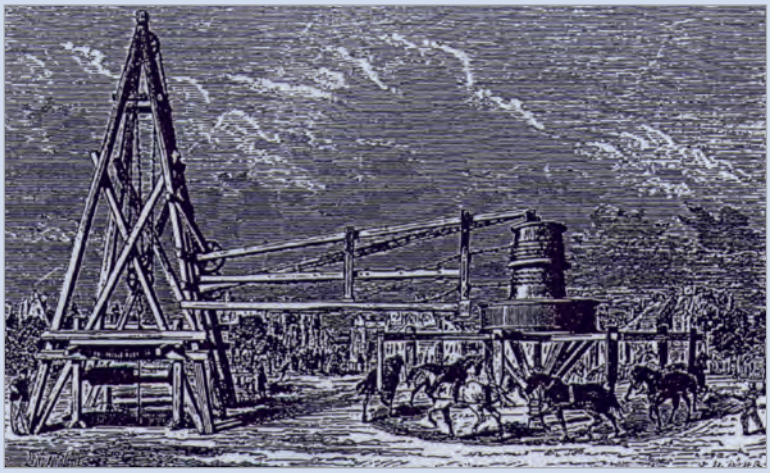


Puits artésien de Grenelle vers 1865



Coupe géologique du puits de Grenelle, d'après Mulot

Louis Georges Mulot. Sculpture de Paul Waast
(Place G. Mulot, Paris 15e)



Creusement du puits de Grenelle, avec un manège à chevaux

Les géologues entrent dans le jeu

Assez tôt au XIXe siècle des naturalistes " amateurs " et cultivés, sachant marier l'observation et la déduction, se préoccupent de rationaliser la prospection des eaux souterraines et l'implantation des puits. L'un des plus actifs et renommés fut, à partir de 1827, l'abbé Jean-Baptiste Paramelle, dont il n'est pas indifférent de remarquer, avec J. Tixeront (1956), que l'ouvrage sur " *L'art de découvrir les sources* " fut publié la même année que le mémoire de H. Darcy (1856). Le grand naturaliste E. Geoffroy Saint-Hilaire soulignait, dans un Mémoire à l'Académie des Sciences en 1836, que l'habileté de l' " *hydroscope du département du Lot* " reposait bien " sur la science et l'observation ".

Dans la seconde moitié du siècle, de grands géologues universitaires jettent les bases de l'interprétation des conditions géologiques, lithostratigraphiques et structurales, sur la constitution et le fonctionnement des aquifères.
Ce sont les sujets des premiers ouvrages magistraux de J. Gosselet (1886-88), de A. Daubrée (1887), qui introduit le concept de " surface piézométrique ", de A. de Lapparent (1882-98). La cartographie hydrogéologique est inventée : les " cartes hydrologiques de la Ville de Paris, puis du Département de la Seine " par Achille Delesse (1861, 1862) sont une première mondiale, qui inaugure la représentation des courbes de niveau " piézométrique ".

L'Abbé Paramelle

Jules Gosselet

Gabriel Auguste Daubrée

Carte hydrologique du département de la Seine par Delesse, 1862

Des captages des sources aux forages profonds

Si l'art de capter l'eau des sources et de la conduire par gravité aux cités a en France une large antériorité – les aqueducs romains de Lyon, Nîmes (Pont du Gard), de Lutèce… en témoignent –, il connaît au XIXe siècle un regain de réalisation, avec de nombreux captages de sources, têtes de nouvelles adductions d'eau urbaines, comme ceux pour Dijon, œuvre encore de H. Darcy (1840) et surtout ceux pour Paris, sous l'impulsion de E. Belgrand, du second Empire aux débuts de la IIIe République : Dhuis (1863-1865), Vanne (1867-1874), Avre (1891-1893) (cf. encadré p. 25).

Aqueduc de Lutèce, dit d'Arcueil-Cachan, et bassin romain de Wissous, tête de l'aqueduc

E. Imbeaux développe, en 1898, le système de galeries drainantes de la forêt de Haye pour rénover la desserte en eau de Nancy, afin de lutter contre les épidémies de typhoïdes intervenues à la fin du XVIIIe siècle.

L'exploitation par puits peu profond de l'eau souterraine de sub-surface – la " nappe des puits " que A. Daubrée proposa en 1887 de qualifier plus savamment de " phréatique " - a une grande ancienneté. Mais c'est au XIXe siècle que les performances de foration à des profondeurs croissantes, guidées par des prévisions géologiques fiables, ont permis de prospecter et d'exploiter l'eau d'aquifères profonds des grands bassins sédimentaires : de Paris, du Nord, d'Aquitaine. Ces techniques sont exposées et codifiées très tôt par des ouvrages technologiques précis : F. Garnier (1821), Héricart de Thury (1829). Les résultats les plus spectaculaires sont les premiers grands puits artésiens à Tours, à Lille, puis Paris (cf. encadré p. 25).

Le pont du Gard. *BRGM im@gé*

Citation de A. Daubrée

" Cette nappe, presque superficielle, a reçu différents noms vulgaires : on l'appelle chez nous nappe des puits, nappe d'infiltration ; en Allemagne, grund-wasser ; en Angleterre, groundwater ; en Italie, acqua di suolo, acqua di livello. Une dénomination empruntée à la langue grecque, par conséquent cosmopolite, est préférable : celle de phréatique exprime bien sa relation avec les puits ordinaires. "

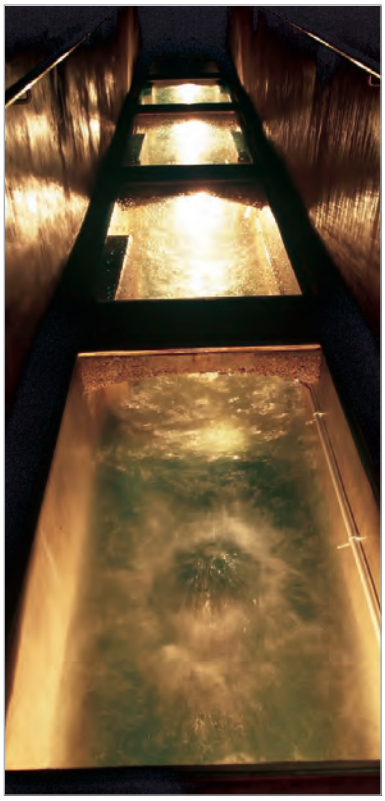
Les eaux souterraines – Revue des deux mondes (1887)

L'idée d'utiliser les aquifères non seulement pour y puiser de l'eau mais aussi pour leur faire absorber des eaux usées est aussi très ancienne : dès 1833 un rapport du Conseil de Salubrité au Préfet de Police de la Seine proposait d'utiliser des " *puits forés ou artésiens* " pour " *l'évacuation des eaux sales ou infectes* " dans la région de Saint-Denis et de Bondy, en région parisienne (Annales d'Hygiène publique, t.X.2, 1833).

Aqueduc Médicis, regard de l'Observatoire (Paris 14e) : départ des aqueducs du Palais Royal, du Val de Grâce et des fontaines de la Montagne Sainte-Geneviève

À part ces découvertes des aquifères profonds, l'exploitation des eaux souterraines en France reste modérée et peu croissante durant le XIXe siècle. Cependant, certains industriels se préoccupent de leur ressource en eau ; les premiers relevés de niveaux piézométriques remontent à 1870 (Sucrerie de Toury - Eure-et-Loir), puis dans des puits de la craie et du Calcaire carbonifère dans le Nord et dans les puits des gares des Chemins de Fer du Nord.

C'est sans doute l'exhaure des mines (charbon dans le Nord, fer en Lorraine…), en plein développement, qui motive les plus fortes extractions d'eau souterraine.



La source de Joie à Nemours (Essonne) *SAGEP*

Premières spécialisations

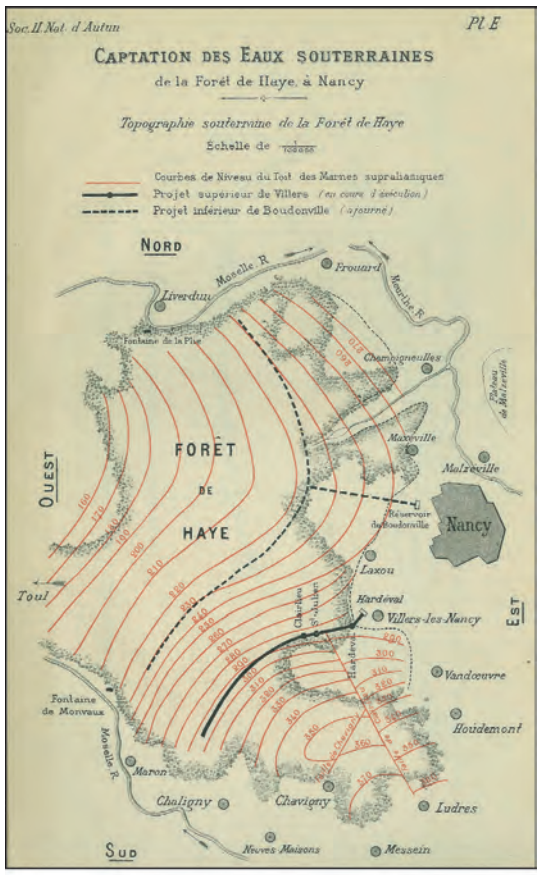
C'est encore à la fin de ce siècle que des recherches plus spécialisées ont pris leur essor, telles que l'exploration et l'étude des domaines karstiques (E.A. Martel, 1894, premiers fondements de la spéléologie) ou l'étude scientifique des sources thermo-minérales, restée surtout l'apanage d'ingénieurs des mines (L. De Launay, 1899). La compréhension du rôle métallogénique et " minéralisateur " des eaux souterraines est aussi amorcée (A. Daubrée, 1888).

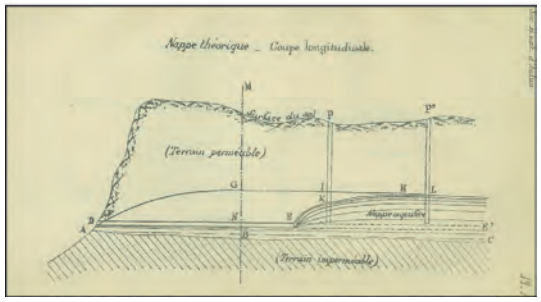
En fait le progrès des connaissances générales qui a fondé la science des eaux souterraines en France fut indissociable de l'avancement des investigations régionales et locales et du développement des exploitations d'eau souterraine. À la fin du XIXe siècle les grandes lignes des conditions hydrogéologiques du territoire français étaient comprises.

Citation de A. Daubrée

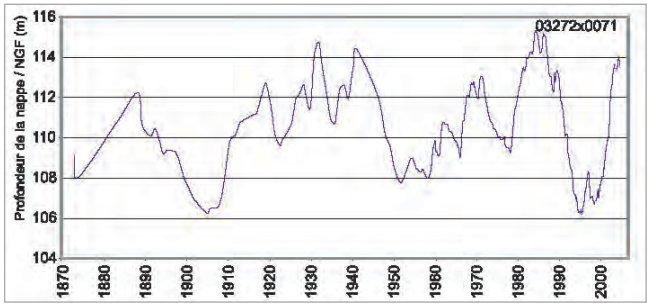
De même que, dans notre organisme, toutes les parties du corps doivent leur développement aux apports qu'elles reçoivent de la circulation du sang, dans l'écorce du globe terrestre, l'eau, par son incessante circulation souterraine et par un travail surtout chimique, accomplit une sorte d'action vitale qui s'est perpétuée à travers les âges. Ne peut-on pas appliquer justement à ces effets minéralogiques et géologiques, si dignes de notre curiosité et dérivant d'une cause unique, l'épigraphe choisie par Leibniz : In varietate unitas ?

Les eaux souterraines (F. Alcan, 1888)





Galeries captantes de la forêt de Haye, construites par E. Imbeaux et F. Villain entre 1898 et 1932, pour l'alimentation de Nancy



Chronique piézométrique de la nappe du calcaire de Beauce à Toury (Eure-et-Loir) depuis 1870. *BRGM*

Les grands travaux d'alimentation en eau de Paris

Depuis la création de Lutèce, le puisage de l'eau se faisait directement en Seine, ou par de nombreux puits dans les alluvions. Ces ressources ont toujours présenté des problèmes de qualité du fait des pollutions provenant de l'augmentation de l'habitat et du manque d'hygiène, cause de nombreuses épidémies.

La première réalisation remarquable a été la construction de l'aqueduc d'Arcueil par les Romains, sur ordre de l'empereur Julien. Les eaux captées à 66 km au Sud de Paris, dans les Calcaires de Brie, étaient acheminées à Lutèce pour alimenter les thermes de Cluny.

Au XIIe siècle, sous Philippe Auguste, les religieux de Saint-Lazare, puis ceux de Saint-Martin captent par aqueduc des sources à Belleville. En 1624, sous les ordres de Catherine de Médicis, l'aqueduc d'Arcueil est doublé pour alimenter le palais du Luxembourg.

Mais, c'est au XIXe siècle que les plus grands travaux d'adduction sont réalisés. Napoléon Bonaparte et son ministre Chaptal lancent le premier projet d'adduction d'eau public de Paris consistant à dériver une partie de la rivière Ourcq, dont l'eau est propre et limpide par rapport à celle de la Seine déjà polluée, et de l'amener par un canal de 108 km à Paris (canal de l'Ourcq) et de construire également pour la première fois des réservoirs.

Commencé en 1802, il amène l'eau au bassin de La Villette mais il faut attendre le Second Empire pour que soient terminés les réservoirs et la première desserte des châteaux d'eau. Entre temps, l'eau est polluée car la navigation y avait été permise.

En 1841, sous Louis Philippe, une nouvelle solution apparaît avec le succès du forage artésien de Grenelle captant les Sables verts de l'Albien à 548 mètres de profondeur et fournissant un débit artésien de 1 100 m^3/jour.

Plusieurs autres forages furent exécutés par la suite dans la capitale, mais à chaque nouvel ouvrage, l'artésianisme diminuait, démontrant que les forages à l'Albien ne pouvaient résoudre le problème de l'alimentation en eau de Paris.

Au Second Empire, le Baron Haussmann, préfet de la Seine, rénove entièrement la capitale et confie à Belgrand, ingénieur des Ponts et Chaussées, qui est géologue, un nouveau projet d'aménagement. Dès son approbation en 1854 par le Conseil Municipal, Belgrand lance des recherches dans une large zone située à l'amont de la capitale, l'idée étant de capter des sources importantes à une altitude permettant de les amener à Paris par écoulement gravitaire. Après le suivi du débit et de la qualité des sources durant plusieurs années, des travaux très importants sont réalisés pendant deux décennies. À la mort de Belgrand, en 1878, plusieurs captages étaient réalisés :

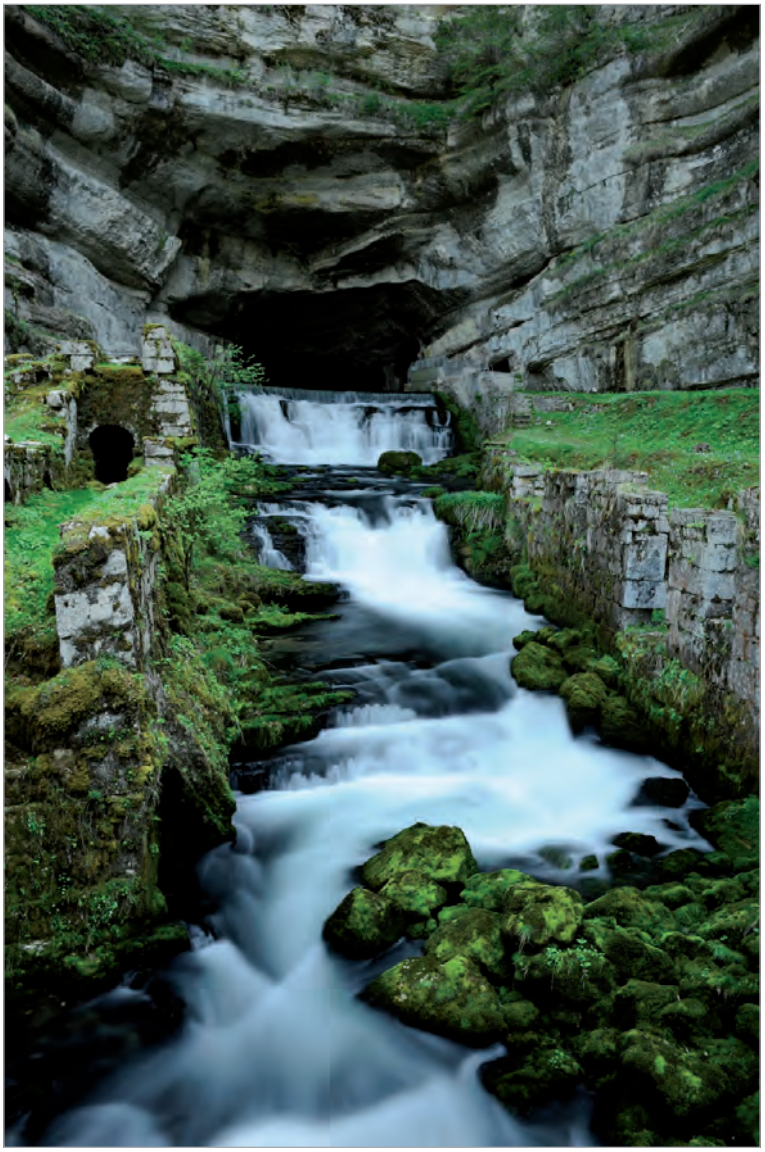
- sources de la Dhuys (Calcaire de Champigny) en 1865 (près de Château-Thierry) avec un aqueduc de 130 km,
- sources de la Vanne (Craie du Sénonais) en 1874 (aqueduc de 173 km).

Après Belgrand, le programme est poursuivi par le captage d'autres sources : Cochepie (groupe de la Vanne) en 1885 (aqueduc de 102 km), du Loing et du Lunain (Calcaires de Champigny) en 1900.

Au XXe siècle, de nouvelles ressources seront nécessaires : captage des sources de Provins (Voulzie, Durdent, Dragon en 1925) et forages des Vals d'Yonne, en 1936 et des Vals de Seine en 1956 (alluvions sur Craie), puis des usines de traitement d'eau de la Seine et de la Marne.

De nos jours, Paris utilise 550 000 m^3 d'eau potable par jour dont encore la moitié d'eau de source.

Siphon de l'aqueduc de la Vanne à Villemarche (Yonne). *SAGEP*



Source de la Loue (Jura). *Ph. Crochet / BRGM Im@gé*

XXe siècle : de 1900 à la seconde guerre mondiale

Les deux courants fondés au XIXe siècle se poursuivent durant la première moitié du XXe siècle :

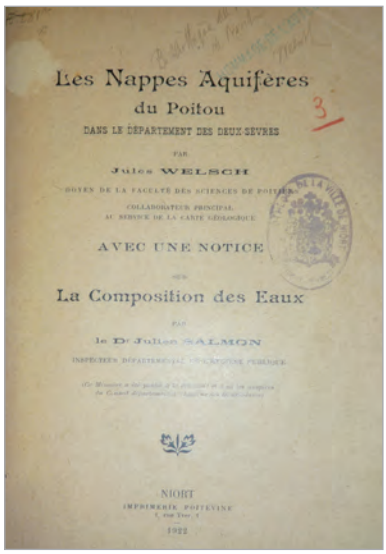
D'une part de nouvelles avancées perfectionnent l'hydraulique souterraine. Edmond Maillet (1902) formule la loi de tarissement des sources à laquelle son nom est attaché et les travaux de Joseph Boussinesq " *Sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources* " (1904) vont contribuer à clarifier les relations entre les eaux souterraines et superficielles. Puis une première méthode pour calculer les caractéristiques d'un aquifère par un test de pompage en régime transitoire est mise au point par Marcel Porchet en 1923. A. Vibert développe à son tour la dynamique des nappes souterraines et des captages (1937-1949).

D'autre part les investigations hydrogéologiques s'étendent à tout le territoire français. Une pléiade de géologues explore, décrit et explique les conditions hydrogéologiques de la plupart des régions françaises. Citons parmi les plus actifs : J. Gosselet et L. Dollé (qui soutient en 1923 la première thèse sur un sujet d'hydrogéologie régionale) dans le Nord, R. Abrard et F. Dienert dans le bassin de Paris, A. Bigot et G.F. Dollfus en Normandie, J. Welsh dans le Poitou, L. Armand et Ph. Glangeaud dans le Massif central (plus particulièrement sur les sources thermales et minérales), E.A. Martel, E. Fournier et B. Gèze sur les régions karstiques des Alpes, du Jura, des Pyrénées et des Causses, L. Guillaume dans l'Est de la France, sur le Trias, où il contribua notamment à l'alimentation en eau potable des forts de la ligne Maginot.

La mise en valeur des ressources minières - fer et charbon - de l'Est et du Nord de la France aux XIXe et XXe siècles a conduit à mettre en place des exhaures importantes, à telle enseigne que certaines de ces mines auraient pu être qualifiées de " mines " d'eau avant que d'être considérées comme des exploitations minières (un ratio de plus de 10 m^3 d'eau/tonne de minerai sera ainsi atteint dans certaines mines de fer de Lorraine dans les années 1980).

Cette contrainte d'exploitation a largement concouru au progrès des connaissances sur les eaux souterraines et en hydrogéologie, dans les régions françaises concernées, comme en d'autres régions minières du monde.

Hydrologie souterraine du Poitou calcaire,
par Julien Salmon (1912)



La composition des eaux des nappes aquifères des Deux-Sèvres
par Jules Welsch (1922)

Médaille de Jules Gosselet (1910) *Société des sciences, de l'agriculture, et des arts de Lille*

Nancy Thermal - Parc Sainte-Marie vers 1920

Perte en Loire à Lantigny-Bou (Loiret). *Ph. Boismoreau, 2005*

Source du Loiret (Le Bouillon). *J.-C. Roux, 2008*

J. Gosselet, pharmacien d'origine, P. Pruvost, géologue, G. Waterlot, géologue, et A. Bonte, ingénieur IDN pour le bassin du Nord de la France, R. Nicklés, ingénieur des mines, L. Guillaume, ingénieur des mines et P. Maubeuge, géologue pour la Lorraine, ont contribué à asseoir les connaissances hydrogéologiques en s'appuyant, dans un premier temps, sur des campagnes de sondages miniers. En effet, ces éléments ont permis de définir précisément la géométrie des réservoirs aquifères.
Accessoirement, les recherches minières portant sur le charbon au début du XXe siècle ont conduit à découvrir et à développer de nouvelles ressources en eau souterraine des grès vosgiens triasiques, comme à Nancy Thermal ou des Calcaires du Dogger captif sous la plaine de la Woëvre en Meuse.

À la suite des campagnes de E.-A. Martel (1901), traduites par la première loi créant les périmètres de protection des captages de sources pour l'alimentation en eau potable, des études hydrogéologiques locales sont aussi réalisées dès le début du siècle (1902). Elles s'appuient déjà sur les méthodes de traçage pour identifier les aires d'alimentation de sources. Par exemple en 1901, F. Marboutin démontre la liaison entre les pertes de la Loire, dans le Val d'Orléans, et la source du Loiret, ce qu'avait déjà pressenti Pierre Perrault au 17e siècle ; dès 1902 E. Fournier entreprend une série de traçages dans le Jura à la suite de la découverte inopinée, en août 1901, de la liaison entre le Doubs et la source de la Loue à l'occasion du déversement des cuves d'absinthe dans le Doubs pendant l'incendie des Usines Pernod de Pontarlier.

Les premiers inventaires

L'avancement des recherches permet à Edouard Imbeaux de présenter dès 1909, à la Société géologique de France, un premier tableau synthétique des " nappes aquifères de France " et, plus tard, de publier le premier ensemble de monographies hydrogéologiques régionales de la France, suivant un plan stratigraphique, dans son " *Essai d'hydrogéologie* ", en 1930.

En 1930, un certificat d'études supérieures " Hydrogéologie, Hygiène de l'eau et du sol " valable pour le diplôme de Licencié ès Sciences, est créé à la Faculté des Sciences de Lille par L. Dollé.

En 1933, A. Bonte dresse la première carte piézométrique de la nappe de la Craie dans la partie nord-ouest du département de la Somme.

En 1939, la publication de P. Lemoine, R. Humery et R. Soyer sur " *Les forages profonds du bassin de Paris* " est un modèle d'inventaire méthodique qui préfigure les futures bases de données sur le sous-sol.

L'appel de l'Afrique

Les regards des chercheurs français en hydrogéologie s'étendent aussi déjà au-delà de la Métropole : ils sont amorcés particulièrement en Afrique du Nord : d'abord en Tunisie où le Bureau d'Inventaire des ressources hydrauliques (BIRH) créé en 1930, voué en priorité à la recherche et au développement des eaux souterraines, est la première institution spécialisée qui fera école, avec les travaux de J. Archambault, E. Berkaloff, G. Castany, M. Gosselin, H. Schoeller, M. Solignac, J. Tixeront. Les premières cartes hydrogéologiques détaillées, à 1/50 000, sont levées et publiées. Dès 1947, une monographie générale (" *Hydrogéologie tunisienne* ") est réalisée par Jean Archambault. Puis d'autres, en Algérie et au Maroc, dès avant ou pendant la 2e guerre mondiale, notamment au Sahara, avec P. Bellair, M. Samsoen, J. Savornin.

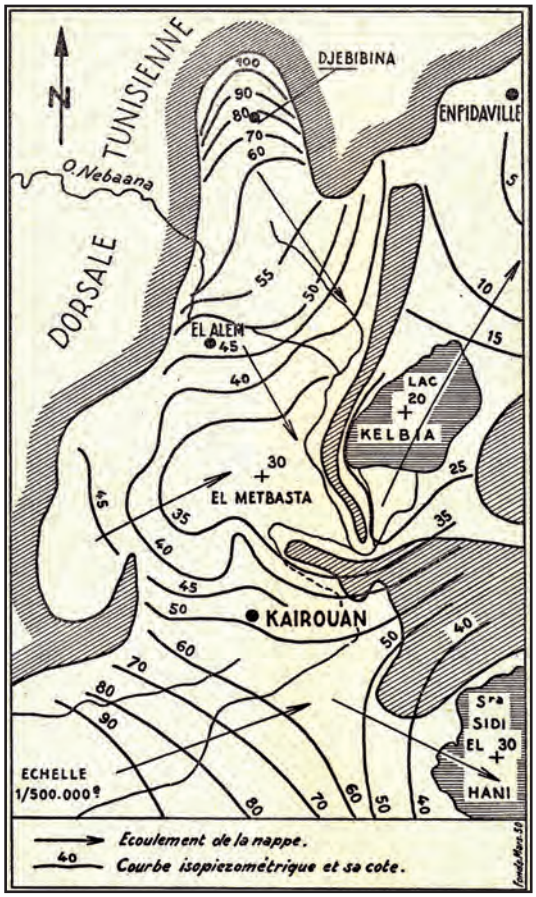
Au Maroc, le Comité d'Études des Eaux Souterraines créé en 1931 a aussi eu un rôle promoteur et plusieurs Missions Hydrogéologiques ont engagé les premières investigations dans ce pays.

Une citation d'Henri Schoeller *:*
On conçoit donc qu'une des tâches les plus essentielles du Service hydraulique de la Direction des Travaux publics, soit de prospecter les ressources hydrauliques de la Tunisie et d'en dresser un inventaire aussi complet que possible.
Cette tâche a été entreprise dès le début du Protectorat, mais on s'était borné, jusqu'à une date récente, à faire un recensement des points d'eau existants et à exécuter quelques forages de reconnaissance pour la recherche des nappes artésiennes. Aucune étude hydrogéologique sérieuse n'avait été entreprise, et les documents recueillis ne pouvaient donner aucune idée même sommaire des ressources hydrauliques encore inconnues.
Depuis 1930, cette prospection a été reprise sur des bases entièrement nouvelles ; elle consiste en une étude hydrogéologique détaillée, permettant de connaître autant qu'il est possible les réserves d'eau du sous-sol, leur régime d'écoulement et d'alimentation.
Notice générale de la Carte hydrogéologique de la Tunisie (1939)

C'est dans les années 50 que les études hydrogéologiques appuyées par les explorations pétrolières au Sahara algérien, principalement par J. Savornin et André Cornet, jusqu' en 1961, s'appliquent à l'immense nappe profonde artésienne du " Continental intercalaire " connue depuis longtemps seulement sur ses bordures, avec les premiers forages profonds : Zelfana (1949), Ouargla (1956) qui révèlent des pressions record au sol, approchant 30 bars ! Son exploitation contribue notamment à alimenter en eau les premiers chantiers d'exploitation pétrolière (Hassi-Messaoud).

E. Berkaloff (à gauche) et G. Castany, à Orléans vers 1967. *BRGM*

Puits d'irrigation à D'lou en Tunisie. *J.-C. Roux, 1973*



Carte en courbes isopiézométriques de la nappe du Djebibana-Kairouan. *G. Castany, 1949*

Norbert Casteret

Forau des Aigualluts (Espagne). *A. Mangin*

Goueil de Joueou (Espagne). *A. Mangin*

Traçage des pertes du Bandiat à Feuillade, Karst de la Rochefoucault (Charente), Oct. 2008. *EDREE*

Préleveur automatique. *HYDRO-INVEST*

Naissance des traçages et de la géochimie des eaux

À cette époque les investigations restent individuelles – à l'instar du lever des cartes géologiques, qu'elles accompagnent souvent –, et les méthodes sont essentiellement celles des observations du terrain, appuyées par les données de forage, complétées par l'hydrométrie des sources, par des analyses d'eau, par des traçages, notamment en domaine karstique, méthodes lancées dès le début du siècle par F. Marboutin, E. Fournier, F. Dienert, en liaison avec les explorations spéléologiques. En effet, depuis les expériences de Félix Marboutin et de Eugène Fournier, les expériences de traçage se multiplient dans de nombreux aquifères fissurés. Par exemple, en 1931, Norbert Casteret met en évidence l'origine de la source de la Garonne, le Goueil de Jouéou, par le traçage des pertes au Forau-des-Aigualluts dit " Trou du Toro " sur l'autre versant des Pyrénées, au pied des massifs de l'Aneto et de la Maladetta.

Il s'agit alors simplement de traçages qualitatifs à la fluorescéine. Ce n'est que plusieurs décennies plus tard que les méthodes se perfectionnent avec les multitraçages quantitatifs utilisant simultanément plusieurs traceurs différents, des préleveurs automatiques et des analyseurs performants en laboratoire.

Par ailleurs, dès les années 30, Henri Schoeller jette les bases de la géochimie des eaux souterraines, en Aquitaine et au Maghreb, puis de la thermique des eaux souterraines.

Développement de l'exploitation des eaux souterraines, premier cri d'alarme et première réglementation

En parallèle au progrès des connaissances et de manière interactive, l'exploitation des eaux souterraines prend de l'ampleur, tout particulièrement celle des nappes souterraines profondes " artésiennes " découvertes au XIXe siècle dans les bassins de Paris et d'Aquitaine, comme dans le Nord (Calcaire carbonifère), ainsi qu'au Sahara algérien (nappe artésienne du " Continental intercalaire " dite de l'Albien, et nappe du " Continental terminal ").

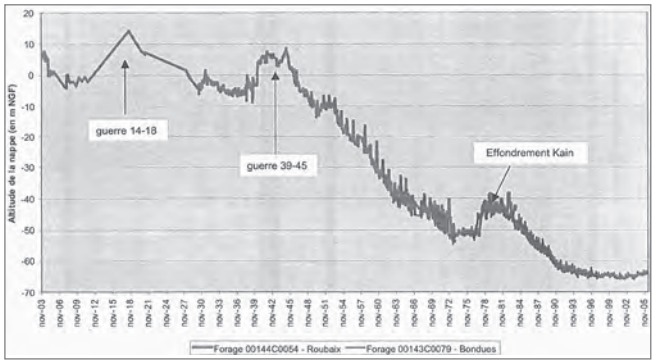
Les forages profonds se multiplient. En région parisienne, aux 4 puits artésiens exploitant la nappe des Sables verts, réalisés avant 1900, s'ajoute une quarantaine de forages dont les productions initiales totalisent 8 000 m^3/h (mais déclinent assez vite…).
Globalement, en France, les prélèvements dans les aquifères profonds passent de 2 à 10 m^3/s au cours de la première moitié du XXe siècle. Au Sahara algérien, l'exploitation de la nappe du Continental terminal double entre 1900 et 1930, en atteignant 6 m^3/s dans l'Oued Rhir.

Dans l'ensemble des aquifères sahariens (Algérie et Tunisie) les prélèvements progressent de 284 hm³/an en 1900 à 557 hm³/an en 1950.

L'aquifère des Sables verts, au cœur du bassin de Paris, est particulièrement touché. Les prélèvements y atteignent en 1935 un maximum de 34 hm³/an. C'est le constat des baisses de pression alarmantes – et pourtant normales – dans cet aquifère et des réductions de production en conséquence qui a motivé la première réglementation publique conservatoire relative aux eaux souterraines en France : le décret-loi de 1935 " *sur la protection des eaux souterraines* " appliqué en Région parisienne (et étendu plus tard à d'autres départements). Il s'agissait en fait de l'instauration d'un " permis de forer " (au-delà de 80 m de profondeur) plutôt que d'une autorisation de prélever… Néanmoins il n'est pas sans intérêt de rappeler l'exposé des motifs de cet acte politique majeur :

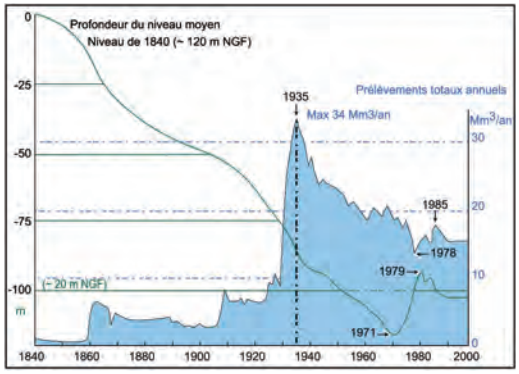
" Cette question, imparfaitement réglée par les articles 552 et 641 du code civil qui font dépendre, par droit d'accession, l'usage des eaux souterraines de la propriété du sol, est restée longtemps à l'état théorique. Mais des circonstances récentes, à savoir les nouveaux développements de la technique et l'augmentation considérable qui en a été la conséquence (du nombre des forages à grande profondeur établis sans aucune règle), ont fait apparaître la nécessité d'une réglementation analogue à celle qui existe pour les eaux superficielles et, depuis plus d'un siècle, pour les mines. Il s'agit d'empêcher, principalement dans la région parisienne, où la question se pose d'une manière plus pressante qu'ailleurs, un véritable gaspillage à la fois quantitatif par l'épuisement de nappes souterraines profondes, et qualitatif, par l'utilisation peu satisfaisante de ces eaux et qui risque, à très bref délai, de compromettre gravement la conservation d'une richesse des plus précieuses et qu'il importe de sauvegarder ".
(JO du 8 août 1935)

L'évolution des niveaux dynamiques de nappes profondes exploitées se trouve être un fidèle enregistrement du développement industriel et de ses ruptures provoquées par les guerres : ainsi les deux guerres mondiales ont marqué visiblement les chroniques de niveaux des aquifères profonds du Nord et de la Région parisienne.



Chronique piézométrique de la nappe du Calcaire carbonifère à Roubaix (Nord). *BRGM*

Forage à l'Albien (1929)



Évolution des prélèvements et de la piézométrie de la nappe de l'Albien dans la région parisienne. *J. Lauverjat*

Forage à l'Albien à la Butte aux cailles (Paris 13e) en 1999. *COFOR*

Protection des captages d'eau potable

L'idée de protéger la qualité de la ressource au droit des captages d'eau potable naît également à l'aube du XXe siècle. En effet, dès le début du siècle, la garantie d'une eau potable par la mise en œuvre de mesures préventives autour des points de captages d'eau est une préoccupation importante.

Le 10 décembre 1900, une instruction du Président du Conseil aux Préfets stipulait que l'appréciation de la salubrité d'une eau destinée à l'alimentation publique, outre l'analyse chimique et bactériologique, devait s'appuyer sur la géologie des terrains traversés par l'eau, et recommandait de recueillir l'avis d'un géologue collaborateur du Service de la carte géologique de France.

La fonction de " géologue officiel " était née (cf. encadré p. 58).

Dans la loi du 15 février 1902, la notion de périmètres de protection de captage de sources pour l'alimentation publique apparaît officiellement en France, motivée par de graves épidémies d'origine hydrique, dues notamment à l'utilisation de sources vauclusiennes, et s'appuyant sur les travaux de Fournier et de Martel.
Cette loi oblige déjà les propriétaires de certains points de prélèvement à acquérir en pleine propriété les terrains sur lesquels sont implantés les ouvrages et permet à l'administration d'y interdire des activités à risque.

La circulaire du 2 février 1924 étend la notion de périmètre de protection à tous les types de captages d'eau souterraine, et donne au géologue des instructions précises pour l'étude des projets d'alimentation en eau destinée à la consommation humaine, en prévoyant la constitution facultative d'un périmètre de protection immédiate (défense du captage) et d'un périmètre de protection générale couvrant tout ou partie du bassin d'alimentation.

Ces dispositions sont encore renforcées dans le décret-loi de 1935, qui rend obligatoire l'institution de périmètres de protection pour tout nouveau captage, quelle que soit l'origine de l'eau.

Captage de la nappe de la Craie par galerie drainante, source de la Vigne, Rueil-la-Gadelière (Eure-et-Loir). *SAGEP*

Histoire de quelques mots savants

Aquifère
Terme ayant eu originellement un sens médical et biologique (" conducteur d'eau ") utilisé par J.-B. Lamarck en 1809 (Philosophie zoologique).
Premier emploi dans le sens relatif aux eaux souterraines attesté par F. Arago en 1834 (" nappe aquifère " ou " couche aquifère "), ainsi que son emploi comme substantif, selon le Robert.

Aquiclude
Terme anglais créé par O. Meinzer en 1923, francisé par H. Schoeller, 1962.

Hydrogéologie
Terme créé par J.-B. Lamarck (1802).

Phréatique
Terme créé par A. Daubrée en 1887 pour désigner la " nappe des puits ".

Piézomètre, Piézométrique
Termes employés par A. Daubrée, 1887.

Hydroisohypse
Terme créé par H. Schoeller (1962) dans le sens de courbe de niveau d'une surface libre, à substituer à " courbe piézométrique " ou " isopièze ".

Drainance
Dérivé de " drainer " créé par H. Schoeller en 1959 pour traduire le terme anglais " leakage " (Jacob & Hantush).

De la fin de la seconde guerre mondiale aux années 1960 : organisation, structuration, formation professionnelle

La période comprise entre la fin des années 40 et le début des années 60 est marquée par plusieurs événements qui vont avoir une influence déterminante sur le développement d'une hydrogéologie professionnelle en France.

Prise de conscience des enjeux liés à l'eau, structuration et recensement de l'exploitation

La prise de conscience de l'importance des problèmes de l'eau et des eaux souterraines en particulier, pousse à créer un enseignement structuré : après celui mis en place dès 1945 à l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, des enseignements de 3e cycle spécialisés en hydrogéologie ont été créés en 1958 dans les universités de Bordeaux (H. Schoeller), Montpellier (J. Avias) et de Paris (L. Glangeaud et G. Castany). Les premiers hydrogéologues professionnels obtenaient ainsi leurs diplômes dès 1946 de l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, et à partir de 1959, des universités. Plus tard, au début des années 1960, les premières thèses de doctorat de 3e cycle en hydrogéologie sont soutenues.

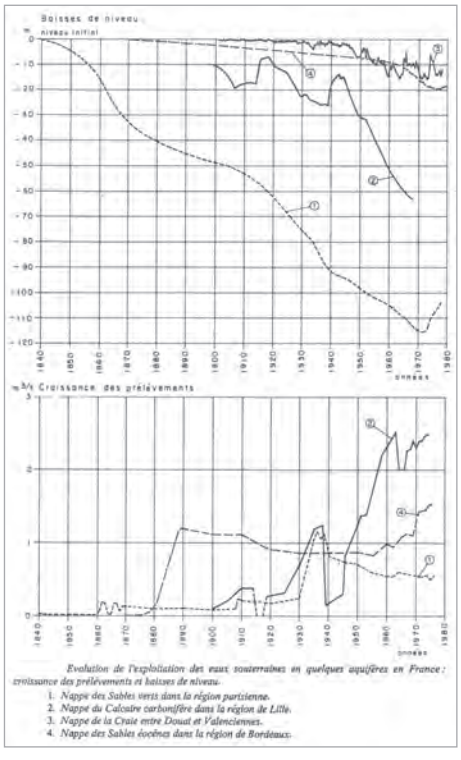
Le développement d'adductions d'eau dans la période de l'après-guerre a nécessité la réalisation de nouveaux puits et forages en grand nombre. Beaucoup d'entre eux se substituent aux traditionnels captages de sources. À l'époque, ces ouvrages étaient encore implantés par des géologues universitaires.

Dès 1947, en fondant le BURGEAP, Jean Archambault concrétise le premier retour d'expérience de l'expertise hydrogéologique française au Maghreb, notamment en Tunisie.

En 1955, l'intervention de Pierre Lafitte et de Jean Ricour au congrès du Centenaire de la Société de l'Industrie Minérale eut un retentissement important dans le domaine de l'eau. Il en a résulté, en 1956, un article intitulé " La recherche minérale la plus importante de la France métropolitaine : l'eau - rôle de l'hydrogéologue ", publié dans la revue de l'Industrie Minérale. Il met en évidence l'augmentation des besoins en eau dans les grandes régions industrielles, la méconnaissance des problèmes de l'eau, l'insuffisance des investissements, en concluant sur le rôle indispensable de l'hydrogéologue dans la recherche d'eau et pour la protection des nappes d'eau souterraine.

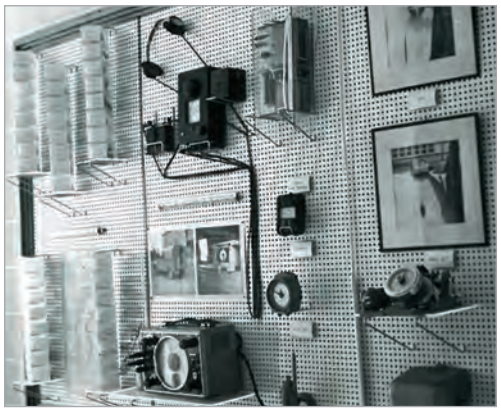
Forage au trépan par battage dans la Craie à Péronne (Somme). *J.-C. Roux, 1962*

Jean Ricour



Evolution de l'exploitation des eaux souterraines en quelques aquifères en France : croissance des prélèvements et baisses de niveau.
1. *Nappe des Sables verts dans la région parisienne.*
2. *Nappe du Calcaire carbonifère dans la région de Lille.*
3. *Nappe de la Craie entre Douai et Valenciennes.*
4. *Nappe des Sables éocènes dans la région de Bordeaux.*

Exploitation des eaux souterraines en France. *J. Margat*



Matériel de prospection hydrogéologique de l'IRHNPC en 1962. *J.-C. Roux*

Station de jaugeage sur la Sensée (Nord). Equipe de l'IRHNPC en 1960. De gauche à droite : MM. Imhof, Greg et Galle-Cavalloni. *J. M. Dezwarte*

Ouverture du SGR Bassin de Paris à Brie-Comte-Robert (1963). *F. Mégnien*

Traité pratique des eaux souterraines, par G. Castany (1963)

Cette publication, dont l'impact dans les milieux administratifs et gouvernementaux fut considérable, eût d'abord comme conséquence la création d'une " Commission nationale de l'eau ", puis l'extension du décret-loi de 1935 aux nappes du Calcaire carbonifère et du Crétacé du Nord - Pas-de-Calais en 1958, et des Sables et Calcaires éocènes de Gironde en 1959.

Dès 1956, le BRGGM, qui deviendra BRGM en 1959, crée à la demande du Ministère de l'Industrie, le premier service d'inventaire des ressources hydrauliques (IRH) dans le Nord – Pas-de-Calais, suivi plus tard de ceux de Lorraine, de Seine-Maritime et de Gironde, régions très industrialisées où les problèmes de ressources en eau et d'abaissement du niveau des nappes étaient particulièrement préoccupants.

Les travaux effectués par ces services consistaient principalement à :

- recenser tous les puits et forages utilisés pour l'alimentation en eau potable des collectivités, les usages industriels et leurs prélèvements, et les puits destinés aux besoins de l'agriculture, encore rares à l'époque ;
- rassembler la documentation géologique, hydrogéologique, physico-chimique et technique relative aux captages dispersée dans les archives des entreprises de forages, des administrations et des communes ;
- établir des cartes de situation des points d'eau et de la surface piézométrique des nappes, à 1/20 000 ou 1/25 000 ;
- publier des rapports de synthèse par huitième de feuille.

Dès le début des années 60, le Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine (SCGAL), sous la direction de Louis Simler, entreprend des études similaires sur l'aquifère de la plaine d'Alsace.

Ce travail, minutieux, de collecte documentaire et d'inventaire sur le terrain, contribua largement à fournir des informations précieuses à la Banque des Données du Sous-Sol (BSS) du BRGM à partir de 1962, déjà alimentée par ailleurs par les déclarations de travaux au titre de l'article 131 du Code minier depuis 1944.

En 1963, le BRGM crée des Services Géologiques Régionaux et régionalise une partie de ses activités. L'inventaire, l'étude et la recherche des ressources en eau souterraine entrent officiellement dans ses compétences, jusqu'alors limitées à la recherche minière, et sont étendus progressivement à l'ensemble de la France sous l'impulsion de Jean Ricour. Avec le recrutement d'hydrogéologues diplô-

més des universités, des spécialistes des eaux souterraines entrent en poste dans toutes les régions de France, ou iront exercer en Afrique de l'Ouest. Un Service d'Hydrogéologie animé par Jean Margat est créé au sein du Département de Géologie.

Deux ouvrages de base sont publiés : " *Les eaux souterraines* " (H. Schoeller, 1962) et le " *Traité pratique des eaux souterraines* " (G. Castany, 1963).

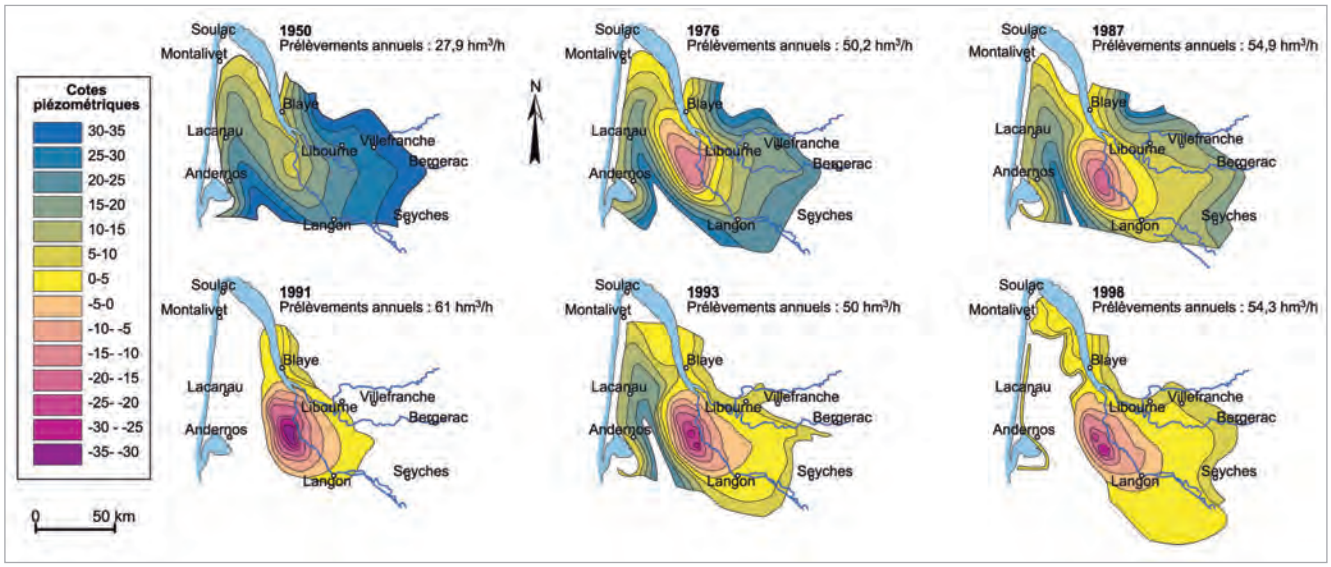
Les premiers piézomètres ont été implantés très tôt, en général dans des secteurs d'exploitation intensive remarquée. Le premier vrai réseau de contrôle des niveaux piézométriques est mis en place en Gironde en 1958, pour le suivi des nappes profondes du Tertiaire. À partir du début des années 1960, les réseaux piézométriques vont se développer, notamment dans le Nord de la France (Calcaire carbonifère et Craie), en Alsace et ensuite dans le Bassin de Paris.

Progressivement développés par les DIREN, les Collectivités locales et le BRGM, ils s'étendront à l'ensemble du territoire national pour atteindre près de 3 700 points de mesures en 2010, dont 1 600 intégrés au réseau piézométrique national.

En 1995, leur gestion est confiée au BRGM par le Ministère chargé de l'Environnement. À partir de cette date, plusieurs d'entre eux sont équipés de dispositifs de télétransmission des mesures (MADO, CR2M), notamment dans le bassin Seine-Normandie, après une tentative de transmission de données par minitel, au début des années 1990, le projet " Télénappe " prévu sur 400 points du territoire national, qui n'a pas été mené à son terme, uniquement 40 points ayant été mis en réseau. Actuellement, une grande partie des mesures piézométriques du réseau patrimonial sont télétransmises. Nous sommes bien loin des mesures périodiques à la " sonde Rossignol " des années 60 !

Relevé piézométrique à la «sonde Rossignol» en 1963. *J.-C. Roux*

Enregistreur piézométrique «MADO». *BRGM im@gé*



Évolution piézométrique de la nappe de l'Eocène en Gironde. *BRGM/AQI*

L'équipe française du Centre des Etudes Hydrogéologiques du Maroc en 1959 (Erfoud, Tafilalt). *J. Margat*.

1. Jean Marçais, directeur du Service Géologique ; 2. R. Ambroggi, Chef du CEH ; 3. J. Margat ; 4. L. Monition ; 5. L Moullard ; 6. F. Mortier ; 7. E. Colas des Francs ; 8. R. Dijon ; 9. A. Cochet ; 10. J.-J. Oberlin

Les hydrogéologues du Service de l'Hydraulique d'Algérie

Au gisement de minerai de fer de Gara Djbilet (250 km S-E de Tindouf) en1956.

1. M. Domergue ; 2. L. Lessard ; 3. R. Ambroggi ; 4. H. Moussu

En Excursion du Congrès de l'AIH de Rome en 1961.

1. G. Cornet ; 2. R. Degallier ; 3. G. Castany ; 4. R. Gouzes

L'Afrique, l'autre terre d'apprentissage de l'hydrogéologie française

La période de l'après-guerre contribue à conduire de nombreux hydrogéologues vers l'Afrique francophone, et en particulier vers les régions du Maghreb où les problèmes de manque d'eau se faisaient cruellement ressentir, et où les eaux souterraines représentaient une ressource importante pour l'alimentation des villes et des campagnes et pour l'irrigation.

Après les amorces d'avant-guerre (cf. chap. III), à partir de 1945, des services publics hydrogéologiques sont organisés et se développent en Afrique du Nord (BIRH en Tunisie, Service d'Études scientifiques de la Direction de la colonisation et de l'hydraulique en Algérie, Centre des études hydrogéologiques au Maroc), bien avant que des structures de ce type ne soient mises en place en France.

Durant plusieurs décennies, le travail que réaliseront ces pionniers de l'hydrogéologie en milieu aride et tropical consistera à faire des inventaires et des synthèses hydrogéologiques et à guider le développement des exploitations d'eau souterraine, ce qui fera beaucoup évoluer l'hydrogéologie naturaliste française, voire mondiale. Ils contribueront à jeter les bases de l'hydrogéologie moderne.

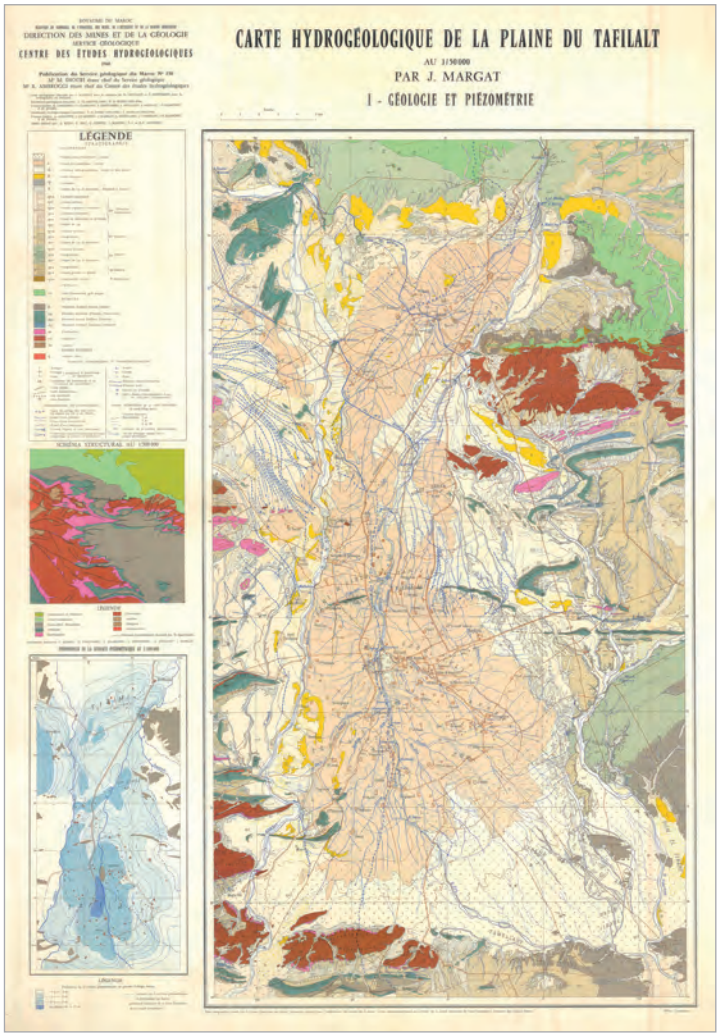
Avec la décolonisation, et en particulier de 1956 à 1962, on assiste au retour progressif d'un bon nombre de ces hydrogéologues de renom comme G. Castany et H. Schoeller de Tunisie, J. Margat et L. Monition du Maroc, et P. Gevin d'Algérie.
Ceux-ci, pour la plupart, prendront des responsabilités dans les universités et dans les instituts publics de recherche français. Ils contribueront à former les futurs hydrogéologues et participeront de manière active à structurer et à organiser l'hydrogéologie française. D'autres comme R. Ambroggi, F. Mortier, R. Dijon, E. Stretta deviendront des experts internationaux au service des agences des Nations Unies.

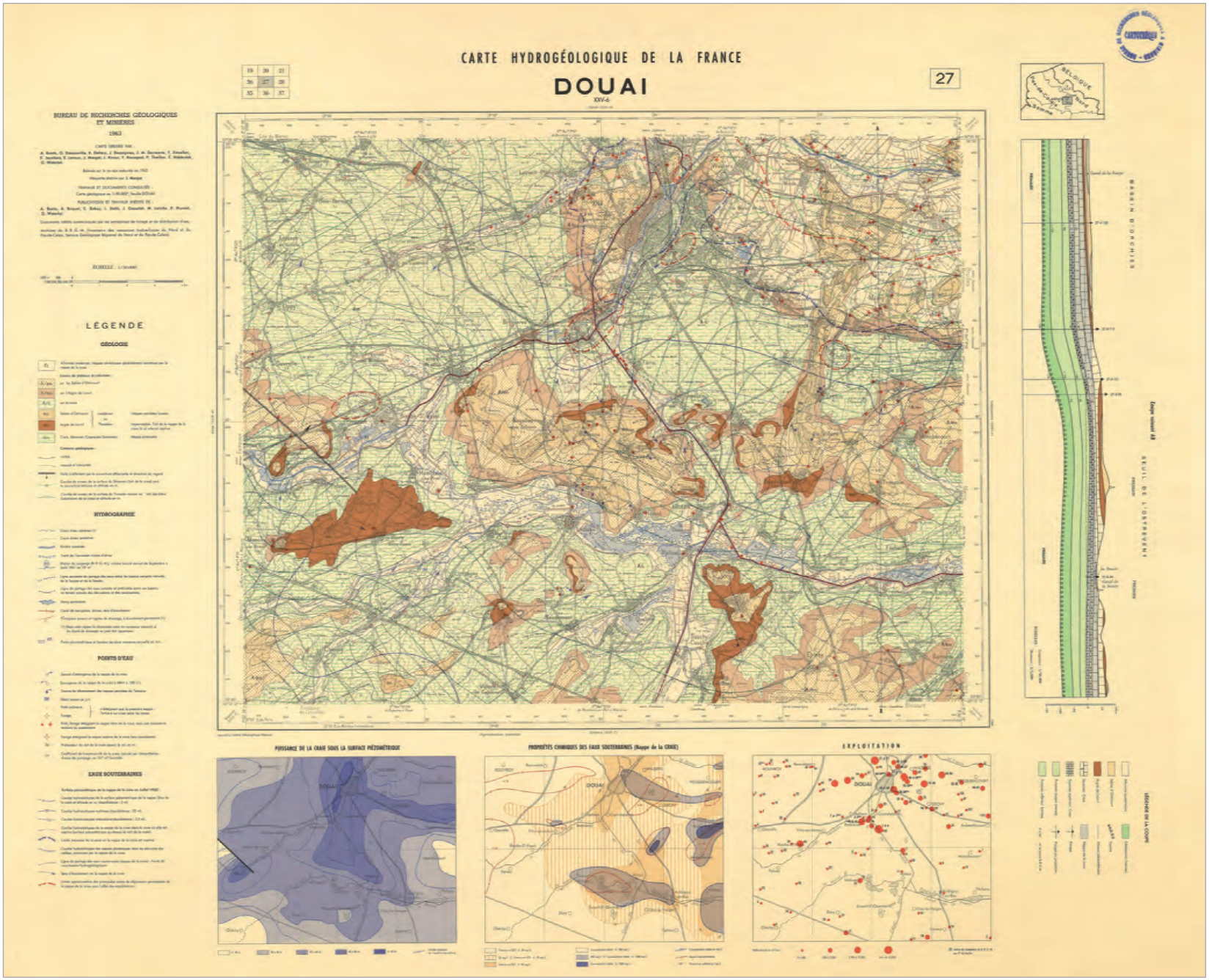
Pierre Gevin. *H. Moussu*

Essai de pompage (150 l/s) dans la nappe de Beni-Amir (plaine du Tadla, Maroc, 1953). *J. Margat*

J. Margat au forage artésien d'Haj Kaddour (Lias du plateau de Meknès, Maroc, 1957). *J. Margat*

Carte hydrogéologique du Tafilalt, Maroc, par J. Margat





Carte hydrogéologique de la feuille Douai (1/50000). *BRGM, J. Margat, 1963*

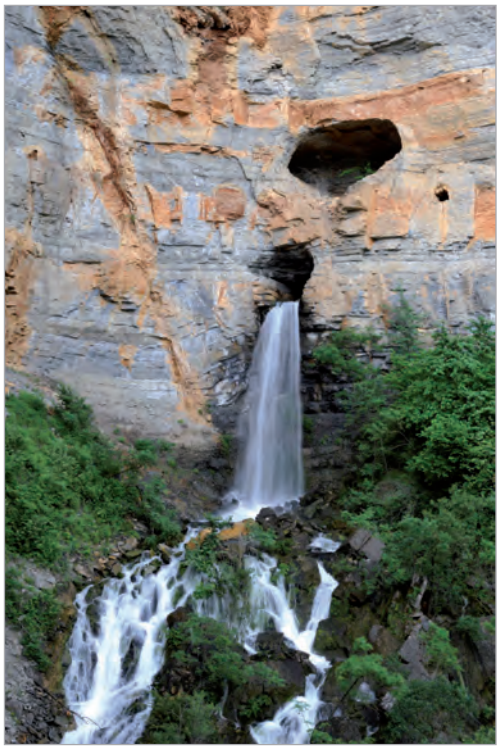
De 1964 à la fin des années 1990 : hydrogéologie moderne et gestion des ressources en eau

Un nouveau concept, de nouveaux moyens

Au début des années 1960, la gestion des ressources en eau prend en France une nouvelle dimension avec le concept de gestion par bassins versants. Pour la première fois, le législateur reconnaît la complexité du fonctionnement des ressources en eau et la nécessité d'avoir une vision territoriale pour pouvoir correctement les gérer. C'est le cadre du bassin hydrographique qui est retenu alors.

En même temps l'unité et l'interdépendance des ressources en eaux superficielles et souterraines sont mieux comprises, rompant avec la dichotomie traditionnelle de l'administration des eaux attribuant les eaux de surface aux Corps des Ponts et Chaussées et du Génie rural et les eaux souterraines au Corps des Mines.

En 1964 est promulguée la première loi sur l'eau, dont Y. Cheret fut la cheville ouvrière. Elle crée six agences financières de bassin (futures agences de l'eau), dotées de ressources propres fondées sur la perception de redevances sur les prélèvements d'eau et les rejets d'eaux usées. Elle institue aussi un régime de déclaration des prélèvements d'eau et de réglementation des rejets dans le sous-sol, et rend obligatoire l'établissement des périmètres de protection pour tous les nouveaux captages d'eau potable.



Grotte et résurgences du cirque du Boundoulaou (Aveyron). *Ph. Crochet*

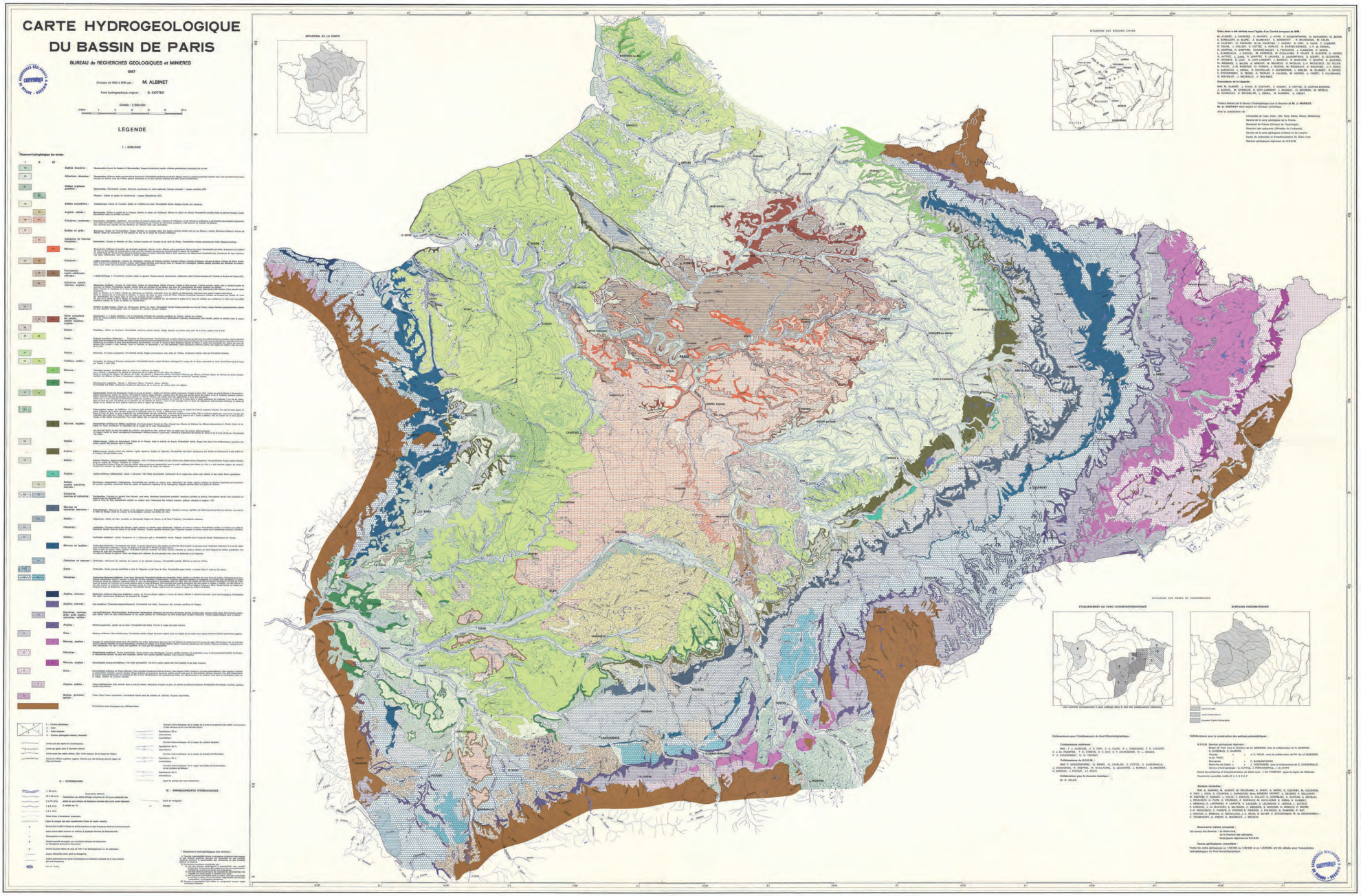
Plus tard, en 1971, la création d'un Ministère de l'Environnement doté d'un Service pour l'étude des problèmes de l'eau (SPEPE), issu de la DATAR (Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale), viendra parachever, pour l'essentiel, la mise en place des grandes structures de l'eau en France.

Sous l'impulsion de cette nouvelle loi et dans ce nouveau contexte, on assiste jusqu'au début des années 70, à un essor important de l'hydrogéologie en France, avec notamment la mise en place de laboratoires d'hydrogéologie dans de nouvelles universités (Marseille, Besançon, Lille, Strasbourg, avec la création de postes d'hydrogéologues dans les départements, dans les agences de bassin et dans l'administration (SRAE – Service Régional d'Aménagement des Eaux ; CETE – Centre d'Étude Technique de l'Équipement…), mais aussi avec le développement des activités " eau souterraine " au BRGM qui se dote d'un département d'hydrogéologie en 1966, et continue le développement de ses effectifs dans les régions.

Département d'hydrogéologie, BRGM, Orléans-la-Source, 1970. *J.-C. Roux*

À Montpellier, en 1958, J. Avias crée le CERH (Centre d'Études et de Recherches Hydrogéologiques), puis le CERGA doté de moyens de prospection importants.
En 1968, le CNRS crée le Laboratoire de Moulis, spécialisé en hydrogéologie karstique.

Le secteur privé suit la tendance et, après le précédent du BURGÉAP, plusieurs bureaux d'étude, qui traitent des problèmes d'hydraulique, commencent à se tourner vers l'hydrogéologie, dont certaines grandes sociétés comme SOGREAH, SAFEGE, GEOPETROLE ou la SCET (cf. chap. VII).



Carte hydrogéologique du Bassin de Paris (1/500 000). *BRGM, 1967*

De l'hydrogéologie descriptive à l'étude du fonctionnement des ressources

Durant les premières décennies, le travail de l'hydrogéologue reste très naturaliste et comprend surtout de l'hydrogéologie descriptive. Les travaux consistent principalement à effectuer des inventaires intensifs ou descriptifs selon les régions de captages publics et privés, à dresser des cartes piézométriques et à réaliser des synthèses documentaires. Ils aboutissent à la publication des premières cartes hydrogéologiques détaillées à l'échelle de 1/50 000 (Douai, Amiens, 1962…) ou de synthèses régionales (Causses Nord-Montpelliérains, 1967, Atlas des nappes aquifères de la Région parisienne, 1970, Causses du Quercy, 1976, Crau…).

Atlas des eaux souterraines de la France, 1970. Dessin à la plume de J. Margat

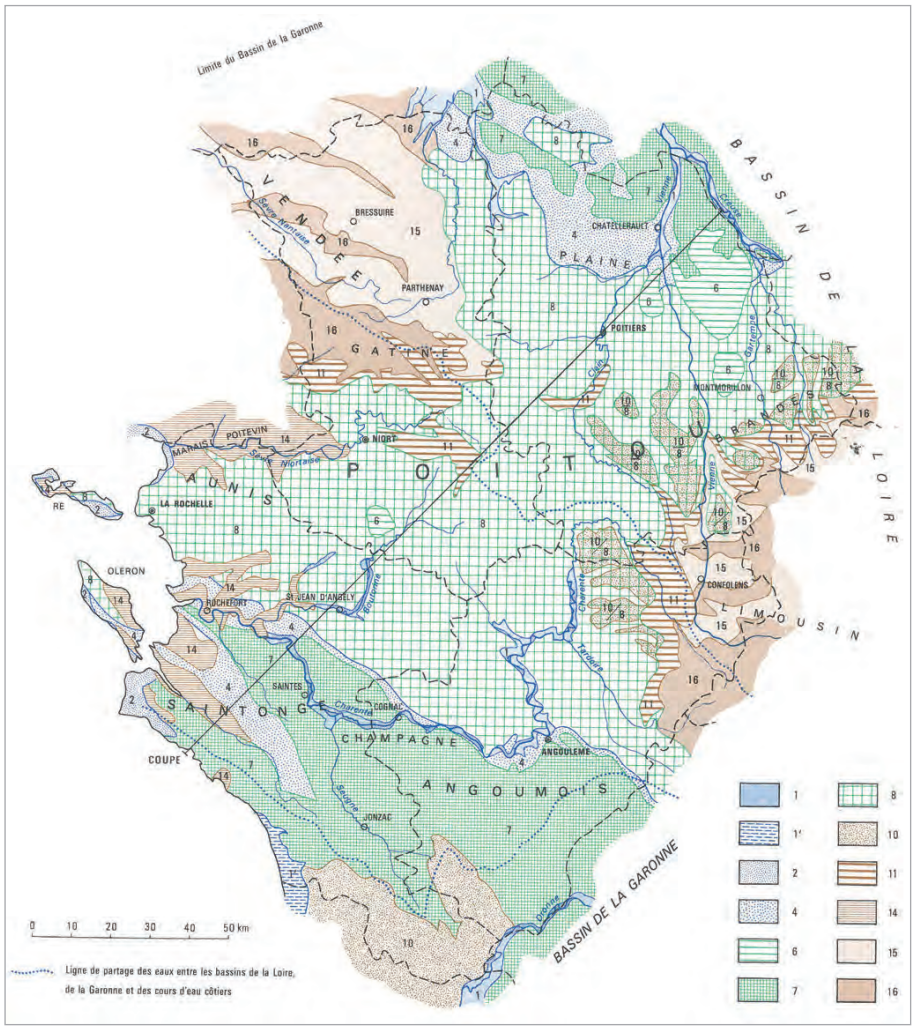
La première carte des eaux souterraines de la France au millionième, commandée au BRGM par la DATAR (SPEPE), est publiée en 1964, suivie de la carte hydrogéologique du Bassin de Paris à 1/500 000 en 1967, et de cartes à 1/200 000 (Nord – Pas-de-Calais, Picardie), tandis qu'à partir de 1965 sont élaborées les contributions françaises à la carte hydrogéologique internationale de l'Europe à 1/1 500 000 avec notices explicatives (AIH/UNESCO).

Le premier " Atlas des eaux souterraines de la France ", présentant l'état des connaissances cartographiques et bibliographiques par région administrative, est édité en 1970 par le BRGM et la DATAR.

De nombreuses monographies détaillées hydrogéologiques, par nappe ou par bassin hydrographique, sont réalisées, soit dans le cadre de thèses universitaires de 3e cycle, soit dans le cadre des actions de service public du BRGM pour le compte des Agences de l'eau (principalement Artois - Picardie et Seine - Normandie), ou encore à la demande des Services du Génie Rural du Ministère de l'Agriculture, BURGÉAP, BRGM, SAFEGE prennent une part importante à ces dernières.

En 1970, une première tentative d'estimation des prélèvements d'eau souterraine en France est réalisée par les agences de bassin : l'estimation des prélèvements totaux s'élève alors à 5 km³/an.

Atlas des eaux souterraines de la France (extrait Poitou-Charente)



Galerie de captage de Loubatière (Puy-de-Dôme), base de l'aquifère volcanique de la chaîne des Puys. *P. Lachassagne*

Seuil jaugeur sur l'Hallue à Querrieu (Somme). *J.-C. Roux, 1967*

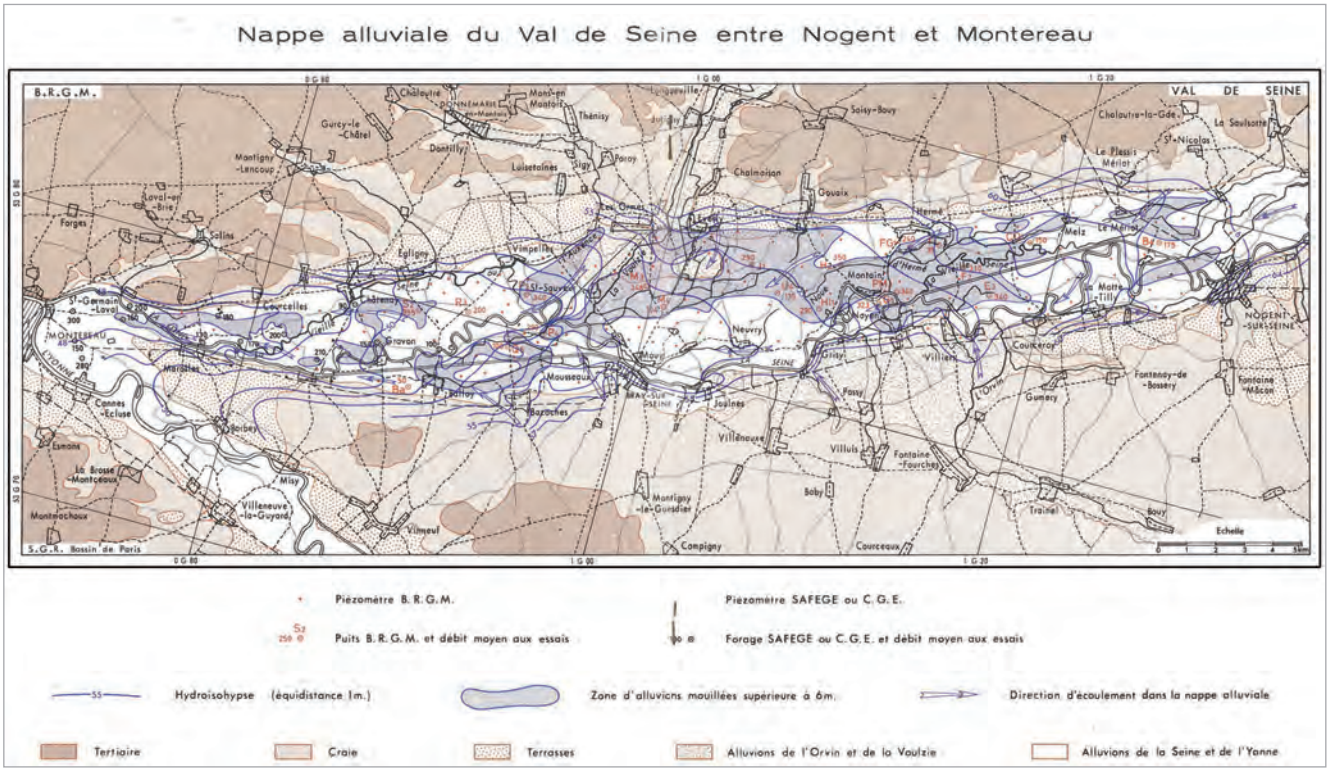
Outre les travaux descriptifs et d'inventaire indispensables, les hydrogéologues interviennent aussi de plus en plus pour des études régionales ou locales de recherche en eau potable et industrielle, et pour l'implantation et le suivi de forages d'eau. Ils contribuent au renforcement de l'alimentation en eau, aussi bien dans de grandes villes (Avignon, Lyon, Paris, Bordeaux, Lille, Rouen, Le Havre, Nice, Strasbourg…), notamment avec l'étude de grands champs captants, que dans de nombreuses communes rurales.

Des dispositifs de réalimentation de nappes par bassin d'infiltration sont créés pour augmenter la production de certains champs captants (Croissy - 78 ; Houle et Moule - 62) (BURGÉAP).
Ces différentes interventions sont favorisées par le développement des techniques de prospection géophysique et de forages.

Ainsi, les travaux de reconnaissance des ressources de la nappe de la Bassée en 1967 (vallée de la Seine en amont de Montereau), destinées à l'alimentation de Paris, comptent parmi les plus importants jamais réalisés par le nombre de forages, piézomètres et pompages d'essai effectués en une seule année.

Par ailleurs, on reconnaît également l'importance de comprendre la dynamique des nappes d'eau souterraine pour pouvoir gérer correctement les ressources. À cet effet, les crédits alloués par la DGRST (Direction Géné-

Carte piézométrique de la Vallée de la Bassée (Yonne). *BRGM, 1967*



rale de la Recherche Scientifique et Technique), dans le cadre de la décennie hydrologique internationale lancée par l'UNESCO, permettent le lancement de programmes de recherche qui visent à instrumenter des bassins expérimentaux à importante composante d'eau souterraine (Hallue - 80 et Fontaine de Vaucluse - 84 (BRGM), Baget - 09 (CNRS), Lez - 34 (CERG), Orgeval - 77 (CEMAGREF), en vue de mieux connaître leur fonctionnement et leurs mécanismes d'alimentation.

Les premiers modèles de simulation analogique (cuve rhéoélectrique, réseau résistances-capacités, papiers conducteurs…) sont réalisés (GÉOHYDRAULIQUE, SCGAL, puis BRGM), notamment le premier modèle par cuve rhéoélectrique de l'aquifère du Continental intercalaire du Sahara par GÉOHYDRAULIQUE en 1965.

Des progrès importants sont ainsi réalisés dans la connaissance de l'alimentation des aquifères, de leur fonctionnement et dans la mesure des paramètres hydrodynamiques. Les relations nappes-rivières sont mises en évidence par les jaugeages hydrométriques des cours d'eau et par les suivis piézométriques.

Des méthodes structurées 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 d'aide aux décisions de gestion est esquissée.

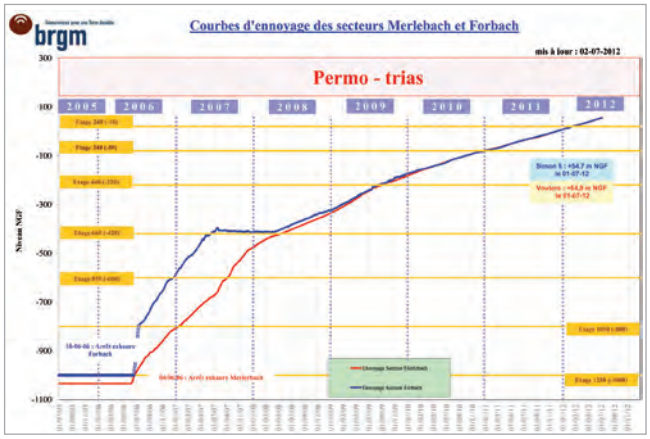
Dans les bassins miniers, la nécessité de maîtriser les volumes d'eau pompés a amené les ingénieurs à s'intéresser aux caractéristiques hydrauliques des milieux souterrains afin d'optimiser les pompages nécessaires au dénoyage des mines notamment, en n'exploitant pas le minerai sous les vallées karstiques. Dans les années 1970, s'imposa le besoin de valoriser ces exhaures afin de desservir l'industrie et les collectivités. Par voie de conséquence, le contrôle de la qualité de la ressource et sa protection devenaient indispensables et ont induit une meilleure connaissance de la vulnérabilité de la ressource vis-à-vis des contaminations superficielles.

Ainsi, l'exploitation minière induit des connaissances en hydrogéologie quantitative dans toutes ses composantes : géométrie des réservoirs, hydraulique souterraine, hydrogéochimie, modélisation, vulnérabilité et protection des ressources.

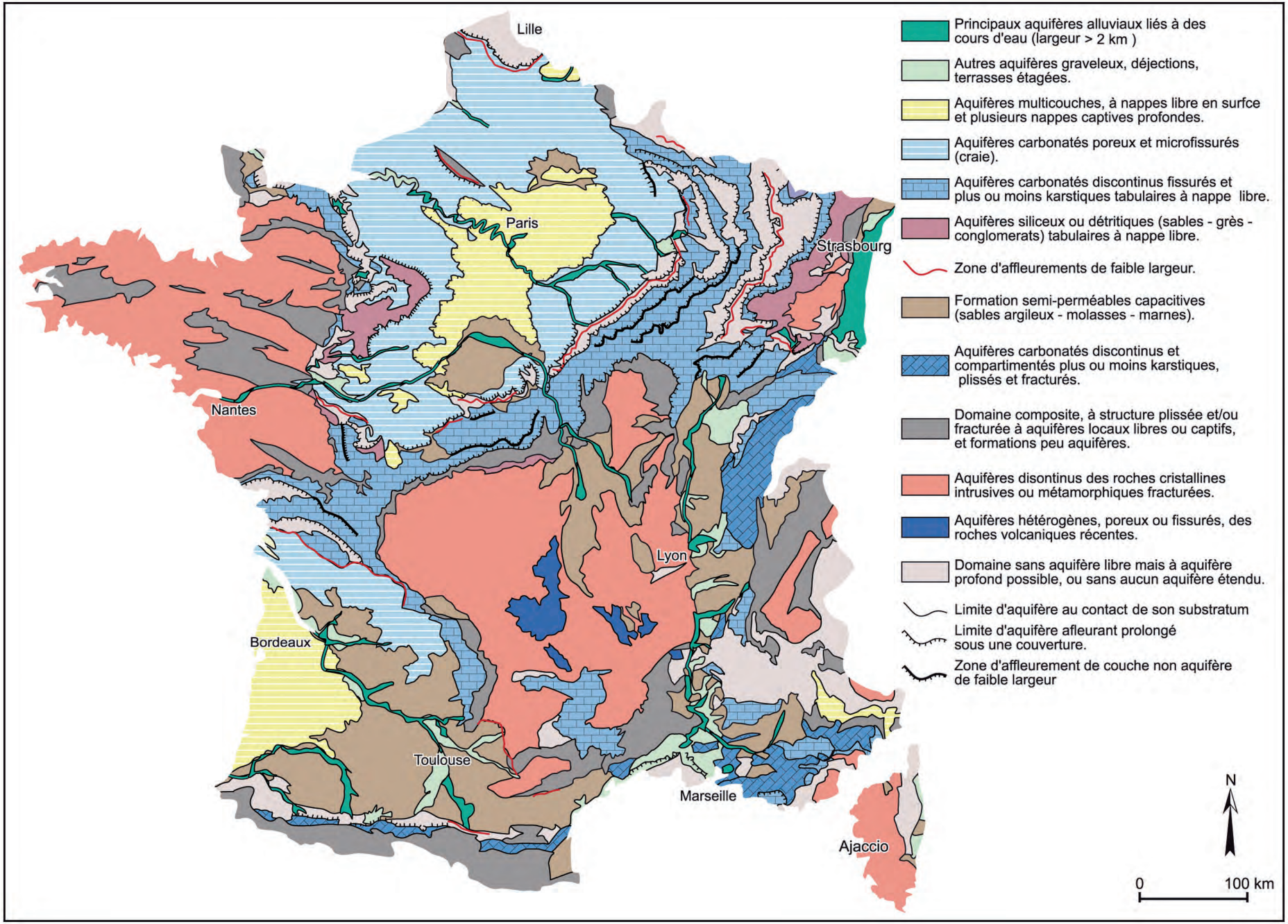
Dans les années 2010, les remontées de nappe consécutives à la fermeture des Mines de charbon du Nord - Pas-de-Calais, des mines de fer de Lorraine et des potasses d'Alsace nécessitent toujours, et encore pour de nombreuses années, un suivi piézométrique et qualitatif des aquifères concernés.

Panorama du site de La Fontaine de Vaucluse, 84. *A. Couturaud*

Modèle «télédeltos» sur papier semi-conducteur. *BRGM Orléans, 1971.* De g. à dr. : R. Bellegarde, J. Margat, L. Lheureux, S. Ramon et M. Bonnet



Courbes d'ennoyage du bassin houillier est de Lorraine



Carte hydrogéologique structurale de la France (1/500 000). *BRGM / J. Margat, 1986*

Les réseaux de mesures ainsi que l'évaluation et la prévision des impacts sur le niveau et la qualité des nappes sus-jacentes : teneurs en sulfates et sodium dans le bassin ferrifère de Lorraine, acidité, sulfates et fer dissous dans le bassin houiller de Lorraine, sont assurés par des hydrogéologues dans le cadre de " l'après-mines ".

Le développement d'un puissant outil de synthèse et de gestion des ressources en eau souterraine : le modèle mathématique

À partir des années 70, la gestion prévisionnelle des eaux souterraines s'intensifie avec le développement de l'hydrogéologie quantitative fondée sur l'informatique hydrogéologique. En 1973, le SGAL construit le plus gros modèle analogique pour simuler la nappe de l'aquifère rhénan autour du barrage de d'Iffezheim sur le Rhin. Les modèles analogiques puis hybrides sont remplacés par les modèles numériques et, avec l'apparition des micro-ordinateurs, les progrès sont de plus en plus décisifs, avec des approches analytiques des structures et des comportements hydrodynamiques des systèmes aquifères à toutes échelles.

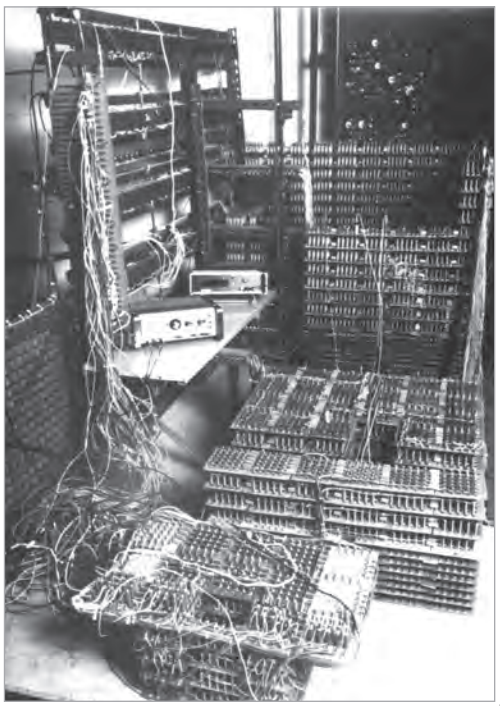
Les années 1960 et 1970 sont ainsi l'époque de la mise en œuvre des premiers modèles mathématiques.

Au début des années 1960, SOGREAH crée le premier modèle mathématique sur le Chott-el-Chergui (Algérie). Dès 1965 est réalisé le premier modèle mathématique d'un grand aquifère régional en France : celui de la nappe des Sables verts de l'Albien du Bassin de Paris (DICA). À son tour, l'École des Mines de Paris, sous l'impulsion d'Yves Emsellem, contribue au développement de ces instruments numériques par son laboratoire d'hydrogéologie mathématique (1967). Des modèles monocouches puis multicouches (NEWSAM) y seront développés plus tard.

Les grands aquifères seront successivement modélisés : l'Albien, le Champigny et la Craie du Bassin de Paris, les Grès vosgiens, le Calcaire du Carbonifère dans le Nord (École des Mines), les aquifères multicouches d'Aquitaine, la Nappe alluviale de la plaine du Rhin (BRGM/IFARE), la Nappe de la Craie dans le Nord, la Plaine du Roussillon, l'Infra-Toarcien en Poitou-Charente, la Nappe de Beauce (GÉOEXPERT), le Cénomanien de Touraine (SOGREAH).

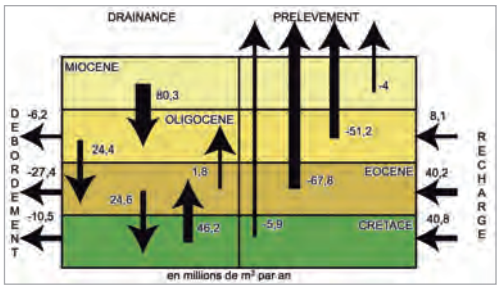
Les applications seront nombreuses à l'étranger pour la gestion des ressources en eau pour le développement des régions : plaine de Thessalie en Grèce, Bénin, Burkina Faso, Côte-d'Ivoire, Irak, Libye, Syrie (SOGREAH)...

Les premiers modèles, excellents outils de synthèse, ont par ailleurs permis d'importantes avancées dans la com-

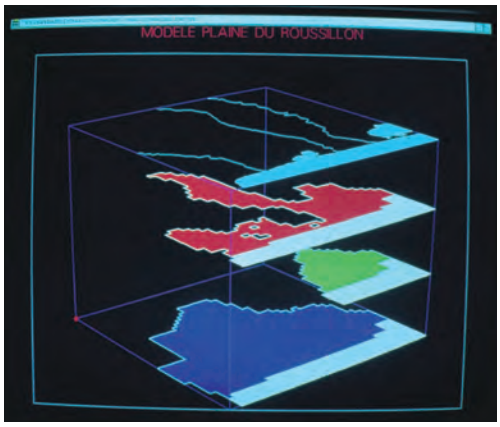


Modèle analogique 3D du SCGAL pour simuler les pompages au voisinage des travaux du barrage de Gamsheim sur le Rhin (1972). *J. P. Vançon*

Carte piézométrique de l'Albien du Bassin de Paris. *J. Lauverjat, Y. Raoult, 1998*



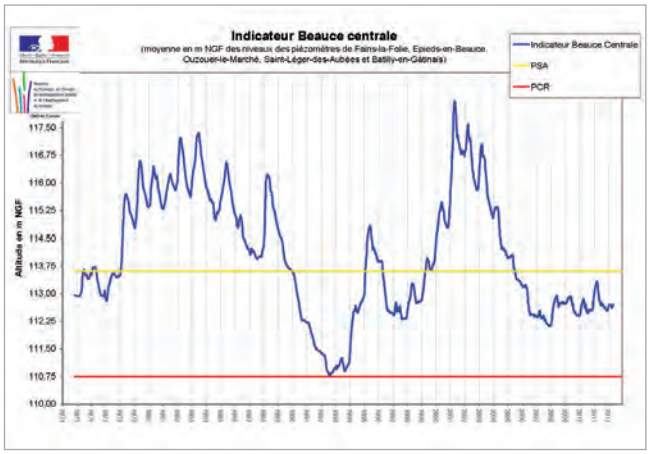
Hydrodynamique des nappes d'Aquitaine, d'après la modélisation. *BRGM, 2002*



Modèle multicouches de la plaine du Roussillon. *BRGM, 2002*

Carte des systèmes aquifères de la France.
BRGM / J. Margat, 1980

préhension du fonctionnement et du comportement des aquifères, donc de l'évaluation des ressources en eau souterraine. Les interactions entre les aquifères, mais également entre les eaux de surface et les eaux souterraines sont mises en évidence, ce qui renforce encore la nécessité d'avoir une approche large et étendue pour la gestion des ressources en eau. Ces grands modèles ont par ailleurs contribué à conduire à de nouveaux concepts pour l'analyse des conditions hydrogéologiques du territoire, dont celui de " systèmes aquifères ", introduit par J. Margat en 1976 (" Codes Margat "). Ces derniers seront matérialisés par l'édition en 1980 de la " Carte hydrogéologique de la France. Systèmes aquifères " à 1/1 000 000, puis repris beaucoup plus tard et complétés à partir de 1995. Ils serviront de base, ultérieurement, à la détermination des " référentiels hydrogéologiques ", puis des masses d'eau en application de la Directive européenne.



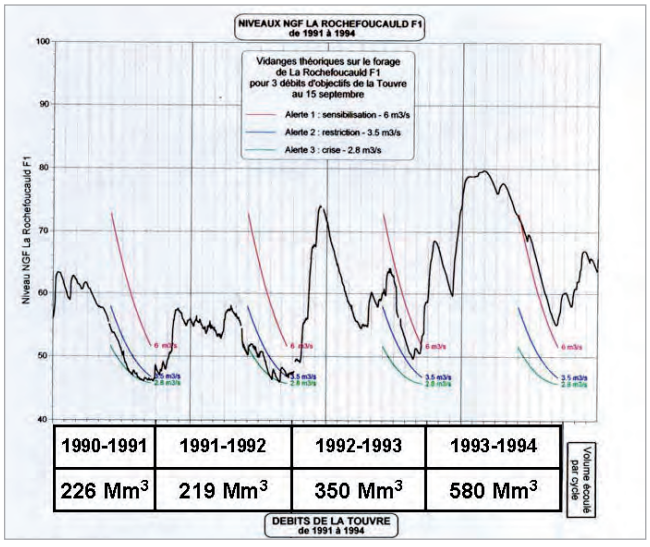
Niveaux piézométriques moyens indicateurs de Beauce centrale. *AELB*

Les modèles sont aussi adaptés à la gestion des champs captants (Croissy et Aubergenville pour l'alimentation de la banlieue ouest de Paris, de Lyon, Avignon, Dunkerque…) et à la mise en place de dispositifs antipollution par pièges hydrauliques (BURGÉAP, SOGREAH).

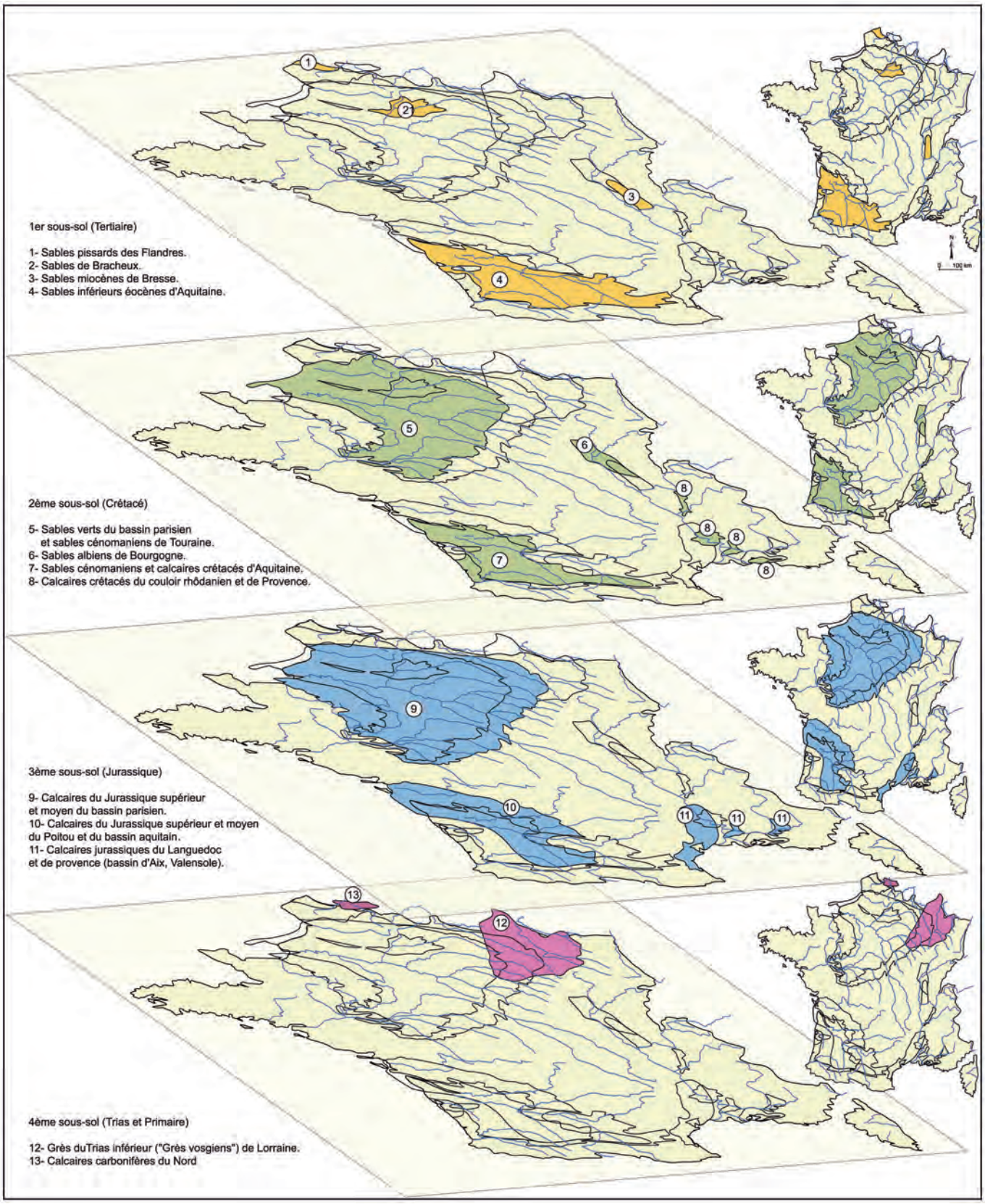
Les Sources de la Touvre (Charente). *HYDRO-INVEST*

Les applications qui en découlent sont multiples et multiformes : potentiel des ressources, débit d'exploitation, schéma directeur d'exploitation, plans d'alerte et de protection contre les pollutions accidentelles. Des corrélations effectuées entre niveaux des nappes et débits des sources ou débit global d›exploitation permettent également de fixer, dans différentes conditions, des seuils de prélèvements dans les aquifères à ne pas dépasser, qui servent ensuite de base à la réglementation (nappe de Beauce, de Champigny, karst de La Rochefoucauld et sources de la Touvre, nappe des Sables albiens du Bassin de Paris, Crétacé, Éocène, Oligocène et Miocène de Gironde, Cénomanien de Touraine, nappe de l'Astien de l'Hérault…).

Au-delà, les mathématiques ouvrent des horizons vers des outils de plus en plus sophistiqués. Plusieurs prototypes originaux sont développés et mis en œuvre comme le modèle intégré de gestion optimale de la nappe à Aubergenville et Croissy (78) réalisé en 1988, qui permet à l'exploitant d'optimiser l'exploitation et la réalimentation artificielle de ses champs captants, tout en minimisant les coûts.



Gestion des eaux du Karst de La Rochefoucauld (Charente). *HYDRO-INVEST.*



Principales formations aquifères du territoire français. *J. Margat, 2006*

L'impulsion des sécheresses - Ouverture vers les ressources non conventionnelles et les outils d'aide à la prévision

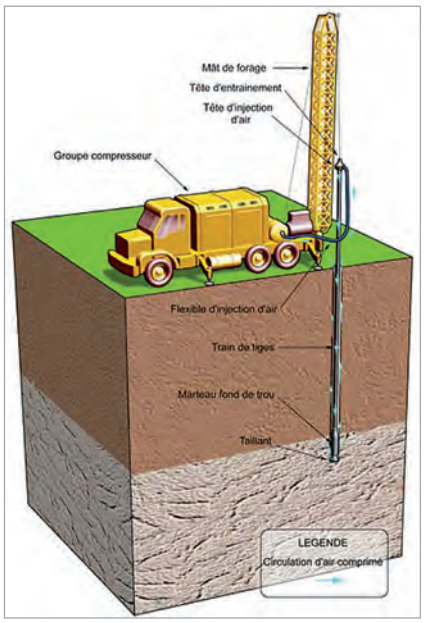
En 1976, une sécheresse de plusieurs mois, sévissant en France, provoque une pénurie d'eau dans le Massif Armoricain, région de socle peu perméable, où l'alimentation des collectivités est essentiellement assurée par les eaux de surface.

Cette situation élargit l'attention portée sur les ressources en eau souterraine qui peuvent constituer des réserves de sécurité, et notamment vers les terrains difficiles réputés à tort " sans eau souterraine ". Ainsi, l'hydrogéologie des roches fissurées cristallines se développe dans les massifs anciens, appliquant les techniques mises au point en Afrique occidentale. Des modèles conceptuels naissent qui permettent de rendre plus efficaces les recherches de nouvelles ressources en eau. Des horizons productifs sont identifiés et de nombreux forages présentant des ressources d'appoint non négligeables 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, traitement informatique, prospection radon…).

Les aquifères carbonatés font également l'objet de nombreuses études et recherches dans les régions et massifs calcaires (Craie du Nord et du Bassin de Paris, Jura, Préalpes, Causses, Provence, Pyrénées). Parmi les plus célèbres, le système karstique de la Fontaine de Vaucluse, ainsi que celui du Baget dans les Pyrénées, ont fait l'objet d'un suivi permanent et de nombreuses recherches fondamentales.

La source littorale de Port-Miou, près de Marseille, a été longuement étudiée par le BRGM et la Société des Eaux de Marseille, dans le but de tenter son captage sans attirer l'eau salée marine. Un barrage expérimental, construit par SOLÉTANCHE dans le conduit karstique, a été inauguré en 1977, mais la tentative de captage d'eau douce a échoué car l'eau de l'aquifère karstique restait malgré tout trop saumâtre pour la consommation humaine. Néanmoins les observations hydrologiques et physico-chimiques se poursuivent toujours pour améliorer la connaissance du régime et de l'origine de la " rivière mystérieuse ".

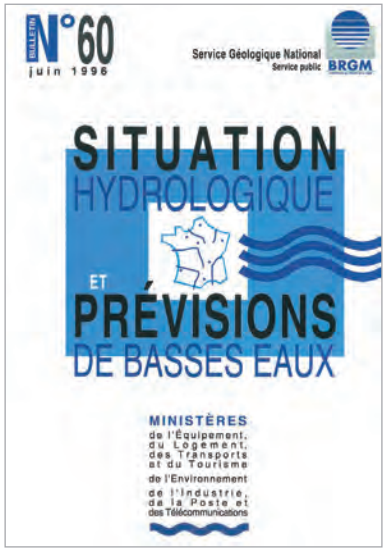
Le système karstique de la Source du Lez (près de Montpellier) a fait l'objet de nombreuses observations durant une dizaine d'années par l'Université de Montpellier, dans l'objectif d'alimenter cette ville en eau potable, alors que les élus préféraient la solution à partir du Canal du Bas Rhône - Languedoc. La persévérance du Professeur J. Avias a permis de démontrer qu'il était possible de mobiliser, en été, les réserves du karst qui se reconstituent en hiver et



Principe du forage au «marteau fond de trou»

Calanque de Port Miou, Cassis (Bouches-du-Rhône). *L. Potié*

Plongeur devant le barrage souterrain de Port Miou. *L. Potié*



Bulletin de situation hydrologique et prévisions de basses eaux

La source du Lez (Hérault). *Ph Crochet*

Plongeur dans le conduit karstique de la Source du Lez. *Ville de Montpellier*

Usine souterraine du captage du Lez. *M. Caudron*

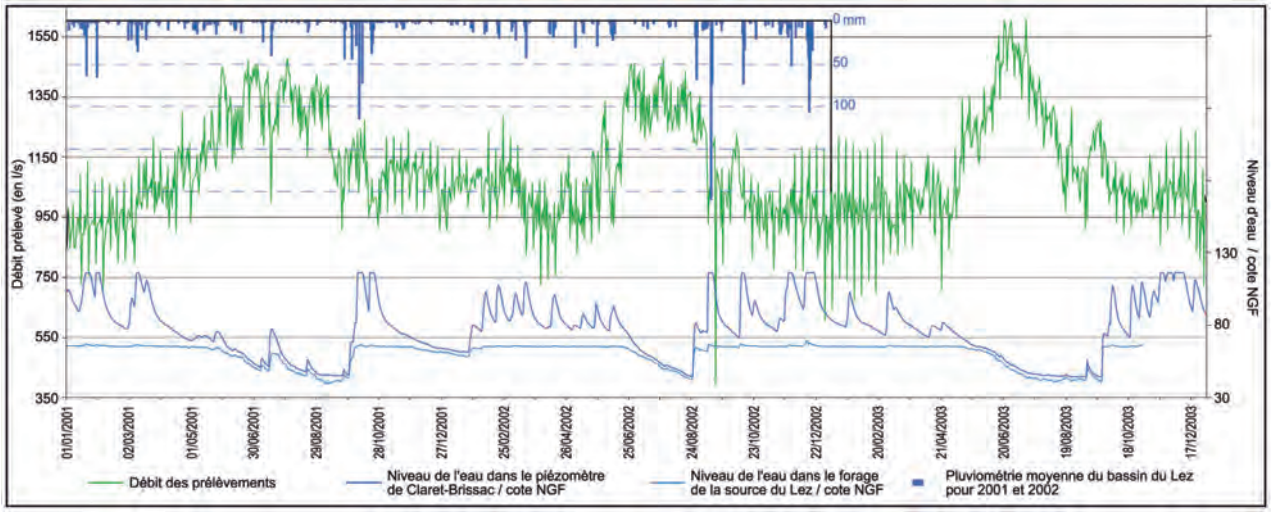
en 1982, l'usine souterraine du captage était inaugurée alimentant la plus grande partie des 300 000 habitants de Montpellier. Cette opération constitue un bel exemple de " gestion active d'aquifère " qui fonctionne maintenant depuis près de 40 ans.

La sécheresse de 1976 sensibilisa aussi les pouvoirs publics sur le risque d'assèchement des forages dans les bassins sédimentaires, et les hydrogéologues furent consultés pour établir des prévisions de niveau de nappe à court et moyen terme, et pour participer aux " Comités sécheresse " qui se mettaient en place dans les préfectures de chaque département.

Des modèles de calcul prévisionnel ont été établis à cet effet pour plusieurs ressources en eau dans les régions ayant subi un préjudice significatif durant la sécheresse. En 1977, Le BRGM créa un " Bulletin de situation et prévisions hydrologiques " devenu interministériel à partir de juin 1978, sous le titre de " Situation hydrologique et prévisions de basses eaux " trimestriel, comportant des informations sur l'état des principales nappes du territoire et des prévisions de niveaux, ainsi que sur les réserves en eau des barrages réservoirs. Ce bulletin est devenu annuel à partir de 1997 sous le titre " Situation hydrologique Bilan annuel, Mai-Avril ", puis de nouveau mensuel à partir de 2002.

De nos jours, chaque année, au printemps et en été, le ministère chargé de l'Environnement sollicite le Service public Eau du BRGM et les DIREN (maintenant DREAL) pour connaître l'état piézométrique des nappes et définir, si nécessaire, les mesures de restrictions de prélèvements à imposer dans les départements.

Exploitation de la Source du Lez (2001-2003) (pluviométrie / prélèvements / débits). *Lyonnaise des eaux*



La qualité des eaux devient une préoccupation majeure - Montée en puissance de l'hydrogéochimie

Le développement des études des ressources en eau souterraine fait apparaître les impacts négatifs de l'industrialisation et de l'agriculture intensive sur les qualités. Dès le début des années 70, la préoccupation de la connaissance et de la protection de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis des risques de pollution apparaît progressivement. Les aspects qualitatifs s'ajoutent aux aspects quantitatifs.

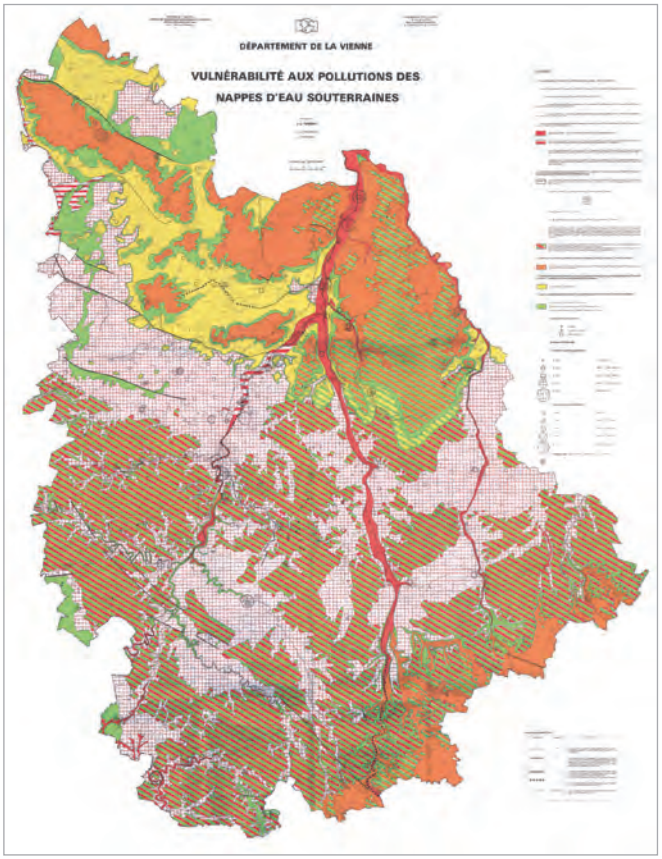
La notion de vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions et les bases de sa cartographie sont introduites par J. Margat (1968), et la première carte de vulnérabilité de la France à 1/1 000 000 est publiée en 1970. Elle sera suivie de nombreuses cartes régionales à l'échelle départementale (Seine-Maritime, Eure…), géographique (plaine du Var) ou par coupures réalisées à 1/50 000 (vallée du Rhône, vallée de l'Allier…). Par la suite la méthodologie est précisée progressivement en augmentant le nombre des critères et en leur donnant des poids respectifs (cartographie multicritères). Plusieurs méthodes seront mises au point dans les années 1980-2000 (EPIC, COP,RISKE, PaPRIKa).

Des 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. Des réseaux de suivi spécialisés sont également installés dans certaines grandes zones industrielles afin de détecter les pollutions spécifiques (Lyon, Rouen, Bassin minier du Nord).

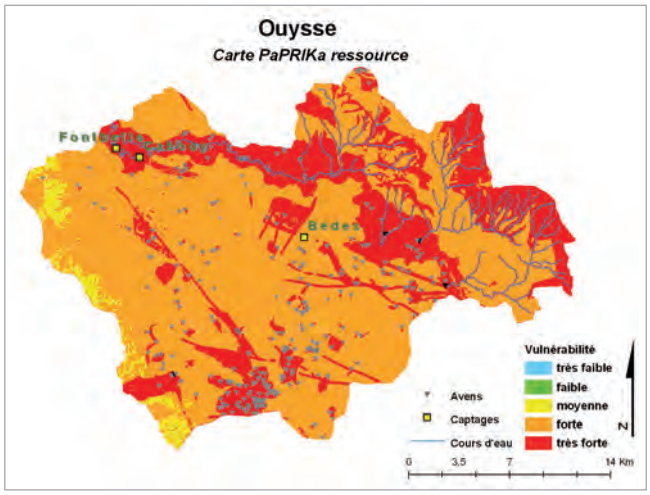
En 1980, le CNRS crée les Programmes Interdisciplinaires de Recherches sur l'Environnement (PIREN) dont certains comportent un " Volet eau " conséquent (PIREN Alsace).

Les réseaux régionaux et les analyses de contrôle réglementaire des captages AEP permettent d'éditer, en 1977, une première carte de la qualité des eaux souterraines de la France, à l'échelle 1/1 000 000. Elle restera malheureusement sans suite jusqu'au début des années 2000, en partie parce que l'attention des hydrogéologues a été rapidement focalisée sur le problème des nitrates.

En effet, les données issues des réseaux de suivi de la qualité des nappes, ajoutées à celles des études documentaires préalables, permettent rapidement de mettre en évidence la croissance régulière des teneurs en nitrates depuis 1955-1960 dans la plupart des nappes libres du territoire français.

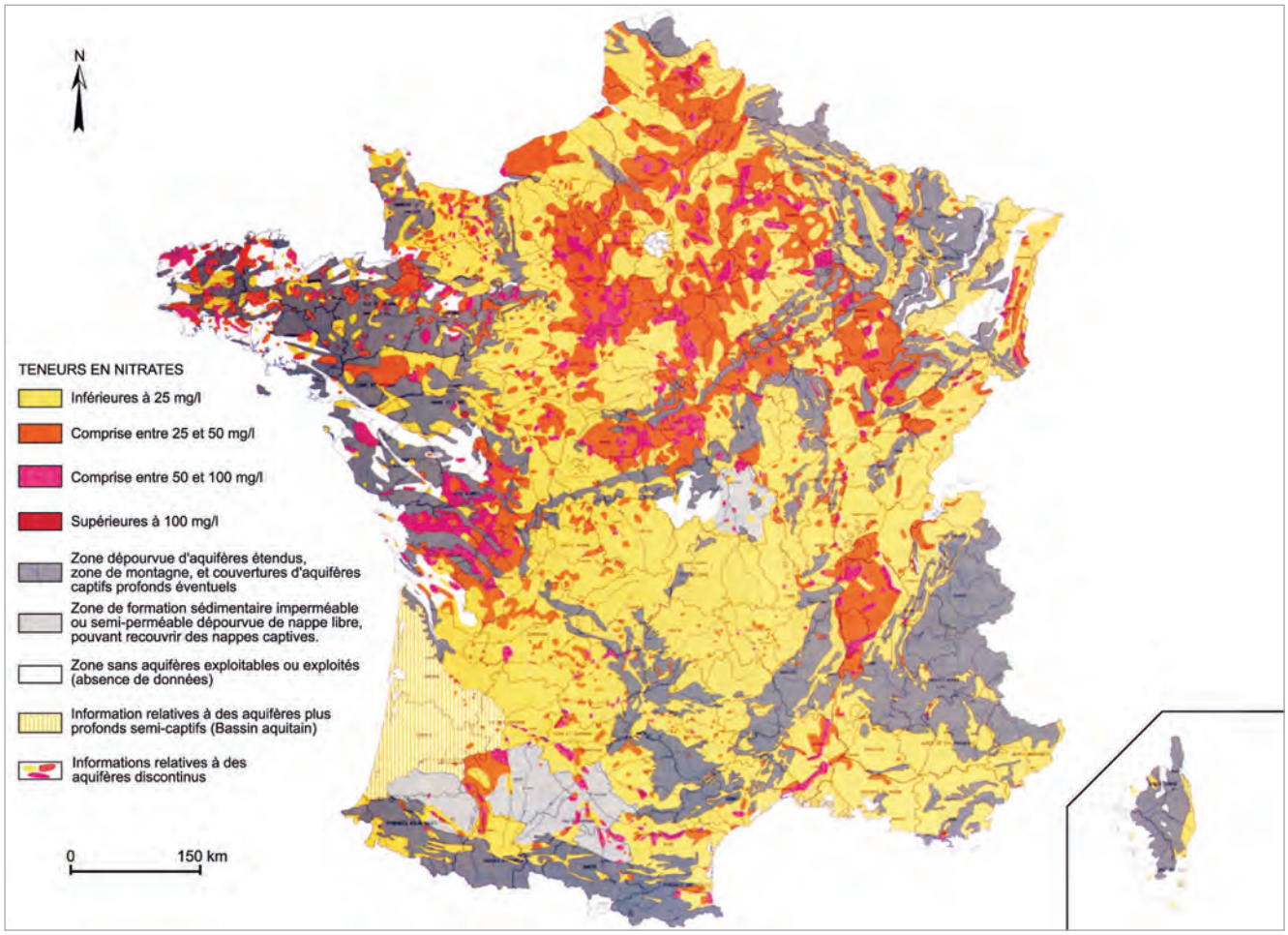


Carte de vulnérabilité aux pollutions des nappes du département de la Vienne. *BRGM / B. Bourgueil, J.L. Tessier, 1977*



Carte de vulnérabilité du système karstique de l'Ouysse. Méthode Paprika. *AEAG / N. Dorflinger, V. Plagnes et al, 2009*

Carte de vulnérabilité des eaux souterraines en France à 1/1 000 000. *BRGM / M. Albinet et al, 1967*



Carte des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines en France. *BRGM / A. Lallemand-Barrès, J.-C. Roux, M. Leteur, 1993*

En 1980, l'établissement d'une carte des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines de la France à 1/1 500 000 met en évidence leur répartition géographique, et une corrélation entre les concentrations élevées en nitrates et les grandes régions d'élevage ou d'agriculture intensive est démontrée.

Des études sont entreprises pour déterminer les vitesses de migration verticale des nitrates dans les zones non saturées surmontant les aquifères (site expérimental de Connantré-51) dans la Craie de Champagne ; datation dans la nappe de la Craie du Nord - Pas-de-Calais).

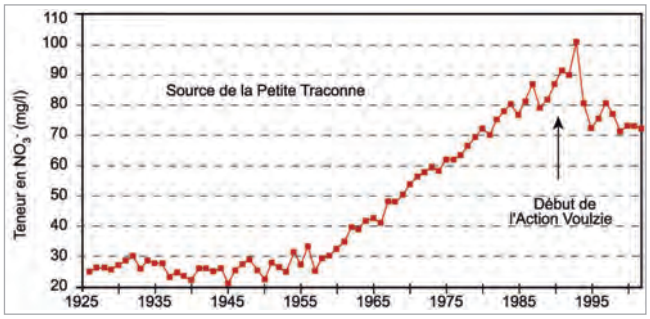
Les premiers modèles prévisionnels de l'évolution des teneurs en nitrates dans les nappes et les sources sont établis au cours de cette période : Nappe de Beauce ; Sources de Provins (Seine-et-Marne).

Vers 1980 aussi, des phénomènes de dénitrification naturelle dans les nappes semi-captives sous couverture imperméable, sont mis en évidence dans la Craie de la région de Douai (Nord). Ultérieurement, des phénomènes identiques seront reconnus dans d'autres régions : Calcaires bathoniens de la Plaine de Caen (Calvados), Calcaires oxfordiens dans la Vienne, puis dans les terrains granitiques et métamorphiques du Massif Armoricain où la dénitrification est due à la présence de pyrite (Bassin de Coët-Dan, Morbihan).

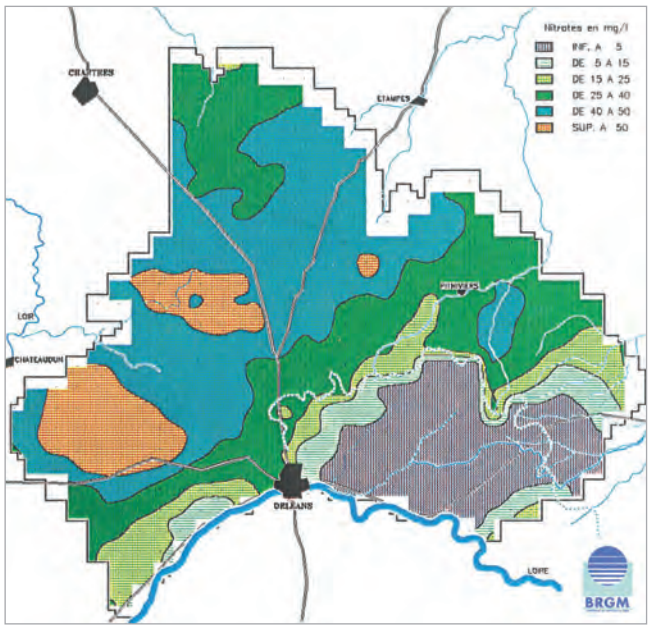
Même si les nitrates mobilisent une grande partie de l'attention de la profession, due aux nombreux dépassements des normes pour l'eau potable observés dans plusieurs régions, d'autres substances ou éléments répertoriés, pour l'essentiel, dans ces mêmes normes, font l'objet d'études spécifiques. Les pesticides, les métaux lourds, les HPA et les OHV en sont des exemples. Leurs modes de transfert dans les sols, dans la zone non saturée et dans les nappes sont étudiés par de nombreuses équipes universitaires, au BRGM et à l'INRA, ainsi que par certains bureaux d'études. Des modèles conceptuels et mathématiques sont mis au point, mettant notamment en exergue l'importance d'avoir des données fiables et représentatives.

En 1985, est constitué l'Observatoire National de la Qualité des Eaux Souterraines (ONQUES), géré par le BRGM, sous la tutelle du Ministère de l'Environnement et du Ministère de la Santé. C'est la première banque de données nationales sur les eaux souterraines, qui a pour vocation de regrouper toutes les analyses d'eau référencées par captage AEP pour l'ensemble de la France.

Les études menées sur la qualité des eaux entraîneront l'amélioration des techniques d'échantillonnage et analytiques. Ceci aura pour effet la découverte de nouvelles molécules qui viendront compléter la liste des polluants

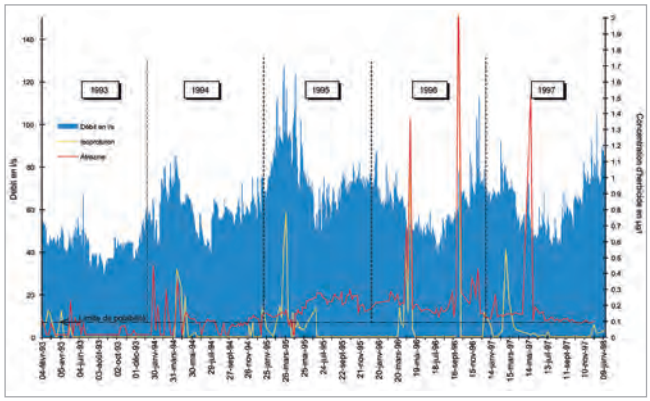


Teneurs en nitrates dans la Source de la Petite Traconne. *SAGEP*



Prévisions des teneurs en nitrates dans la nappe de Beauce avec le modèle MARTHE. *BRGM, 1984*

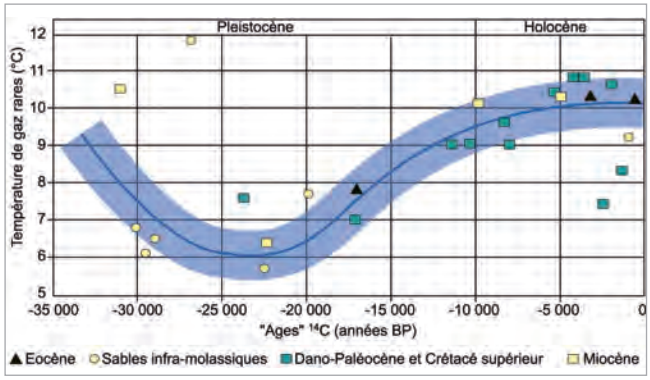
Plaquette «Les nitrates dans l'eau». *CORPEN, 1985*



Variations de la concentration en pesticides (atrazine et isoproturon) dans la source des Trois Fontaines - La Jouannerie, Saint-Loup de Gonois (Loiret).
N. Baran, 1998

trouvés dans les nappes. De nouvelles méthodes verront également le jour comme le dosage du radon dans le gaz du sol et des isotopes.

Ces derniers, dont le Carbone 14, sont utilisés pour dater les eaux souterraines, notamment dans les nappes captives. Des âges de 20 à 40 000 ans sont reconnus, par exemple dans les nappes profondes de l'Albien du Bassin de Paris, du Cénomanien de Touraine, de l'Éocène-Oligocène d'Aquitaine ou de l'Infra-Toarcien de Charente… et jusqu'à 100 000 ans dans les niveaux aquifères les plus profonds du Fossé Rhénan.
Dans les années 70, trois laboratoires appliquent en routine les techniques de datation isotopiques (tritium et radiocarbone) : le BRGM, l'Université d'Orsay et le CRG à Thonon-les-Bains.



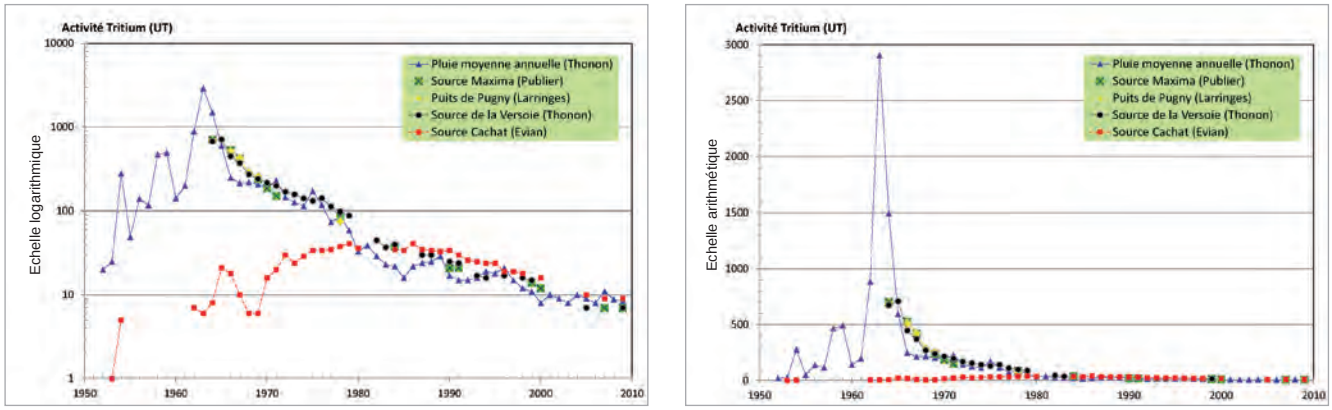
Paléoclimatologie et âges corrigés des eaux profondes d'Aquitaine.
B Blavoux et al. 1993

Les travaux de ce dernier permettront notamment de déterminer l'âge de l'eau dans les sources d'Evian, par le dosage du Tritium, et l'altitude de leur impluvium par celui de l'oxygène 18.

En 1999, sera créée une banque de données isotopiques comportant des informations sur des stations pluviométriques et différentes nappes du territoire.

Dans les années 2000, la datation des eaux souterraines est devenue une technique courante en hydrogéologie. Le calcul de la durée moyenne de renouvellement permet même de préciser le volume d'eau exploitable sans excès.

L'utilisation des CFC pour la datation des nappes libres d'âge récent complète désormais celle du tritium, dont le signal n'est plus perceptible.



Moyennes annuelles des activités tritium de la pluie et de plusieurs sources de la région d'Evian - Thonon. Extrait de : Blavoux B., Lachassagne P., Henriot A., Ladouche B. , Marc V., Nicoud G., Olive Ph., « A fifty-years chronicles of tritium data for characterising the functioning of the Evian and Thonon (France) glacial aquifers », *Journal of hydrogeology*, 494, 2013.

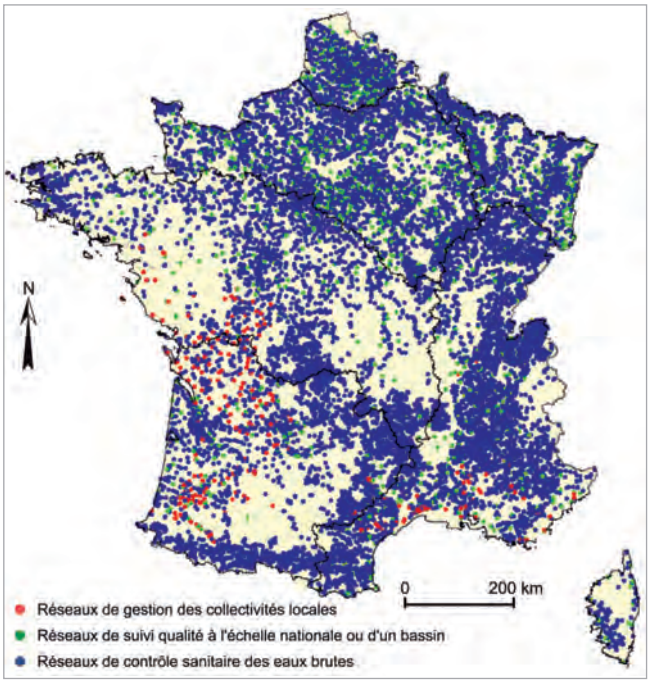
La Loi sur l'Eau de 1992 - Préfiguration de la future Directive Cadre Européenne sur l'Eau

En 1992 est publiée en France la deuxième Loi sur l'eau. Elle rappelle notamment l'unicité de la ressource souterraine et superficielle, le caractère de patrimoine commun de l'eau. Elle instaure l'obligation d'établir un SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement des Eaux), par grand bassin et permet de créer en tant que de besoin des SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) par bassin, sous-bassin ou par système aquifère. Le principe " pollueur-payeur " y est inscrit. Elle conforte et complète également les concepts et les principes déjà introduits par la Loi sur l'Eau de 1964. Les acteurs de l'eau en France renforcent leur organisation, notamment avec la création d'une Direction de l'Eau au Ministère chargé de l'Environnement et de CLE (Commissions Locales de l'Eau) en région, dont le rôle consiste à élaborer, réviser et suivre l'application de chaque SAGE.

J.-L. Laurent, Directeur de l'Eau (à droite) et P.-F. Ténière-Buchot, Directeur de l'AESN (au centre) (1992). *BRGM*

Sa mise en œuvre marque la fin du décret-loi de 1935 et de ses extensions ultérieures, dont les dispositions " protectrices " sont reprises pour les nappes concernées dans les mesures concernant les Zones de Répartition des Eaux (ZRE), qui rassemblent sous un même texte l'ensemble des zones en déficit quantitatif chronique, que cela concerne les eaux superficielles à une échelle hydrologique pertinente (bassin versant) ou les eaux souterraines libres ou captives.

En 2012, les SAGE(s) dédiés uniquement aux eaux souterraines mis en œuvre, ou en cours d'élaboration, sont peu nombreux. Citons le SAGE Nappes profondes de Gironde, le SAGE des nappes de la vallée du Rhin, des Grès du Trias inférieur de Lorraine, de l'Astien (Hérault) et du Pliocène du Roussillon.
Ils imposent des bilans qui respectent l'équilibre entre les prélèvements et la ressource disponible, et fixent les volumes maximaux exploitables en année moyenne.



Situation des réseaux qualité. *SOeS*

Des nappes, intensément exploitées (NIE), peuvent être classées en Zone de Répartition des Eaux (Albien du Bassin de Paris, Beauce, Cénomanien de Touraine), pour en réglementer les prélèvements, et même certaines nappes captives peuvent être réservées pour la production d'eau potable.

En 1996, un rapport du Conseil Général des Mines (Yves Martin) " Gestion durable des eaux souterraines " est publié. Il appuie notamment la mise en œuvre de la Loi sur l'Eau de 1992. Les réseaux de contrôle, qualitatifs et quantitatifs, sont réorganisés et coordonnés, avec une gestion globale au niveau national et une harmonisation des banques de données.

Ressources et exploitation des eaux souterraine en France

La France est riche en eau souterraine et se place au premier rang des pays de l'Union européenne pour ses ressources.

On estime que l'ensemble des aquifères réunis stocke environ 2 000 milliards de m^3, et reçoit bon an mal an 100 milliards de m^3 qui s'écoulent par les sources ou sont drainés par les cours d'eau dont ils contribuent à l'essentiel des écoulements en étiage. Sur ce flux moyen, seuls, environ 6 milliards sont exploités à présent, dont 58 % pour la distribution publique d'eau potable, 21 % pour les industries en prélèvement direct et 19 % pour l'irrigation(1).

Les aquifères les plus exploités sont ceux de la plaine d'Alsace, de la Craie du Nord et du Bassin de Paris, de l'Éocène-Oligocène d'Aquitaine, des vallées alluviales de la Seine, du Rhône, de l'Isère et de la Loire. 50 % des prélèvements d'eau souterraine s'effectuent en nappes alluviales.

En 2009, 96 % des ouvrages de prélèvement d'eau utilisés pour la production d'eau potable prélèvent de l'eau souterraine. Ils alimentent 66,5 % de la population de la France. Dans certains départements du Nord, du Bassin de Paris, d'Aquitaine… 100 % de la ressource provient des eaux souterraines.

Paris " intra-muros " est toujours alimentée à 50 % par l'eau de plusieurs sources captées entre 100 et 150 kilomètres à l'Ouest, à l'Est et au Sud-Est de l'agglomération, et conduite par des aqueducs construits entre 1865 (sous Napoléon III) et 1893.

Le nombre de puits, forages et captages de sources alimentant les réseaux d'eau potable est d'environ 32 200 en 2009. Ce nombre a considérablement diminué au cours des deux précédentes décennies, du fait de l'abandon de nombreux captages contaminés par des nitrates ou des pesticides à des teneurs supérieures aux limites de qualité, ou impossibles à protéger car, situés en secteur urbain ou industriel.

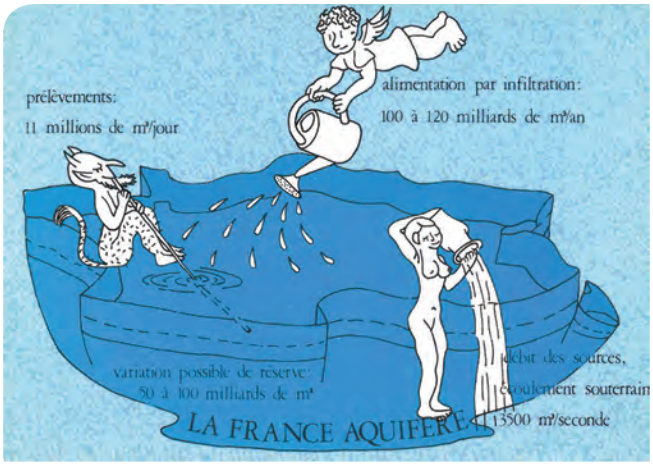
Les premières évaluations de prélèvements d'eau souterraine datent de 1970. Globalement, de 1981 à 1999, l'augmentation est modérée, de 5,7 milliards à 6,1 milliards de m^3/an.

En ce qui concerne l'évolution des prélèvements par usage, de 1970 à 1994, on observe une croissance marquée pour l'AEP dans les années 70, puis un ralentissement dans les années 80, et une stabilisation dans les années 1990 et ce, malgré l'augmentation de 20 % de la population nationale et l'élévation du niveau de confort. Ceci est dû aux réductions des fuites sur les réseaux, à la pose de compteurs d'eau chez tous les usagers et à l'augmentation dissuasive du prix de l'eau. En 2009, les prélèvements pour la consommation humaine s'élèvent à 3,5 km^3.

Pour les usages industriels, la diminution des prélèvements est régulière depuis 1970 dans le Nord de la France et dans le Bassin Seine-Normandie, du fait de la fermeture d'usines et des fortes incitations à recycler l'eau ou à la prélever dans des cours d'eau ; elle reste stable dans le Bassin Loire-Bretagne peu industrialisé. Dans le Bassin Rhin-Meuse, les prélèvements augmentent jusqu'en 1985 pour se stabiliser ensuite. En 2009 ils s'élèvent à 1,3 km^3.

La connaissance et l'évolution des prélèvements à usage d'irrigation sont de mieux en mieux connues avec l'installation des compteurs d'eau sur les forages agricoles. Ils sont estimés à 1,200 km^3.

(1) Données 2009.



Bilan hydrologique des eaux souterraines en France.
(À la façon de Jean Effel).
J. Margat, 1977

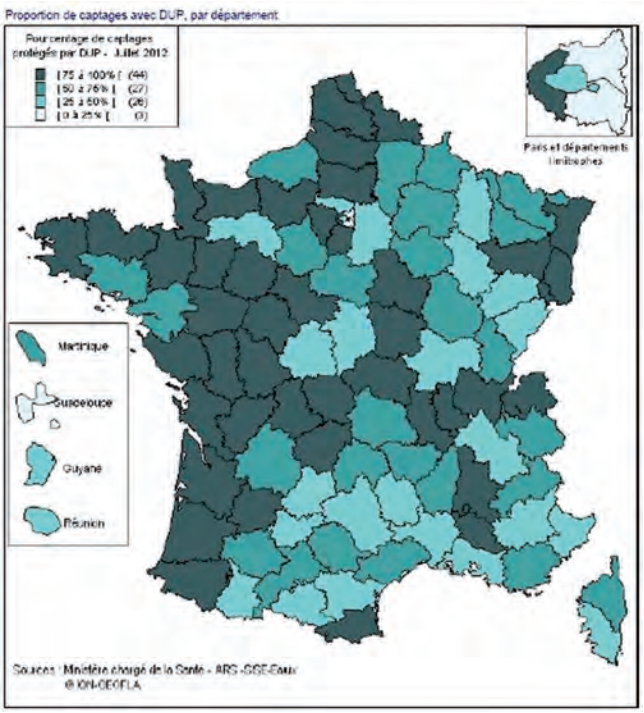
La protection des captages s'organise, mais s'enlise…

Bien que la première loi créant l'obligation d'établir des périmètres de protection pour les captages publics date de 1902 (cf. § III et encadré p. 58), renforcée par la suite par de nouveaux textes réglementaires en 1924, 1935 et la loi sur l'eau de 1964, on constate qu'en 1986, seuls 12 % des captages étaient dotés d'une protection réglementaire. En 1992, le taux des points d'eau protégés n'est encore que de 25 %. Cependant, la plupart des captages ont fait l'objet de projets d'établissement de ces périmètres de protection par les géologues ou hydrogéologues agréés, mais ils ont rarement été suivis des procédures réglementaires de Déclaration d'Utilité Publique (DUP).

Le problème trouve ses racines, en grande partie, dans la lourdeur de la démarche administrative, dans la réticence des collectivités à imposer des servitudes sur les propriétés privées, dans l'absence de fortes contraintes impulsionnelles.

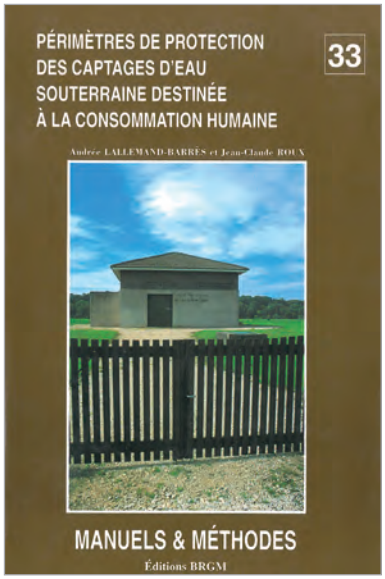
La Loi sur l'Eau de 1992 insiste sur la nécessité d'achever la protection de tous les captages destinés à la consommation humaine, à l'exception des forages profonds, naturellement bien protégés, dans un délai de 5 ans, soit pour 1997.

À partir de 1995, la définition des périmètres devient " plus technique ". Elle s'appuie obligatoirement sur des études hydrogéologiques et environnementales préalables, préconisées dans le " Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages

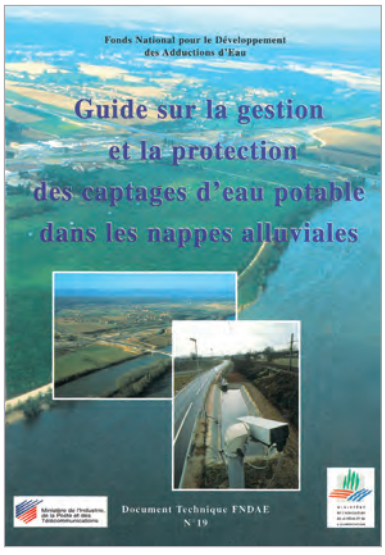


Situation de la protection des captages par département en 2012. *DGS*

Information des collectivités pour la mise en place des périmètres de protection des captages. *AERM & C*



Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection de captages (2e édition), 1998, A. Lallemand-Barrès et J.-C. Roux



Guide sur la gestion et la protection des captages d'eau potable dans les nappes alluviales. BRGM/FNDAE / J.-R. Daum, A. Martelat, 1997

destinés à la consommation humaine " publié par le BRGM en 1989. Des périmètres anciens doivent être révisés.

Par la suite, la mobilisation des Services de la Santé, les importantes aides financières des Agences de l'eau et des Conseils généraux, et le refus de financer les travaux de captages non protégés ont permis de faire avancer significativement les procédures.

En 2012, 66 % des captages d'eau souterraine étaient protégés réglementairement par une DUP.

Par ailleurs, suite au " Grenelle de l'Environnement ", 530 captages prioritaires ont été sélectionnés en 2009 dans toute la France, dans le cadre de la lutte contre la pollution diffuse par les nitrates et les pesticides. Ils doivent faire l'objet d'études de leur aire d'alimentation (AAC), d'une cartographie de la vulnérabilité, puis de la mise en place de programmes d'action destinés à réduire la pollution dans les parties les plus sensibles de leur bassin d'alimentation.

L'intérêt des critères d'ordre économique

L'introduction de concepts économiques dans la gestion des ressources en eau remonte au début des années 1970. D'abord, c'est l'estimation des coûts prévisionnels et comparés de la mobilisation de l'eau souterraine, illustrée par une cartographie régionale spécifique (France, BRGM et BURGÉAP – 1971, et Afrique de l'Ouest). Ensuite, l'analyse s'est tournée vers l'évaluation des phénomènes

Les " hydrogéologues agréés ", une institution spécifiquement française

Depuis le début du XXe siècle, les géologues et les hydrogéologues ont joué un rôle essentiel pour la protection des captages d'eau publics.

En 1900, une instruction du Président du Conseil aux préfets recommande de recueillir l'avis d'un géologue, collaborateur du Service de la Carte Géologique, pour l'appréciation de la salubrité d'une eau destinée à l'alimentation publique.
La fonction de " Géologue officiel " apparaît, laquelle se perpétuera, sous diverses dénominations, jusqu'à nos jours.

Une circulaire du 2 février 1924 prévoit la définition d'un périmètre de protection immédiate et d'un périmètre de protection générale, et donne des instructions précises au géologue.

Le décret du 15 décembre 1967 précise que les périmètres de protection sont institués au vu du rapport géologique et en considérant la plus ou moins grande rapidité de relation hydrogéologique entre la (ou les) zone(s) d'infiltration et le point de prélèvement à protéger.

Jusqu'en 1968, les " Géologues officiels " sont exclusivement des géologues universitaires collaborateurs de la Carte Géologique de France. À partir de cette date, où intervient la fusion de ce Service et du BRGM, les " Géologues agréés " sont issus des rangs de l'Université et du BRGM et nommés, à titre personnel, par la DGS sur proposition de commissions départementales.

Enfin, à partir de 1985, la formation en hydrogéologie devient un critère primordial pour le choix de ces experts qui deviennent " hydrogéologues agréés en matière d'hygiène publique ". Ils sont alors, non seulement issus de l'Université et du BRGM, mais aussi de bureaux d'étude, de l'administration et de collectivités locales.

En 1993, leur nomination est régionalisée. Les hydrogéologues agréés sont nommés par le préfet de région sur proposition des commissions départementales d'agrément présidées par les DDASS, en fonction de leur compétence et de leur expérience régionale.
L'arrêté du 31 août 1993 fixe leurs missions et les conditions de leur agrément.

Depuis 2011, les hydrogéologues agréés sont nommés par les Agences Régionales de Santé, et l'arrêté de 1993 est remplacé par celui du 15 mars 2011.

Leur avis hydrogéologique est la base de référence pour l'institution des périmètres de protection et des servitudes pour la Déclaration d'Utilité Publique.
L'avis s'appuie généralement sur les résultats d'études hydrogéologiques et environnementales qu'ils ont prescrites.

On compte environ 350 hydrogéologues agréés en France, chacun d'entre eux pouvant être nommé dans plusieurs départements.
Cette fonction est spécifiquement française. En effet, dans les autres états de l'Union Européenne ou du Monde, les périmètres de protection de captages et leurs servitudes sont définis par les géologues des Universités, du Service géologique national, ou des Agences de l'environnement.

externes et des impacts sur l'environnement (coûts de la protection des captages d'eau, coûts de la pollution…).

Ces travaux ont conduit à la publication, en 1982, d'un essai pédagogique sur " l'Introduction à l'Économie Générale de l'Eau ", puis à la comptabilité nationale et patrimoniale de l'eau " Comptes de l'eau de la France " en 1986 (INSEE).

Ces études ont contribué à montrer, notamment, que l'eau souterraine, souvent un peu oubliée du pouvoir en place, car non visible, était d'importance et qu'il fallait la prendre en compte dans la planification des ressources et dans les SAGE(s).

Toutefois, ces concepts, un peu éloignés du métier de l'hydrogéologue, n'ont vraiment commencé à prendre de l'ampleur que plus tard dans la gestion des ressources et surtout avec l'arrivée de la Directive-cadre européenne sur l'Eau en 2000.

Et toujours l'hydrogéologue bourlingueur

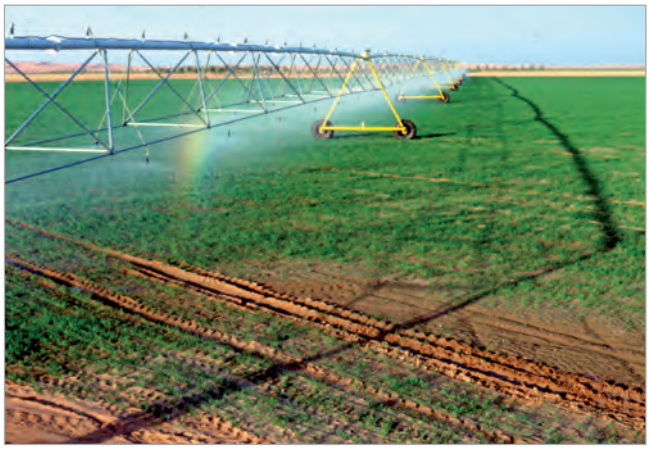
Pendant que l'hydrogéologie prenait un nouveau visage en France, le travail en Afrique se poursuivait sous une forme plus classique avec d'autres équipes. Des inventaires et des synthèses hydrogéologiques continuaient à être effectués dans les pays de l'Afrique de l'Ouest, comme le Sénégal, la Mauritanie et la Côte-d'Ivoire ainsi qu'en Afrique du Nord.

Les besoins en eau ont également conduit vers ce qu'on appellera, pendant longtemps, " l'hydraulique villageoise ". Au Mali, lors de la sécheresse de 1972/1973, l'utilisation de la technique du " forage marteau – fond de trou ", de la géologie structurale et de la photogéologie, a permis de réaliser, rapidement et avec succès, des forages dans les roches cristallines fissurées, passant d'un rendement de trois forages par an à douze forages par mois. Il s'ensuivit d'importants " programmes d'hydraulique villageoise " pour alimenter les villages en eau potable.

Par la suite des milliers de villages ont été équipés de puits en Afrique (Maroc, Cap Vert, Bénin, Burkina, Cameroun, Gabon, Ghana, Mali, Mauritanie, Mozambique, Niger, Sénégal, Tchad, Togo, etc.) suite aux études et suivi de travaux des hydrogéologues français (BRGM, BURGÉAP, SOGREAH…), et grâce aux fonds de coopération de l'État français (FAC), de l'Europe et parfois de l'Arabie Saoudite. Ces forages permirent aussi de créer de " petits périmètres irrigués " pour développer des cultures maraîchères.

Mais des études de plus grande envergure ont été menées aussi pour l'alimentation en eau potable de villes (protec-

Hydraulique villageoise au Niger, 1978. *R. Biscaldi*



Irrigation en Arabie. *BRGM*

Pompage d'essai sous haute protection en Afganistan, par l'hydrogéologue du service d'infrastructure de la Défense - Génie militaire. Mission PAMIR. *Cl. Armand, 2011*

tion de champs captants vis-à-vis des risques d'intrusion saline (Abidjan, Cotonou, Madagascar, Réunion, Yémen), re-captage de la source de Figeh (Damas), ou encore pour l'alimentation d'exploitation de grands groupes industriels français (Total, Lafarge, Rhône-Poulenc, Péchiney, Phosphates du Maroc…) ou étrangers (Angola, Éthiopie, Nigéria, Salvador…).

L'étude hydrogéologique des grandes nappes comme celles du Sahara septentrional amorcée dès les années 60 par la Direction des Carburants, le BURGÉAP et GÉOHYDRAULIQUE, puis objet du projet ERESS de l'UNESCO (1968-1972), avec une forte participation d'experts français sous la direction de Ph. Pallas, a permis de mettre en évidence, entre autres, le fonctionnement des nappes artésiennes du Continental Intercalaire et du Continental terminal en Algérie et Tunisie. Des modèles ont également été construits pour établir le potentiel de grands aquifères sédimentaires d'Afrique de l'Ouest ou équatoriale, dont celui du Maestrichtien.

À partir des années 1970-80, l'hydrogéologie française franchit un nouveau seuil et s'exporte vers l'Asie, l'Amérique latine et même l'Australie.

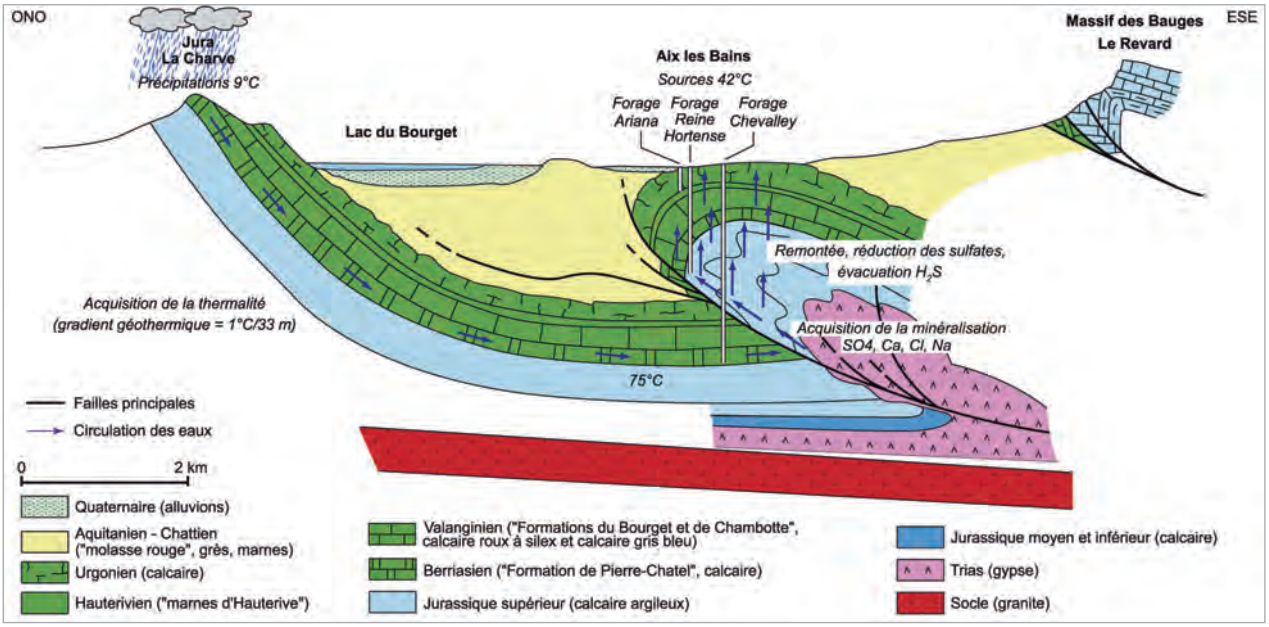
Au Moyen-Orient, par exemple, le système aquifère du SAQ en Arabie, d'une superficie de 370 000 km^2, a fait l'objet d'une étude approfondie de 1981 à 1986 par le BRGM ; celle-ci a permis d'étudier et d'évaluer les ressources des aquifères profonds jusqu'aux Grès cambriens. Des forages jusqu'à 2 500 mètres ont été réalisés pour rechercher l'eau douce en profondeur, et des modélisations prévisionnelles d'exploitation pour l'eau potable et l'agriculture ont été effectuées sur 20 ans. Grâce à ces études et travaux, l'Arabie Saoudite a pu produire 3 millions de tonnes de blé par an. Ces études ont ensuite connu des prolongements au Koweit, en Oman jusqu'en 1990 et au-delà.

D'autres importantes études pour le développement des régions ont été menées par les hydrogéologues de SOGREAH, en Arabie, Iran, Tunisie, Yémen… en équipe avec des agronomes, pédologues et hydrologues.

Des études semblables faisant appel aux modèles mathématiques régionaux, aux outils de prospection géophysique, à la télédétection, etc. ont été conduites en Chine, en Inde, en Indonésie, en Argentine, au Brésil, en Iran, au Pérou… et dans bien d'autres pays de l'Asie et de l'Amérique. Pour ne citer que quelques exemples, les hydrogéologues français ont ainsi mené en Chine, en 1999-2000, le " volet Eaux souterraines ", d'une grande 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, deux importantes études d'impact de mine ont été réalisées : la première dans les mines de fer de l'État de Goa, la seconde dans l'Est du pays pour des mines de chromites du Sukunda (Est du pays).

Dans les années 1990, les hydrogéologues français ont apporté leur concours à l'étude, à l'évaluation et au développement des ressources en eau dans le versant ouest des reliefs côtiers et du " Great Artesian Basin " en Australie.

Certains hydrogéologues sont des experts reconnus sur la scène internationale, et sont invités, de ce fait, dans plusieurs projets menés par des instances internationales comme l'UNESCO (ex : carte hydrogéologique internationale de l'Afrique à 1/5 000 000, carte hydrogéologique du Monde " WHYMAP " à 1/25 000 000, la FAO, la Banque Mondiale, l'Union Européenne, etc.).



Coupe géologique schématique du système thermal d'Aix-les-Bains. *J.-C. Carfantan, 1992*

L'hydrogéologue étend son domaine d'action

Outre les nombreux travaux de cartographie, recherches, évaluations des ressources et de gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines, travaux que l'on peut qualifier " d'hydrogéologie traditionnelle ", les hydrogéologues français apportent également leur expertise dans plusieurs secteurs spécialisés : eaux minérales et thermales, géothermie, travaux publics souterrains, stockages en aquifère, stockage de déchets, décontamination du milieu souterrain.

Eaux thermales et minérales

En France leur exploitation est réglementée par plusieurs lois et décrets dont la loi de juillet 1956 et le décret de 1957 pour l'exploitation. La loi sur l'eau de 1964 pour l'embouteillage, le décret de juin 1989 (prise en compte de la Directive CE de juillet 1980) pour les eaux minérales conditionnées et la loi sur l'eau de 1992. La réglementation a été modifiée en 2007. Ces textes visent, notamment, à accroître la protection de la ressource par la création de périmètres de protection.

Les eaux minérales et thermales naturelles peuvent être déclarées d'intérêt public (DIP).

On compte en France environ 700 sources, dont 400 exploitées en établissements thermaux ou usines de conditionnement, et 158 qui sont déclarées d'intérêt public. Trente-huit sources possèdent un périmètre de protection. Leur exploitation est placée sous le contrôle des Ministères chargés de la Santé et de l'Industrie.

Les hydrogéologues ont apporté leurs compétences dès les années 50 à la définition des aquifères géologiques d'eaux minérales.

Un fichier national des sources minérales et thermales groupant les caractéristiques physico-chimiques et géologiques a été progressivement créé, en liaison avec les ministères concernés.

À partir de 1980, des travaux de re-captage en profondeur des sources ont été entrepris sous la direction d'hydrogéologues, pour augmenter leur production, ou les protéger des pollutions de surface en captant l'eau dans son gisement : Boussanges (bassin de Vichy), Cauterets, Chaudes-Aigues, Bagnols-les-Bains, Watwiller, Aix-les-Bains, Dax, Luchon, Gréoux-les-Bains (BRGM, ANTÉA), Enghien, Plombières, Vittel, Contrex, Évian-les-Bains (SOGREAH), Saint-Galmier (BURGÉAP).

Le thermalisme passe de la pratique de la " cueillette " à celle de la " culture ", c'est-à-dire du captage de sources à la réalisation de forages pour améliorer la " récolte ".

Source thermale de PAR à Chaudes-Aigues (Cantal). *BRGM im@gé / G. Raimboux*

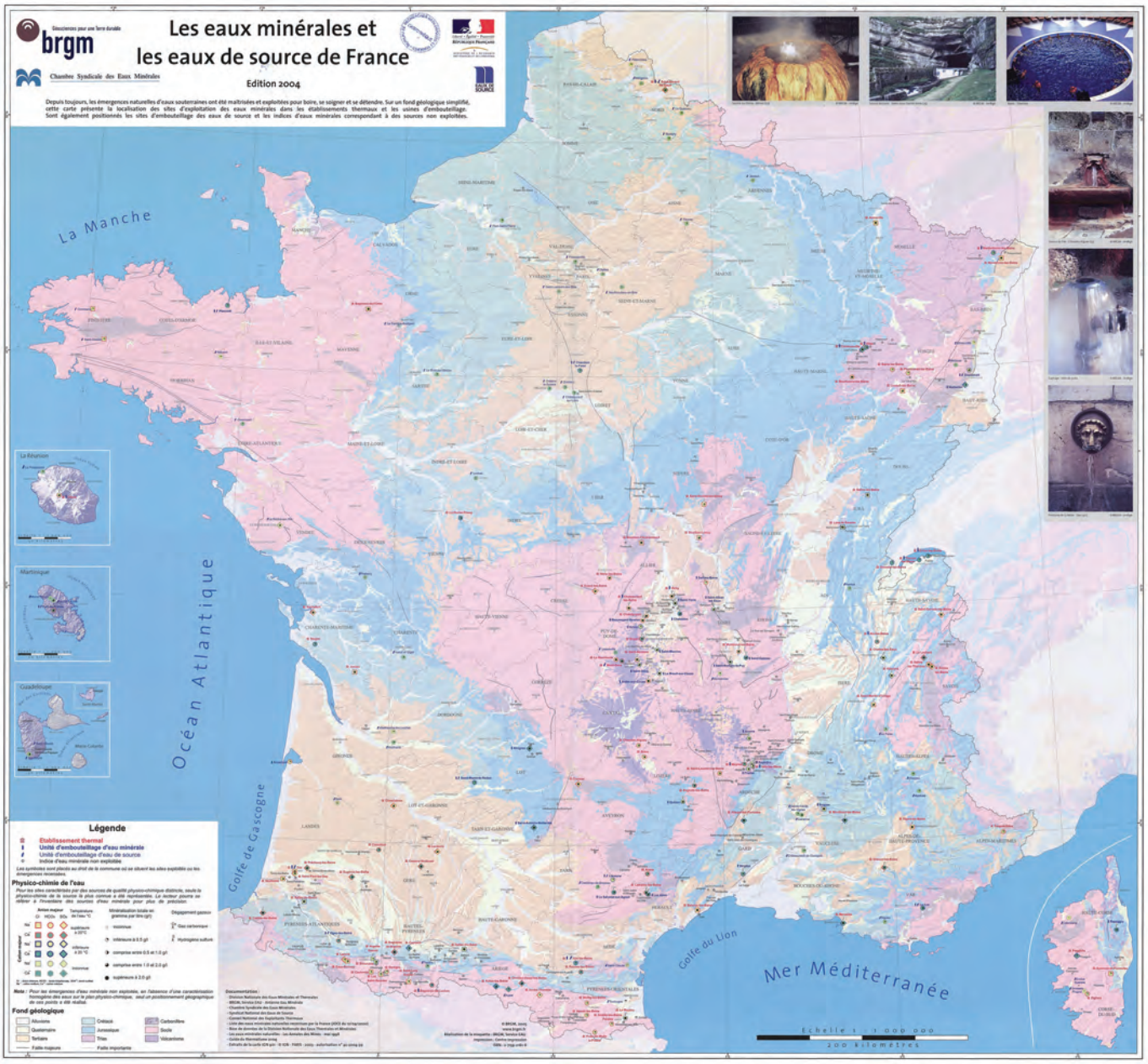
Forage de production d'eau thermale à Luchon (Haute-Garonne). *J.-C. Soulé, 1989*

Par ailleurs, des recherches sont faites sur l'origine et l'âge des eaux et du CO_2, (Cauterets, Luchon, Evian, Perrier, Badoit, Balaruc-les-Bains…) : datation par l'utilisation des isotopes Tritium, Carbone 13 et 14), évaluation de l'altitude de l'impluvium (oxygène 18 et deuterium) ainsi que de la température maximale atteinte au cours du transit souterrain (géothermomètres).

On découvre ainsi que la circulation des fluides géothermaux en profondeur peut être très longue (5000 ans à Cauterets, 14000 ans à Dax, 15000 ans à Luchon…).

Certaines de ces études ont permis l'établissement de périmètres de protection de l'impluvium (Evian, Vittel, Aix-les-Bains…).

Dans certains pays étrangers, des hydrogéologues français sont intervenus pour des recherches de sources minérales pour le compte de sociétés françaises (Californie pour Vittel en 1978-1979).



Carte des eaux minérales et thermales en France. *BRGM, 2004*

La Fontaine Chaude à Dax (Landes)

Autrefois

Epoque actuelle

Actuellement, les grandes sociétés d'eau minérale naturelle (Danone, Nestlé) ont leurs propres hydrogéologues.

La première carte des eaux minérales de la France, à l'échelle du millionième, a été dressée par J.J. Risler et publiée en 1973 par le BRGM, puis rééditée en 1994 et en 2005. Enfin un guide sur les eaux thermo-minérales a été édité en 2005.

Géothermie

Le premier forage géothermique en France a été celui de la Maison de la Radio à Paris, réalisé en 1961, captant la nappe de l'Albien, pour le chauffage et la climatisation des bâtiments.

Mais c'est surtout le premier choc pétrolier de 1973 qui déclencha un grand programme de recherches à partir de 1976, destiné à effectuer des économies d'énergie, ce qui provoqua de nouveaux types d'interventions pour les hydrogéologues : inventaire des potentiels géothermiques par bassins, régions et départements, réalisation de guides géothermiques, implantation et suivi de forages (BRGM, GÉOTHERMA, SOGREAH…), modélisation hydrodynamqiue et thermique des aquifères exploités (CFG, SOGREAH).

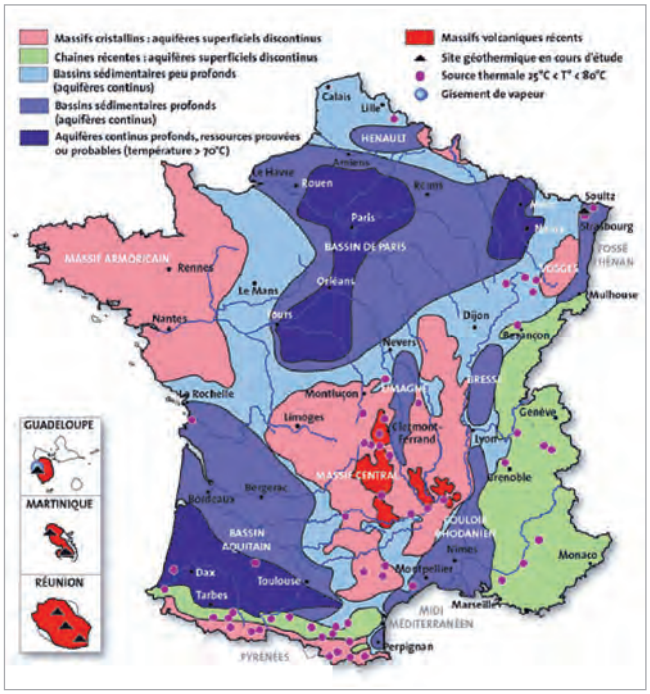
De 1976 à 1994, 73 forages basse énergie (50 à 100 °C) ont été réalisés pour le chauffage urbain ou de serres, dont 52 dans la région parisienne et 12 en Aquitaine.

Parallèlement, et jusqu'à l'époque actuelle, l'utilisation de la géothermie très basse température (10 à 15 °C) par pompe à chaleur eau/eau, a permis de développer le marché de l'hydrogéologie avec l'implantation de plusieurs milliers de forages, principalement en nappes alluviales.

Des cartes des zones favorables (cartes d'aptitude) à l'installation de ces équipements ont été établies dans plusieurs régions.

Par ailleurs, une opération géothermique haute température a été développée par le BRGM et la CFG à Bouillante (Guadeloupe) (cf. encadré p. 118).
Des forages profonds d'exploration, puis de production, ont été effectués, entre 1969 et 2000, qui ont permis d'obtenir une eau à 242 °C. Dès 1986, une première centrale était raccordée au réseau EDF produisant 3 % des besoins en électricité de l'île. En 2005, une nouvelle centrale " Bouillante II ", alimentée par trois nouveaux puits de production d'environ 1 000 m de profondeur, produisant 15 Mwe était mise en service, couvrant ainsi environ 7 % des besoins en électricité de la Guadeloupe.

Il convient également de citer la participation des hydrogéologues dans le Grand-Programme de Recherche fran-



Principaux réservoirs géothermiques de la France. *BRGM*

Forage de recherche géothermique de la Porte de Saint-Cloud - Point du Jour, à Paris. *GEOTHERMA*

Centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts. *BRGM Im@gé*

Installations de surface de stockage de gaz de Gourmay (Oise). *GDF*

Mesures de perméabilité in situ. *BRGM Im@gé*

co-allemand d'exploitation de la chaleur " roches fracturées sèches " dans le granite à Soultz-sous-Forêts (Nord de Strasbourg) (cf. encadré p. 119).

Le réseau de fractures naturelles a été reconnu jusque vers 3 500 mètres où les températures dépassent 165 °C puis jusqu'à 5 000 mètres où la température atteint 200 °C.

Depuis 2008 une centrale expérimentale de 2,2 MWe est en exploitation alimentée par un puits d'injection et deux puits d'extraction de 1 000 m de profondeur.

Stockages souterrains et sûreté des dépôts de déchets

Le stockage de gaz naturel en aquifère est largement pratiqué en France avec douze sites, principalement dans le Jurassique et le Trias du Bassin de Paris, et dans le Bassin Aquitain. Leur mise en service s'est étalée de 1956 à 1993.

Les hydrogéologues interviennent à l'amont pour la reconnaissance des réservoirs, le calcul des perméabilités et des volumes disponibles, l'influence sur les niveaux piézométriques des nappes et la modélisation.

GDF-Suez (et sa filiale STORENGY) possède des hydrogéologues qui assurent le suivi de ses propres sites et évaluent les impacts sur les nappes et les risques d'interférence avec les autres usages.

Les sociétés qui n'ont pas d'hydrogéologues, font suivre leurs stockages par leurs géologues " réservoir " et modélisateurs, avec appui du BRGM et d'ANTÉA, sous le contrôle d'hydrogéologues experts indépendants.

Les projets de stockage d'hydrocarbures en cavités naturelles ou artificielles ont également nécessité le concours de nombreux hydrogéologues, notamment de Géostock.

Centre d'Enfouissement Technique de Bucy-Saint-Liphard (Loiret) en 2012. D'avant en arrière : alvéole comblée et réaménagée, alvéole comblée en cours de réaménagement, alvéole en cours d'exploitation et, à droite, alvéole prête pour l'exploitation. À l'extrême droite, les bassins deau pluviale.
VEOLIA propreté / C.brissous@balloïde-photo.com

En France : Manosque, Mines de fer de May-sur-Orne, Mines de sel de Lorraine ; Craie de Rouen et de Gargenville (78) et à l'étranger (Australie, Corée du Sud, Chine, Royaume-Uni).

Déchets industriels et ménagers

Les études ont commencé dès le début des années 70 pour le stockage en surface des déchets ménagers et industriels, avec des inventaires régionaux de sites très peu perméables, favorables à l'implantation de décharges ou à l'enfouissement de cadavres d'animaux. Elles se sont appliquées à la caractérisation des sites (vulnérabilité de la nappe, mesures des très faibles perméabilités avec mise au point des matériels de mesures, rôle des couvertures…).

Plusieurs sites ont fait l'objet d'études expérimentales pour le stockage de boues industrielles ou de stériles miniers, pour le diagnostic de décharges d'ordures ménagères et pour la caractérisation des lixiviats (BRGM, INSA). Les résultats de ces travaux ont permis la mise au point de la réglementation française sur les conditions de stockage des déchets : barrières actives, barrières passives.

Déchets radioactifs

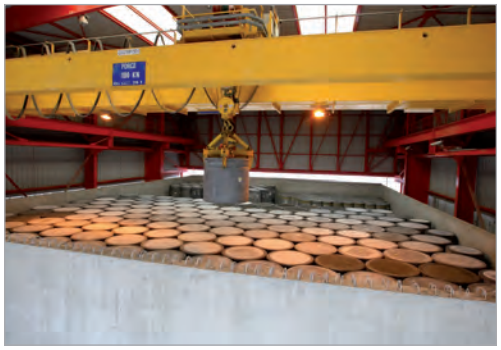
À partir de 1976, les hydrogéologues et hydrauliciens sont très concernés par le stockage des déchets radioactifs.

De 1976 à 1980, un inventaire des formations susceptibles d'accueillir des déchets est lancé par la Communauté européenne, à l'initiative de l'AIEA. Ce travail a fait appel aux services géologiques des 9 pays membres pour sélectionner les formations selon des critères hydrogéologiques (perméabilité, gradient hydraulique…). Un atlas coordonné par le BRGM, " Catalogue européen des formations géologiques présentant des caractéristiques favorables à l'évacuation des déchets radioactifs solidifiés de haute activité et/ou de longue vie " est publié par la Commission des Communautés européennes en 1981.

À la suite de ces travaux, en France, le site de Soulaines-Dhuis (Aube) est sélectionné et aménagé pour le stockage de déchets radioactifs de faible et moyenne activité. Ceux-ci seront stockés dans des containers placés dans des silos en béton, eux-mêmes implantés sur une butte argileuse dont les exutoires de la nappe superficielle sont " contrôlés " en périphérie. Il sera mis en service en 1992.

Parallèlement, des hydrogéologues travaillent sur le site de stockage " Manche " à La Hague, sur les sites de centrales nucléaires d'EDF, et au recensement des formations à prospecter (granite, schistes, argiles et sel) pour le stockage en profondeur des déchets à haute activité (BRGM, BURGÉAP).

Site de stokage de déchets radioactifs de Soulaines (Aube). *ANDRA/ P. Demail*



Containers de déchets radioactifs à Soulaines. *ANDRA/ P. Demail*

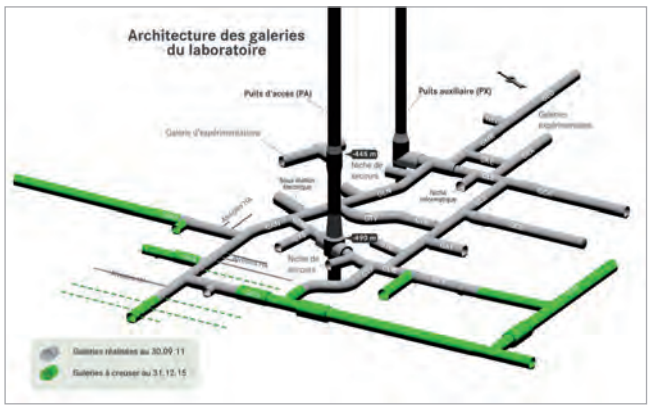
À partir de 1992, ils participent aux études sur plusieurs sites du Nord, du Centre et du Sud de la France : caractérisations géologiques et lithologiques, tests hydrodynamiques *in situ*, mesures de perméabilité et approches hydrogéologiques globales, calcul de l'hydrodispersion des pollutions radioactives de longues périodes.

Les barrières de confinement pour isoler hydrauliquement la zone de stockage proprement dite sont modélisées (ANDRA, SOGREAH).

En 1999, le site de Bure (Meuse) concernant les Argiles callovo-oxfordiennes situées entre 420 et 560 mètres de profondeur environ, précédemment reconnues à Montcornet (Aisne), est retenu pour y implanter un laboratoire souterrain.

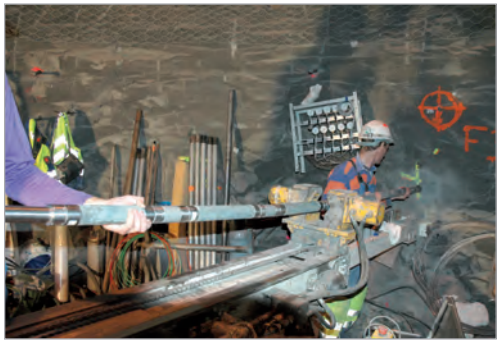
Les résultats les plus marquants qui ont conduit à sa sélection ont été :

- une reconstitution fine de l'assemblage géologique du Bassin de Paris,
- une modélisation hydrogéologique de l'ensemble du Bassin de Paris (ANTEA et IFP),
- des valeurs de très faibles perméabilités : 10^{-12} à 10^{-14} m/s,
- une approche hydro-géochimique très approfondie pour anticiper la diffusion de produits dans les argiles.



Architecture du Laboratoire souterrain de Bure (Meuse). *ANDRA*

Galerie du Laboratoire souterrain de Bure. *ANDRA/P. Demail*


Mesures de faible perméabilité par tests hydrauliques dans les argilites du site de Bure, par introduction d'un multi-opérateur dans un forage radial. *ANTEA/L. Bertrand*

Le laboratoire souterrain constitue un outil unique en France. Son réseau de galeries, situé au milieu de la couche d'argilites à 490 mètres de profondeur permet aux scientifiques d'observer et d'étudier directement et en temps réel le milieu géologique.

En fin d'année 2011, le programme expérimental réalisé comportait 450 sondages en surface et dans les galeries, 1 290 mètres de galeries souterraines, 11 500 mètres de carotte, 3 200 capteurs installés dans la roche. les galeries de reconnaissance du laboratoire souterrain font toujours l'objet de mesures hydrogéologiques et géotechniques détaillées (géothermie, perméabilité et comportement des argiles).

La mise en service du centre de stockage " Cigeo " à Bure/Saudron, dont l'implantation précise reste à déterminer, est prévue pour 2025.

Aménagement - Risques naturels

En aménagement agricole, la Société d'Aménagement des Coteaux de Gascogne a fait appel aux hydrogéologues pour prise en compte des eaux souterraines pour l'organisation de l'irrigation des terres agricoles.

Au Maroc, BURGÉAP a apporté ses compétences à l'aménagement de la vallée du Sous.

En Génie Civil, les hydrogéologues ont apporté leur concours à la réalisation de grands travaux tels que :

- le tunnel du canal du Nord dans la Somme en 1961 (BRGM) et le canal du Rhône (BURGÉAP et CNR) ;
- les métros de Lille et Lyon (BRGM) ;
- des centrales nuécléaires (Blayais, Fessenheim, Nogent-sur-Seine (BRGM) ;
- le tunnel sous la Manche et le tunnel ferroviaire Lyon-Turin, la galerie de transfert des eaux Est-Ouest à La Réunion ;
- de nombreux parkings et sous-sols, tranchées ferroviaires (modélisation de l'impact sur l'écoulement des nappes, conception et suivi des rabattements de nappes durant les travaux : A6, Col du Grand Bœuf - 38, gare du RER EOLE à Paris - Saint-Lazare (BURGÉAP). SOGREAH a construit un modèle général de la nappe au confluent des vallées de l'Isère et du Drac à Grenoble, destiné à caler la cote des seuils en rivière, des tranchées autoroutières, la stabilisation de la nappe autour du Synchrotron, et l'impact des fondations profondes.
- la création de barrages (Chasma sur l'Indus, centrale électrique de Green Up dans l'Ohio) pour le calcul de l'épuisement des fouilles (SOGREAH) ;
- des aménagements portuaires (piézomètrie, intrusion d'eau salée (SOGREAH).

Lors des projets de réalisation du Canal de la Durance dans les années 50, l'impact éventuel sur le niveau de la nappe alluviale a été suivi de très près par EDF et devant l'inquiétude des agriculteurs, des essais de réalimentation de la nappe par bassins d'infiltration, ont été menés.

À la même époque, les dispositifs de réalimentation de la nappe alluviale du Rhône (hydrogéologie corrective) ont été étudiés par les hydrogéologues de la CNR et du BURGÉAP, à l'aplomb des barrages hydrauliques sur le fleuve (Donzère-Mondragon).

Ces ingénieurs ont dû gérer aussi la prévision et la gestion des remontées de nappes sous les zones urbaines (Lille, Lyon, Paris) suite à l'arrêt des prélèvements d'eau par les forages industriels (BRGM, BURGÉAP).

Depuis 1980, dans le cadre des études d'impact sur l'environnement de travaux ou projets d'aménagement, un " volet hydrogéologique " est obligatoire. L'intervention d'hydrogéologues paraît donc indispensable pour la plupart des travaux souterrains (carrières, parkings souterrains, canaux, tunnels…).

En matière de risques naturels, les hydrogéologues ont participé à la prévention des glissements de terrain par la conception et la réalisation de travaux de drainage comme à Biarritz pour la falaise de la Côte des Basques (BRGM).

Exploitation minière

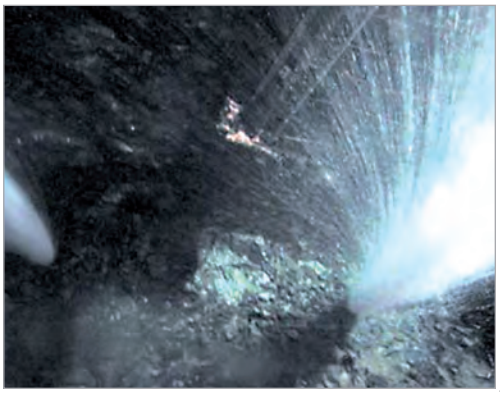
Dans le domaine minier, de nombreuses contributions du savoir-faire des hydrogéologues français ont été apportées aux exploitants, en France et à l'étranger, pour traiter les problèmes d'exploitation et d'environnement liés à l'extraction et à la stabilité des mines à ciel ouvert (rabattement de nappes, drainages, impacts sur l'aquifère) ou d'alimentation en eau :

- Grèce et Midi de la France, Marquesado en Espagne, phosphates de Taïba au Sénégal (BURGÉAP) ;
- phosphates de Laayoune au Maroc et de Gafsa en Tunisie, autres interventions en Indonésie, Iran (SOGREAH).

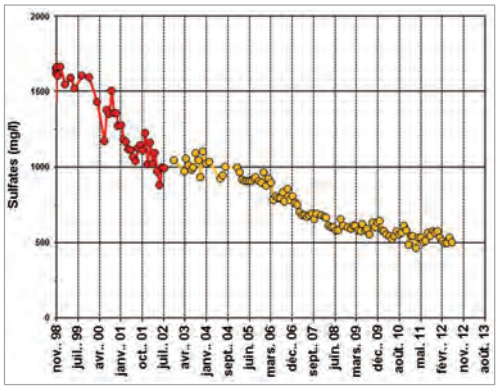
L'époque de l'après-mines les fait également beaucoup intervenir, notamment pour évaluer les conséquences de l'arrêt des pompages d'exhaure miniers et pour l'étude des remontées de nappes et de l'évolution de la qualité des ressources en eau sus-jacentes (bassins miniers de Lorraine, du Nord - Pas-de-Calais).

Ainsi, pour le Bassin minier du Nord - Pas-de-Calais, un modèle hydrodynamique complexe a été établi en 1999 afin de prévoir les incidences de l'arrêt des exhaures des mines de houille, les remontées de nappes et le régime des eaux de surface (BURGÉAP, IFP, ISSEP).

Travaux de drainage et de stabilisation de la falaise de la Côte des Basques à Biarritz.
Ville de Biarritz

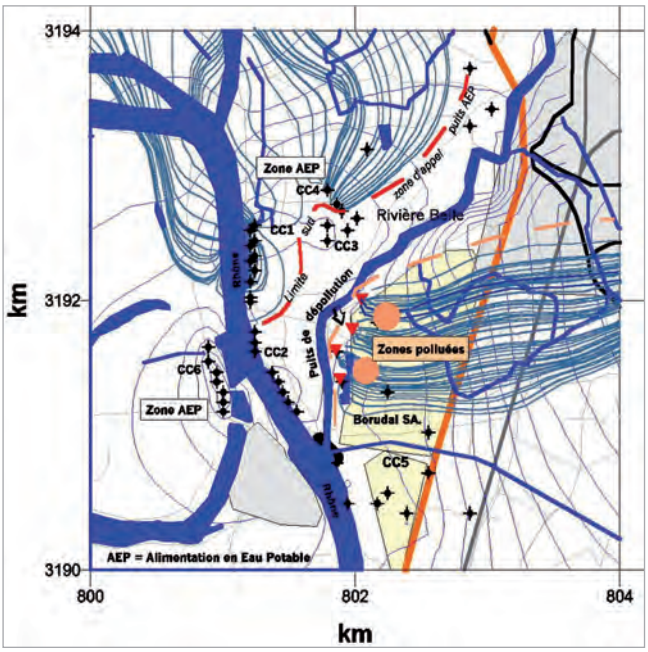


Venue d'eau sous pression dans la galerie hydraulique de Salazie-Amont (Réunion).
BRGM Im@gé/ J.-L. Giafferi

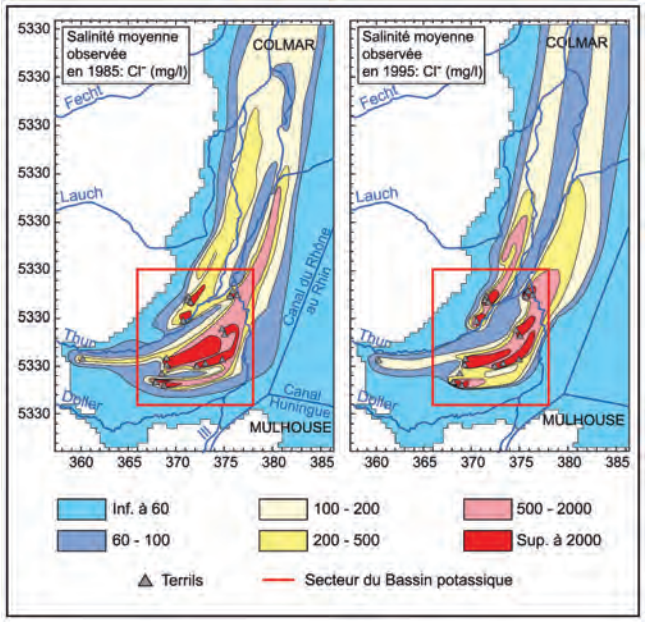


Evolution des teneurs en sulfate de l'eau d'exhaure à Moyeuvre (Moselle).
BRGM/SGR/LOR

Exhaure des mines de fer à Moyeuvre (Lorraine). Rejet de 3 m3/s dans l'Orne.
S. Ramon, 2012



Modèle de piégeage des contaminants dans la nappe alluviale du Rhône. *D. Pennequin*



Modélisation prévisionnelle de la salinité de la nappe d'Alsace de 1985 à 1995. *BRGM*

En Lorraine, la dernière phase du processus d'interaction entre l'exploitation minière et le développement des connaissances en hydrogéologie quantitative correspond à la fin du XXe siècle avec la fermeture et l'ennoyage des exploitations. De nombreux hydrogéologues contribuent à cerner les interactions hydrauliques et géochimiques entre les aquifères et l'arrêt des exhaures dans le but de maîtriser les conséquences susceptibles d'être dommageables pour l'utilisateur, l'effet de l'exploitation des mines souterraines modifiant sensiblement les écoulements au fond et en surface (rejets d'exhaure). Lors de l'arrêt des pompages, après la phase d'ennoyage des mines, les eaux se fraient des chemins nouveaux vers la surface et peuvent modifier le réseau hydrographique de manière significative. Simultanément, la qualité des eaux se modifie en se chargeant en sulfates dès lors que le minerai comporte des sulfures (y compris dans le charbon). Cette évolution est réversible après un nombre fini de renouvellements des eaux d'ennoyage. Ces études jouent un grand rôle dans la programmation des dispositifs d'alimentation en eau potable des zones minières concernées.

Sites et sols pollués

À partir des années 80, de nouvelles préoccupations environnementales apparaissent avec la présence de centaines de sites pollués par l'industrie, l'exploitation minière, certains étant le siège de " pollutions historiques ". La réglementation impose leur surveillance et leur décontamination si nécessaire.

Tout naturellement les hydrogéologues s'investissent dans ce domaine.
Des recherches sont menées sur des sites expérimentaux pour mesurer la migration des polluants métalliques dans les sols : boues industrielles à Mézières-lez-Cléry - 45, digue à stériles de la mine Pb-Zn de Saint-Salvy - 82 et dans les berges de cours d'eau : Rhône au Sud de Lyon - 69, Deûle à Wavrin - 59 (BRGM).

D'autres recherches sur les transferts de polluants dans les aquifères (hydrocarbures, solvants chlorés) sont effectuées sur modèles physiques (IFARE) ou mathématiques (École des Mines, IFARE).

Des techniques de décontamination par piège hydraulique, venting, biodégradation sont mises au point et des guides méthodologiques sont publiés.

Des travaux de décontamination des nappes polluées par les anciens stockages industriels et miniers, et les déversements accidentels de produits polluants (Alsace, Vallée du Rhône, Grand Stade de France, Bassin minier du Nord

- Pas-de-Calais…) sont réalisés. Certaines pollutions sont confinées par mise en place de mur drainant (Arcelor-Mittal) ou paroi moulée (Thann et Mulhouse)..

Une nouvelle discipline que l'on peut qualifier d' " hydro-géologie-réparatrice " apparaît. Plusieurs bureaux développent ce nouveau marché qui exige une haute expertise (BURGÉAP, ANTEA, SOGREAH).

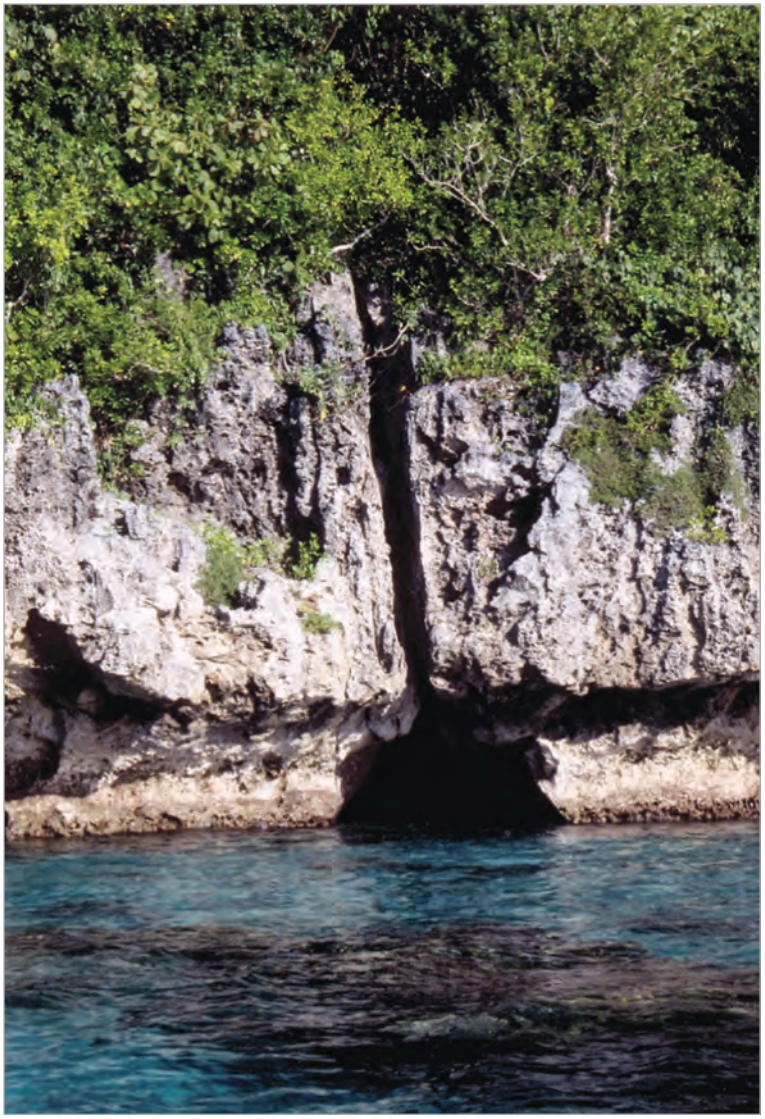
Le plus grand programme de dépollution réalisé en France est certainement celui de la nappe alluviale de la plaine d'Alsace, dans la région de Mulhouse, fortement contaminée par les stériles de chlorure de sodium des MDPA, sur plus de 50 km à l'aval. Un dispositif exceptionnel de puits de fixation, de dépollution, et de dissolution des terrils par aspersion a été mis en œuvre durant plus de 30 ans.

Dissolution par aspersion du terril «Fernand» des MDPA à Wittenheim (Haut-Rhin). *J.-C. Roux, 1998*

En 1990, l'Académie des Sciences se préoccupe de la pollution des nappes d'eau souterraine en France et son " Comité de l'environnement ", présidé par C. Fréjacques, commande un rapport à un groupe d'experts présidé par C. Guillemin, inspecteur général du BRGM et correspondant de l'Institut, et coordonné par J.-C. Roux, hydrogéologue au BRGM. Ce rapport n° 29 de l'Académie des Sciences, largement diffusé en 1991 auprès des Élus, des Services de l'État, de la communauté scientifique et des associations concernées, a été présenté à l'Académie le 8 avril 1992 au cours d'une réunion-débat " L'avenir des eaux souterraines ".

Claude Guillemin (BRGM). A gauche, C. Frejacques (Académie des Sciences) et J. Vial (CSHPF). Paris, avril 1992

Rapport n° 29 de l'Académie des Sciences : *Pollution des nappes d'eau souterraine en France*, 1991



Emergence d'eau saumâtre à la faveur d'une fracture karstifiée sur la côte occidentale de l'île de Lifou (Nouvelle Calédonie) *M. Lepiller, 2005*

Le début du XXIe siècle : une grande ouverture vers les autres et à d'autres domaines du métier d'hydrogéologue

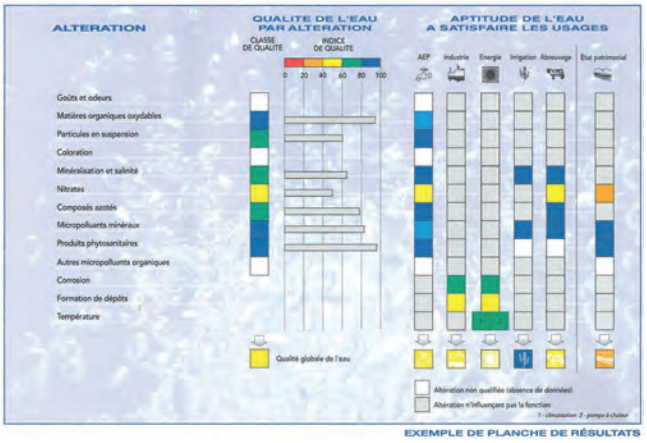
La Directive Cadre sur l'Eau : une organisation à l'échelle européenne

En France, comme en Europe, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), en 2000, forge le paysage de l'hydrogéologie actuelle et future. Elle introduit notamment un concept d'unité de gestion que sont les masses d'eau et la notion de bon état. Elle fixe des objectifs, un cadre de travail commun pour toute l'Europe et prévoit des pénalités en cas de non-respect des échéances. Elle préconise la transparence, la participation du public dans le schéma décisionnel et exige, non seulement la viabilité économique des systèmes de " gestion des ressources – alimentation en eau " (l'eau paie pour l'eau), mais aussi le recours à l'outil économique (analyse coût-efficacité, coût-bénéfice…) pour la gestion durable des ressources, et plus spécifiquement, pour la quantification des différents éléments à prendre en compte dans les processus de décision. L'analyse économique est même poussée loin, jusqu'à placer des valeurs sur des biens environnementaux.

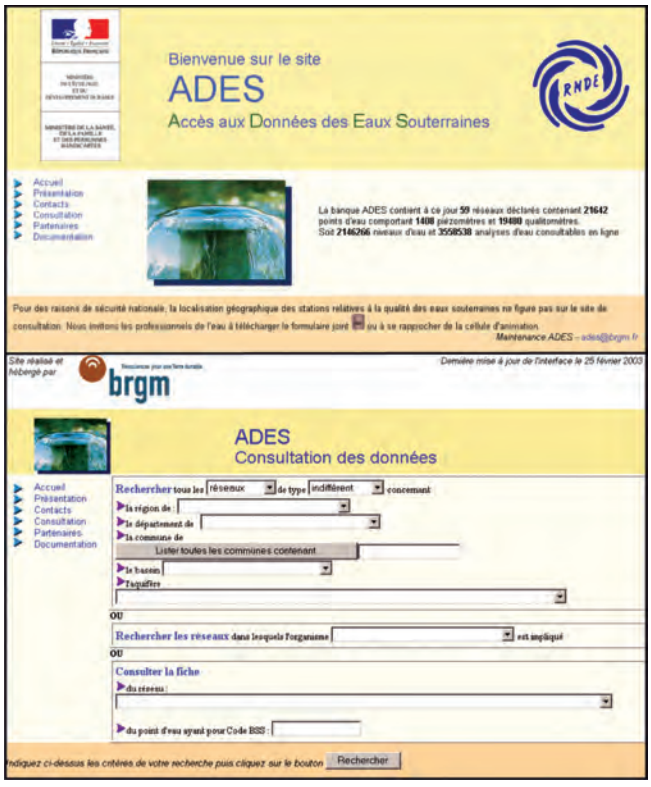
La DCE entraîne ainsi une révision des entités hydrogéologiques ; en France, deux options sont prises qui s'appuient sur les travaux passés : le découpage en unités de gestion, les masses d'eau (environ 500 masses d'eau) et le découpage plus fin en unités physiques, les aquifères, qui sert de base au premier.

Un réseau piézométrique et un réseau pour le suivi de la qualité des eaux sont mis en place au plan national en harmonisant, rationalisant et étendant les anciens réseaux, dans la continuité du réseau " patrimonial ", initié après le rapport de 1996 du Conseil Général des Mines sur la Gestion durable des eaux souterraines.

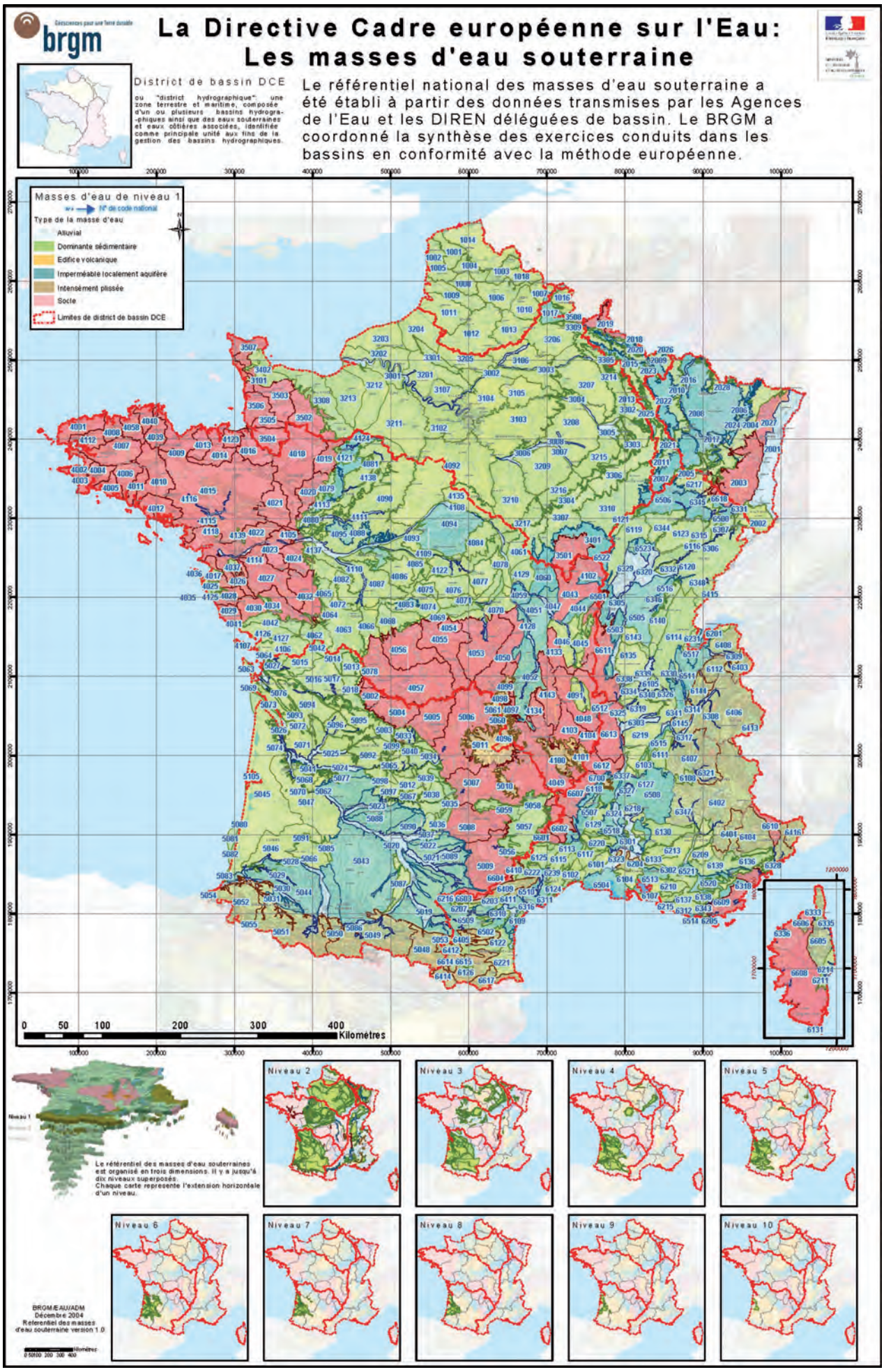
Un grand nombre de nouveaux outils sont élaborés, fondés sur les bases de données et les SIG comme " SEQ EAUX souterraines ", une grille fine de la qualité des eaux souterraines, ou encore ADES, la banque nationale de données nationales sur les eaux souterraines, conçue et gérée par le BRGM pour le compte du MEDAD (Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durable), accessible par Internet, et qui améliore et étend fortement le champ d'action de l'ancien ONQUES.



Grille de la qualité des eaux souterraines «SEQ Eaux»



Site ADES



Carte des masses d'eau souterraine en France. *BRGM, 2004*

Face aux exigences de la DCE, de nombreux outils d'aide à la décision se développent partout, mettant l'emphase sur la visualisation pédagogique des résultats, comme le modèle intégré de la vallée de l'Hérault qui intègre les aspects hydrauliques, économiques et comportementaux du contexte et des acteurs, et qui permet de visualiser concrètement les conséquences de chaque politique de gestion du bassin de l'Hérault.

La DCE, par ailleurs, conduit également au développement de méthodes originales, comme celle élaborée pour pouvoir reconstituer la qualité naturelle des eaux (fond géochimique), et d'outils techniques innovants, comme les isotopes de l'azote et du bore qui permettent, en lien avec des modèles à cheminement inverse, de remonter aux sources de pollutions nitratées. Elle mène de plus en plus les hydrogéologues à s'intéresser de près aux pollutions diffuses (un grand défi du XXIe siècle) et aux eaux de surface qu'ils savent mieux que quiconque connectées aux eaux souterraines.

Elle n'est pas non plus étrangère à l'accélération de la protection des captages d'eau en France (55 % des ouvrages protégés en 2009, 66 % en 2012), liée à la simplification de la procédure administrative bien que les objectifs du Plan National de Santé et Environnement (PNSE) (80 % de forages protégés en 2008 et 100 % en 2010) ne soient pas atteints.

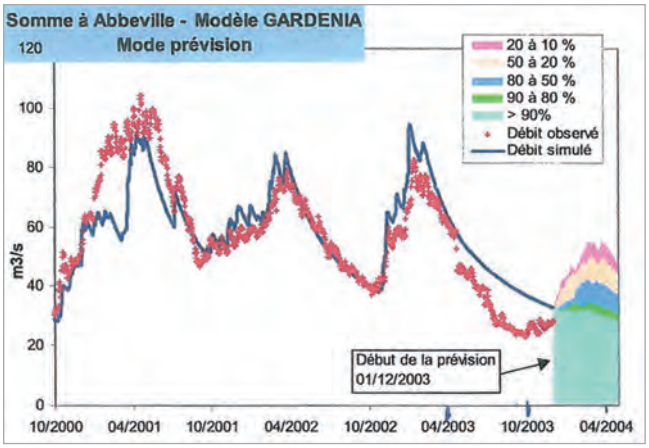
Changements globaux, changements climatiques et gaz à effet de serre

Les changements dits " globaux " et l'évocation médiatique du changement climatique et de la problématique du rejet des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, accélèrent l'élaboration d'une nouvelle génération de modèles mathématiques : les modèles complexes dits " couplés hydraulique-chimie réactive ", initialement développés pour des problèmes de pollution réactive avec le milieu, et aujourd'hui utilisés de manière croissante dans le domaine de la séquestration du CO_2 qui occupe un nombre de plus en plus important d'hydrogéologues.

En effet, depuis la fin des années 90, l'enfouissement du gaz carbonique dans les aquifères profonds salés fait l'objet de nombreuses études et recherches. Les études de site sont en plein développement en France et en Europe par de grands organismes (IFP, GDF, BP, BRGM) en partenariat.

Les hydrogéologues s'intéressent aussi aujourd'hui aux problèmes des crues et des inondations. Les grandes crues de la Somme en 2001 ont notamment permis de démontrer l'importance de l'apport des eaux souterraines dans le déclenchement des inondations en milieu sédimentaire (phénomènes de remontée de nappe), remettant par

Inondation dans la vallée de la Somme en avril 2001. *BRGM Im@gé*



Prévision des débits de la Somme à l'aide du modèle GARDENIA. *BRGM Im@gé*

là même en question, les principes acceptés de longue date de genèse des crues, dans certains cas au moins. Les équipes du BRGM ont ainsi mis au point un nouvel outil de prévision du risque de hautes eaux et d'inondation, fondé sur l'ensemble du cycle de l'eau, selon un principe pluie – transfert – niveau – débit. Ce dernier est opérationnel depuis l'hiver 2001-2002 pour la Somme.

Ils reprennent par ailleurs la problématique des sécheresses et de leurs impacts sur les ressources en eau, et développent des nouvelles approches palliatives qui s'appuient notamment sur le concept de gestion active des ressources en eau, qu'ils poussent jusqu'à l'utilisation multiple de l'eau et la réutilisation des eaux usées.

Sur la scène internationale, les objectifs du millénaire et les changements globaux ouvrent des perspectives importantes aux jeunes hydrogéologues.

La grande ouverture…

Ce début de XXIe siècle continue donc la tendance qui s'est amorcée depuis la fin des années 1980, en l'amplifiant beaucoup. La gestion des ressources en eau appelle une approche franchement pluridisciplinaire. L'hydrogéologue s'ouvre à d'autres métiers et est obligé d'acquérir de nou-

Les présidents du Comité Français d'Hydrogéologie

De gauche à droite : G. Castany (1973-1993), J. Margat (1993-2001), J.-C. Roux (2002-2009) et B. Blavoux (2010-2013)

Orléans, 1967

Orléans, mai 2011

velles compétences dans différents domaines. Il s'ouvre aux sciences molles : la gestion des ressources en eau doit prendre en considération les dimensions sociales (souhaits, besoins des acteurs) et les dimensions économiques inscrites dans une analyse globale des intérêts et contraintes du système considéré. L'hydrogéologue a aujourd'hui souvent une double compétence, chose rare il y a encore 10 à 15 ans. Il lui faut, par contre, redécouvrir le terrain… car une bonne gestion des ressources en eau doit se fonder sur des modèles correctement structurés et calibrés, qui doivent, à cet effet, pouvoir bénéficier de données représentatives et fiables collectées sur le terrain en toute connaissance de cause.

La communauté hydrogéologique française

Au début des années 2010, les professionnels de l'hydrogéologie française, chercheurs et praticiens, qui consacrent la totalité ou la grande majorité de leur activité à la recherche fondamentale et appliquée, à l'enseignement, ainsi qu'aux travaux dans les différentes disciplines concernant les eaux souterraines, sont estimés à un millier environ. Ce chiffre est relativement stable depuis une vingtaine d'années.
Ces spécialistes de la recherche et de l'étude des eaux souterraines (hydrogéologues, hydrodynamiciens, hydrogéochimistes, informaticiens) sont répartis pour l'essentiel, entre les organismes et sociétés suivants :

- les universités (Laboratoires d'hydrogéologie d'Avignon, Besançon, Bordeaux, Lille, Montpellier, Orléans, Paris, Rennes, Poitiers) ;
- le CNRS ;
- l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSMP) et son centre d'informatique géologique de Fontainebleau (CIG) ;
- le BRGM qui exerce une activité de service public et d'appui pour le compte du ministère chargé de l'environnement et de ses services régionaux décentralisés (DREAL), des Agences de l'eau et des collectivités territoriales (régions et départements) ;
- l'ANDRA ; l'IRD ;
- les DREAL (ex. DIREN) ;
- les CETE ;
- les Agences de l'eau ;
- les ARS et les DDT (ex. DDASS et DDAF) ;.
- des conseils généraux et conseils régionaux,
- de grands bureaux d'études (ANTEA, ARTELIA (ex. SOGREAH), BURGEAP, GÉOSTOCK, GINGER, SAFEGE) ;
- de nombreux autres bureaux d'études et consultants ;
- les sociétés privées du domaine de l'eau (DANONE, NESTLÉ, LYONNAISE DES EAUX, VÉOLIA), ou autres (GDF, SUEZ, SNCF, RATP, CNR) ;
- les collectivités locales (communes, communautés de communes et syndicats intercommunaux).

Depuis 2009, l'armée française a recruté un hydrogéologue senior pour l'expertise de l'alimentation en eau potable des sites militaires, essentiellement à l'étranger.

Plusieurs associations représentent les hydrogéologues et facilitent leurs échanges scientifiques et techniques au moyen de colloques, visites techniques, publications :

- l' " Association des hydrogéologues des Services publics (AHSP) " ;
- le " Comité Français d'Hydrogéologie (CFH) " qui est également le groupe français de l' " Association Internationale des Hydrogéologues (AIH) " ;
- les " Géologues Indépendants de France (GIF) " ;
- l' " Union Française des Géologues (UFG) " jusqu'en 2012, puis la " Société Géologique de France " (SGF).

Seules l'AHSP et le CFH/AIH regroupent exclusivement des spécialistes des eaux souterraines.

Logo AIH-France «Gestion active des aquifères»

CONCLUSIONS

La France a été un des berceaux de l'hydrogéologie dès le 19e siècle. L'hydrogéologie française a une double racine : d'une part, les précurseurs hydrauliciens du 19e siècle et leur rencontre avec les géologues, et de l'autre, les études et les recherches effectuées dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique, dont les eaux souterraines sont une composante majeure des ressources en eau utilisables, à valoriser et à préserver.

Son évolution a résulté d'une conjugaison et interaction constante entre les sciences exactes physico-mathématiques, sciences et techniques de l'eau et sciences de la terre.

L'apparition progressive, en une soixantaine d'années, de nouvelles techniques et méthodes de prospection, de forages, de diagraphie, de mesures et de modélisation a profondément modifié le métier d'hydrogéologue et contribué à l'avancée des connaissances locales et régionales des aquifères et eaux souterraines.

Spécialité de la géologie appliquée à l'origine, l'hydrogéologie est devenue une science pluridisciplinaire et une profession à part entière, mais aussi une matière à enseignement et à recherche avec de nombreuses applications concrètes et à objectifs multiples.

L'hydrogéologie a beaucoup contribué aux progrès des connaissances et des utilisations des eaux souterraines, en France comme dans d'autres pays, champs d'intervention de l'expertise française, à la sensibilisation des pouvoirs publics sur la place des eaux souterraines dans la politique de l'eau, et notamment sur l'intégration des eaux souterraines dans la gestion des ressources en eau.

Aujourd'hui, on estime à un millier le nombre de spécialistes des eaux souterraines en France (hydrogéologues, hydrauliciens, hydrogéochimistes) qui exercent dans les domaines de la recherche, de l'enseignement et des études appliquées, œuvrant au sein des Universités, des Bureaux d'études, de l'Industrie, en France ou à l'Étranger, ou des Administrations et Collectivités locales (cf. encadré p.74).

Il faut noter aussi que plusieurs hydrogéologues d'origine étrangère (Allemagne, Pologne, Russie, Suisse…) ont largement apporté leur contribution au développement de l'hydrogéologie française.

Les interventions des hydrogéologues ne peuvent que se développer à l'avenir devant la nécessité de toujours mieux connaître la structure et la ressource des aquifères, mieux gérer et protéger la qualité des eaux souterraines et d'en améliorer leur qualité.
Il faut garder à l'esprit que certaines nappes captives, bien protégées, sont déjà répertoriées comme " ressource ultime ".
La reconquête de la qualité des eaux souterraines passe par la décontamination du sol et des nappes des anciens sites industriels et miniers (après-mines), et la réduction des pollutions diffuses.

La raréfaction des ressources pétrolières et le renchérissement du prix de l'énergie conduiront inévitablement à un développement des recherches géothermiques dans le cadre des énergies renouvelables, et, éventuellement à celles pour l'appui à l'exploitation des gaz de schistes ou de houille..

La sûreté des stockages souterrains de substances utiles comme de déchets dangereux, notamment radioactifs, restera aussi un objectif majeur des études hydrogéologiques.

Enfin, les recherches et études de sites pour le confinement du CO_2 dans les aquifères profonds devraient se développer dans le cadre de la lutte vis-à-vis du réchauffement climatique.

Dans plusieurs régions du globe, surtout à climat aride et semi-aride, à ressources en eau rares, la croissance démographique accentue l'affaiblissement des ressources par habitant et les situations de pénurie. En conséquence, le rôle des hydrogéologues sera fondamental pour assister la gestion économe et la protection des eaux souterraines à réserver aux approvisionnements en eau potable et aux productions agroalimentaires prioritaires.

En outre, les changements climatiques ne peuvent qu'accroître la raréfaction des ressources en quantité et en qualité et de nouvelles méthodes de gestion devront être recherchées comme la mobilisation des nappes lors des années déficitaires ou le stockage inter-saisonnier des eaux.

Agence de l'Eau
Adour Garonne

90, rue du Férétra - 31078 Toulouse cedex 4 - Tél. : 05 61 36 37 38 - Fax : 05 61 36 37 28
www.eau-adour-garonne.fr

LES DÉLÉGATIONS ET LEURS DÉPARTEMENTS

Quartier du Lac Rue du Pr-André-Lavignolle 33049 Bordeaux Cedex Tél. : 05 56 11 19 99 Fax : 05 56 11 19 98	3, bd Edouard Lachaud 19100 Brive Tél. : 05 55 17 75 55 Fax : 05 55 17 75 74	7, passage de l'Europe 64000 Pau Tél. : 05 59 80 77 90 Fax : 05 59 80 77 99	Rue de Bruxelles Bourran - BP 3510 12035 Rodez Cedex 9 Tél. : 05 65 75 56 00 Fax : 05 65 75 56 09	46, av. du Général Decroute Basso Cambo 31100 Toulouse tél. : 05 61 43 26 80 Fax : 05 61 43 26 99
Départements : 16-17-33-47-79-86	Départements : 15-19-24-63-87	Départements : 40-64-65	Départements : 12-30-46-48	Départements : 09-11-31-32-34-81-82

Plaquette «Journée Mondiale de l'eau». *AEAG*

Chapitre VII

Principaux organismes ayant joué un rôle majeur dans le développement de l'hydrogéologie française

Préambule

Ce chapitre est l'œuvre, pour l'essentiel, de collaborateurs dont les contributions ont enrichi cet ouvrage. En effet, pour mettre en lumière et valoriser les apports de différents organismes contemporains – universités, bureaux d'études, collectivités territoriales, agences de l'eau – à l'histoire et au développement de l'hydrogéologie française, il nous a semblé opportun et souhaitable de donner la parole à des acteurs présents ou anciens de ces organismes, en toute liberté et sous leur seule responsabilité.

Nous les remercions de leur contribution.

J. Margat D. Pennequin J.-C. Roux

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE — UNIVERSITÉ DE PARIS

FACULTÉ DES SCIENCES

ANNÉE UNIVERSITAIRE 1964-1965

GÉODYNAMIQUE APPLIQUÉE

Enseignement du 3ème Cycle

Le Certificat de Géodynamique Appliquée est destiné aux ingénieurs, chercheurs scientifiques et enseignants.

Il les conduit à un DOCTORAT (de spécialité). Le Certificat d'Etudes Supérieures du 3e Cycle doit être obtenu au cours de la première année. Le Doctorat est préparé après cet examen, pendant la deuxième année.

Ces spécialités sont utilisées dans les domaines de l'Hydrologie, de l'Hydrogéologie, du Génie Rural, du Génie Civil, du Pétrole de la Pédologie et de l'Agronomie. Elles permettent de se présenter à l'O.R.S.T.O.M.

Conditions d'inscription

1° Pour les Licenciés es-Sciences, les études ne peuvent être suivies avec fruit que par les licenciés ayant un Certificat de Géologie Dynamique.

2° L'enseignement est ouvert aux ingénieurs et aux chercheurs s'intéressant aux Sciences de la Terre, sous réserve d'une dispense spéciale et de diplômes agréés. Des inscriptions provisoires peuvent être prises dans l'attente des dispenses.

Des bourses peuvent être accordées aux étudiants régulièrement inscrits au 3e cycle.

Enseignement commun

M. **GLANGEAUD,** Professeur à la Sorbonne : **Protection et Répartition des ressources en eau.**
M. le Dr **COIN,** Directeur du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris : **Hygiène et législation des eaux.**
M. **GEZE,** Professeur à l'Institut National Agronomique : **Hydrogéologie et Pédologie générales.**
M. **QUENEY,** Professeur à la Sorbonne : **Climatologie.**
M. **LETOLLE,** Maître Assistant : **Introduction à la Géochimie des isotopes.**
M. **LEVEQUE,** Ingénieur au B.R.G.M. : **Géotechnique - Protection des sols et des ouvrages.**
M. **BILLY,** C.E.A. : **Probabilités - Statistiques.**

En plus de l'enseignement commun, les étudiants choisiront entre les trois options suivantes :

I — OPTION : Hydrologie

M. **CASTANY,** Ingénieur en Chef au B.R.G.M. : **Hydrogéologie.**
M. **REMENIERAS,** Directeur des Etudes hydrauliques à l'E.D.F. : **Hydrologie de surface.**
M. **DARS,** Professeur à la Faculté des Sciences de Paris : **Hydrogéologie africaine.**
M. **URBAIN,** Directeur du Laboratoire d'Hydrologie à l'I.N.H.C. : **Sources thermominérales.**
M. **GRAVELLE,** Maître Assistant : **Etudes pratiques d'hydrogéologie.**
M. **BLAVOUX,** Assistant : **Limnologie.**
M. **MILLECAMPS,** Attaché de Recherches au C.N.R.S. : **Glaciologie.**

Stage au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon (1 mois).

II — OPTION : Pédologie

M. **AUBERT,** Directeur à l'O.R.S.T.O.M. : **Classification des sols.**
M. **HENIN,** Professeur à l'Institut National Agronomique : **Physique des sols et applications à l'Agronomie.**
M. **DUPUIS,** Professeur à la Faculté des Sciences de Poitiers : **Cartographie des sols.**
Mlle **DUPLAIX,** Maître de Recherches au C.N.R.S. : **Pétrographie sédimentaire et étude des minéraux lourds.**

Stages et excursions.

III — OPTION : Géochimie des eaux et des sols

M. **HENIN,** Professeur à l'Institut National Agronomique : **Chimie des sols.**
M. **KULBICKI,** Chef des Services Géochimiques à la S.N.P.A. : **Mode de formation des argiles. Applications géodynamiques.**
M. **LE PEINTRE,** Conseiller scientifique au C.E.A. et M. **PINTA,** O.R.S.T.O.M. : **Chimie des éléments traces.**
M. **GENNESSEAUX,** Maître Assistant : **Physicochimie des eaux naturelles : méthodes d'analyse et interprétations.**
M. **FONTES,** Assistant : **Les isotopes stables dans les cycles hydrologiques. Paléoclimatologie isotopique.**
M. **OLIVE,** Assistant : **Les éléments** radioactifs dans le cycle de l'eau.

Travaux pratiqués à Paris et au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.

Pour tous renseignements, s'adresser, écrire ou téléphoner au Laboratoire de Géologie Dynamique (M. GLANGEAUD, Faculté des Sciences, 1, Rue Victor Cousin, Paris (5e). Tél. : ODEon 24-13 (poste 238) - Escalier E - 2e étage.

Inscriptions au Secrétariat de la Faculté des Sciences de Paris.

VU ET APPROUVÉ :

Le Recteur, Président du Conseil de l'Université, Membre de l'Institut,

Jean ROCHE.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Marc ZAMANSKY.

Imp. CHASTRUSSE & Cie - Brive

Programme de l'enseignement de 3e cycle de Géodynamique appliquée de la Faculté des Sciences de Paris (année universitaire 1964-1965)

L'UNIVERSITÉ

La formation à l'Université

Au départ, une application de la géologie

Comme cela a été détaillé dans la première partie de l'ouvrage, l'hydrogéologie française a pris son essor et fait école dès le XIXe siècle grâce aux travaux, souvent parallèles, rarement conjugués, d'ingénieurs et de géologues. Les pères fondateurs furent d'abord des ingénieurs versés en hydraulique qui visaient des objectifs pratiques d'alimentation urbaine en eau potable (Belgrand à Paris, Darcy à Dijon, Imbeaux, ingénieur des Ponts et Chaussées et médecin…). Dans cette seconde moitié du XIXe siècle toujours, de grands géologues (Gosselet, Daubrée, De Lapparent…) établissent le rôle des conditions lithostratigraphiques et structurales sur la constitution et le fonctionnement des aquifères.

À cette époque se situent les premières grandes explorations spéléologiques avec Martel en particulier. Fournier explore systématiquement le Jura et insiste sur l'absence de filtration des eaux et les risques sanitaires liés aux rejets dans les gouffres ; ces observations et celles de Martel, intoxiqué par l'eau de la source de Graudenc polluée par un cadavre de veau jeté dans un gouffre, seront à l'origine de la première loi de protection des eaux souterraines. Ensuite, L. Glangeaud , puis M. Dreyfuss s'impliqueront dans des applications liées à la recherche de nouvelles ressources en eau et à leur protection.
Cette dualité d'approche s'est poursuivie jusqu'au milieu du XXe siècle.

L'émergence d'enseignements spécialisés de 3e cycle d'hydrogéologie en 1956

Certes, on trouve mention d'un Certificat d'Etudes Supérieures (CES) intitulé " Hydrogéologie, Hygiène de l'eau et du sol " à la Faculté des Sciences de Lille sous la responsabilité de L. Dollé dés 1930. La 1ère thèse d'Université soutenue à Paris fut celle de P. Taltasse sur le bassin de Fès-Meknès au Maroc en 1953. Une autre thèse d'Université est soutenue à Aix-Marseille en 1952 par E. Stretta sur le bassin de l'Oued El-Haï au Maroc.
Mais c'est à la fin des années 1950 que le croisement entre les Sciences de la Terre et les Sciences et Techniques de l'Eau a été consacré par la création simultanée d'enseignements spécialisés à Paris, Bordeaux et Montpellier.

Cette convergence fait suite au décret de 1955 permettant à l'Enseignement Supérieur de mettre en place des formations spécialisées à finalité professionnelle mais a été suscitée sans doute aussi par l'intervention de P. Lafitte et J. Ricour au Congrès du Centenaire de la Société de

Henry Darcy

l'Industrie Minérale en 1955 soulignant désormais la prépondérance de l'Eau dans la recherche minérale métropolitaine.

À Paris-Sorbonne, le DEA de Géologie Dynamique a fonctionné pour la première fois en 1956 – 57 et comprenait deux grandes options, Géodynamique Externe et Géodynamique Interne, chacune divisée encore en deux options : d'une part " Hydrologie, Hydrogéologie et Géochimie des eaux " et " Pédologie, paléoclimatologie et Géochimie des sols " et d'autre part " Tectonophysique " et " Géodynamique sous-marine et Géochimie des sédiments ".
On peut percevoir dans ces intitulés les grandes qualités de visionnaire de Louis Glangeaud, le porteur de ce diplôme. Chacune de ces options prendra rapidement son autonomie et le DEA Hydrologie, Hydrogéologie et Géochimie des eaux s'affirmera sous l'impulsion de Gilbert Castany, G. Reménieras et B. Gèze, puis sous la responsabilité de R. Létolle qui succède à L.Glangeaud.

À Bordeaux, c'est Henri Schoeller qui crée en 1956 à la Faculté des Sciences, un Certificat de 3e cycle " Hydrogéologie et Géochimie ", davantage centré sur la géochimie des eaux souterraines profondes des grands bassins sédimentaires, à l'exemple de ce qu'il enseignait déjà à l'Ecole Nationale du Pétrole.

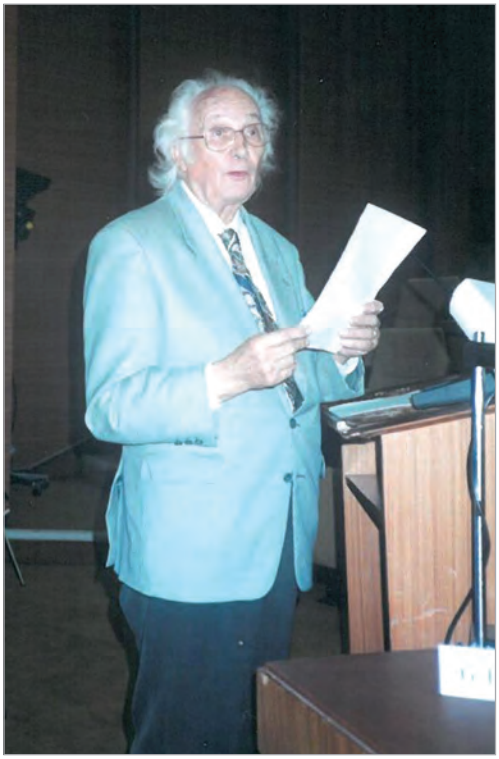
À Montpellier, Jacques Avias obtenait en 1958 la création, à la faculté des Sciences, d'un 3e cycle de " Géologie structurale et appliquée " qui comportait deux options " Hydrogéologie, Géologie appliquée aux Travaux Publics " et " Gîtes minéraux des roches ultrabasiques, bauxitiques et latérites métallifères ". Très vite l'option Hydrogéologie est devenue prépondérante avec l'aide de R. Plégat.

De 1960 à 1975, la grande période des 3es cycles d'Hydrogéologie

Le succès de ces nouvelles filières va très vite grandissant. Aux trois filières créées entièrement dévolues à l'hydrogéologie, s'ajoutent à l'Université de Grenoble en 1966

G. Castany (Rouen, mai 1978) à droite G. Conrad (Univ. Rouen) et J.-C. Roux. *BRGM*

René Létolle au Colloque Castany. Paris, nov. 1993 à G : H. Zebidi (Univ. Tunis) et J. Margat. *BRGM*



J. Avias. Paris, 1997. *J.-C. Roux*

sous la direction de Jean Sarrot-Reynaud et à Besançon en 1970 sous la direction de Pierre Chauve, deux formations de 3e cycle de Géologie Appliquée comprenant une option Hydrogéologie.

À Orsay, Jean-Charles Fontes crée en 1980 un DEA d'hydrologie en lien étroit avec l'ORSTOM, et très axé sur l'emploi des méthodes isotopiques et aussi les problèmes du Continent Africain. Tous ces enseignements spécialisés ont désormais une double finalité, formation à la recherche et formation professionnelle. Ils sont sanctionnés par un Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) et suivis pour une petite moitié d'étudiants par la préparation sur 2 ou 3 ans d'une thèse dont la soutenance donne le titre de Docteur de 3e cycle.

Durant deux décennies ces formations vont profiter de la création de très nombreux emplois dans leur spécialité. D'une part en effet, la mise en place de ces filières s'est accompagnée de la création de Centres de Recherches et de l'émergence de nouvelles disciplines. D'autre part, avec la prise de conscience de l'importance de la ressource en eau dans l'économie de la France, de nouvelles structures nationales et régionales ont vu le jour, Agences de Bassin, Services géologiques régionaux et Département d'Hydrogéologie au BRGM…

C'est ainsi que beaucoup d'anciens ont occupé jusqu'à ces dernières années ou occupent encore des postes de responsabilité dans des Ministères, des administrations et des grandes entreprises publiques et privées de recherche et distribution d'eau ou d'équipement.

On peut essayer de dresser un bilan de ces 25 années de prospérité. Le nombre de DEA délivrés de 1960 à 1985 est estimé à plus de 1500 dans la discipline (250 décomptés pour Paris seulement entre 1960 et 1976). Le nombre de thèses de 3e cycle d'Hydrogéologie soutenues en année moyenne a grimpé de 20 dans les années 1960 à 35 dans les années 70 pour un total produit de près de 700 sur la même période. Quelques statistiques retrouvées font état de 105 thèses soutenues à Paris de 1960 à 1976 (le premier lauréat fut Claude Mégnien), 80 thèses à Bordeaux de 1958 à 1969, 95 à Grenoble de 1966 à 1988 et 70 thèses à Besançon de 1968 à 1990.

Parmi ces étudiants de 3e cycle on compte une forte proportion d'étrangers en provenance des pays francophones, Maghreb et Afrique occidentale, mais pas seulement. Les élites de la Tunisie, du Maroc et à un degré moindre de l'Algérie ont ainsi été formées à l'école française d'hydrogéologie avant de prendre en main la formation de leurs spécialistes. On sait moins que de 1960 à 1980 de très nombreux iraniens ont soutenu un Doctorat en France. Par exemple, sur 105 doctorats décernés à Paris jusqu'en

1976, 16 l'ont été à des Iraniens sur un total de 31 à des étrangers.

Il faut aussi souligner pendant cette période l'existence des thèses de Docteur Ingénieur qui ont permis à des Ingénieurs de l'Ecole des Mines, de Centrale… de venir approfondir leur culture géologique à l'Université, consacrant une première forme de mariage entre l'Université et des Grandes Ecoles.

En 1974, une première tentative de regroupement des DEA d'Hydrogéologie s'amorce avec la création d'un DEA fédéral de " Sciences de l'Eau " sous la direction de René Letolle qui regroupait autour de Paris 6 les universités de Bordeaux 3 et de Montpellier 2, l'École des Mines de Paris et l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer (ORSTOM). Mais ce regroupement n'est que partiel puisque coexistent des DEA de Géologie Appliquée avec une option Hydrogéologie, à Besançon, à Orsay, à Grenoble mais aussi à Montpellier avec C. Drogue rejoint par Avignon en 1981 avec Bernard Blavoux et à Bordeaux avec J. Aurouze. Cette diversité va persister jusqu'en 1985.

1985-2005, regroupement des DEA, réforme du Doctorat et séparation des filières Recherche et Professionnelle

1985 marque la naissance du DEA national d'Hydrologie " Sciences de l'Eau et Aménagement " en réaction à Claude Allègre. Ce DEA est organisé par l'Université de Franche-Comté (Besançon), l'Université de Montpellier I (Faculté de Pharmacie), l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II, l'Université René Descartes (Paris V) Faculté de Pharmacie, l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), l'Université Paris Sud Orsay (Paris XI) l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts de Montpellier (ENGREF), l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris et l'ORSTOM, rebaptisé depuis Institut français de Recherche pour le Développement (IRD). Le responsable en est Ghislain de Marsily alors en poste au Centre d'informatique Géologique de l'École des Mines de Paris.

L'objectif général est de fournir à 60 étudiants un enseignement pluridisciplinaire de haut niveau couvrant l'ensemble des problèmes de l'eau. Ce DEA s'appuie sur une structure CNRS existante, le GRECO Hydrogéologie dont toutes les équipes constitutives deviennent équipes d'accueil des doctorants. Sa composition marque un tournant entre Hydrogéologie quantitative axée sur l'évaluation des ressources et Hydrogéologie qualitative avec les problèmes de santé et la gestion des milieux anthropisés. Ce DEA conforte les liens entre l'hydrologie de surface et les eaux souterraines et la notion d'Hydrosystème.

Ce DEA national va fonctionner pendant 10 ans jusqu'à ce qu'en 1995, il soit découpé en deux entités. Un DEA pour la partie Nord intitulé " Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie des eaux " rassemble l'Université Paris VI (Jussieu), l'Université Paris XI (Orsay), l'École des Mines de Paris et l'ENGREF sous la responsabilité de G. de Marsily passé Professeur à Paris VI et assisté de Pierre Hubert, puis de H. Bendjoudi. Un DEA pour la partie Sud " Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental " associe les universités de Montpellier I, de Montpellier II, d'Avignon, de la Réunion et l'ENGREF sous la responsabilité de G. Bocquillon puis de M. Desbordes. Cette organisation va se poursuivre jusqu'à l'avènement des Masters en 2005. Les raisons de ce découpage semblent être la taille jugée excessive de l'ancien DEA, mais surtout le souhait du Ministère de voir les regroupements se faire davantage sur un plan géographique en cohérence avec les Ecoles Doctorales.

En dehors de ces deux structures fonctionnent d'autres DEA qui concernent pour une petite part les Sciences de l'Eau, le DEA " Géomatériaux, eau, transferts et interactions " de Poitiers, le DEA " Géosystèmes et Ressources d'Orléans-Tours ", le DEA " Terre-Ressources " de l'INP Nancy-Strasbourg et le DEA " Géosciences de l'Environnement " d'Aix-Marseille III.

Dés 1985 les Doctorats sont délivrés sous le sceau des établissements habilités (Docteur de l'Université X ou de l'Ecole Y) et, après une période de transition, les doctorats de 3e cycle et les doctorats d'Etat disparaissent pour se confondre en un doctorat unique se déroulant normalement sur trois ans.

La séparation des filières à vocation recherche et des filières à finalité professionnelle est actée en 1990 par le lancement à l'université des Diplômes d'Études Supérieures Spécialisées (DESS) à Bac + 5. Le DESS " Eaux souterraines, Hydrogéologie chimique et Physique " de Grenoble a formé, de sa création en 1991 jusqu'en 2005, plus de 250 praticiens et celui d'Avignon " Hydrogéologie et Environnement " créé en 1993, près de 180. Le praticien est un généraliste de l'eau souterraine dont les compétences s'étendent désormais à la gestion intégrée de la ressource. Aux pré-requis fondamentaux de géologie pour caractériser le milieu et mener à bien la prospection de la ressource, il doit ajouter des connaissances en sciences physiques et mathématiques pour quantifier les écoulements et les transferts de masse et des connaissances en chimie, voire en biologie pour gérer la qualité de l'eau. Ses tâches de gestionnaire nécessitent en outre des connaissances suffisantes sur les lois et règlements, les modèles de simulation…

S'agissant d'un domaine technique, une partie des enseignements (30%) est assurée par des professionnels et un stage en situation professionnelle de 6 mois est intégré et valorisé au sein de la formation. Très vite on assiste à un véritable engouement pour les DESS et à la désaffection progressive des DEA et surtout de leur prolongation en thèse. De nombreux DESS s'ouvrent dans le domaine des Géosciences qui traitent pour partie les sciences de l'eau à Besançon, Bordeaux, Lille, Montpellier, Nice, Orléans, Poitiers, Rennes, Strasbourg….

Tous ces diplômes de niveau Bac + 5 visent la formation de cadres. Mais les Sciences de l'eau ont aussi besoin de techniciens supérieurs pour l'acquisition de données de terrain, leur pré-traitement, la gestion et la maintenance des stations d'épuration et des stations de traitement de l'eau potable, la dépollution des sols.

Le développement amorcé à l'Université au début des années 2000, des Licences à finalité professionnelle est donc souhaitable. À Paris VI, il commence par la mise en place par J. Lauverjat d'une formation en un an après une première année de DEUG, appelée " DEUST de Sciences de l'Eau " qui n'évoluera vers la Licence Professionnelle qu'à partir de 2006, portée par P. Ribstein Il est intéressant de signaler qu'une formation de ce type, la licence de " Gestionnaire de l'eau en pays agricole méditerranéen " avait été mise en place à Avignon dés 1982 avec la collaboration du département Sciences du Sol de l'INRA d'Avignon-Montfavet et s'est maintenue par dérogations successives du Ministère jusqu'en 2001 pour former près de 300 étudiants.

L'harmonisation européenne de 2005 et l'avènement des Masters

L'histoire des DEA et DESS s'arrête à la mise en place généralisée du système LMD (Licence-Master-Doctorat) à la rentrée universitaire 2005. Dans un souci d'harmonisation en Europe, ce nouveau dispositif conduit à la disparition du DEUG poursuivi désormais jusqu'en Licence (Bac+3) et instaure la préparation du Master sur 2 années. Le Master1 se situe au niveau de l'ancienne Maîtrise. Le Master 2 (Bac+5) comporte 2 options, une option professionnelle (PRO) équivalent de l'ancien DESS et une option Recherche correspondant au DEA, la seule permettant en principe de préparer un Doctorat. Bien que le Master 1 comporte le maximum de troncs communs, l'acquisition des connaissances nécessaires à la formation de l'hydrogéologue peut se faire de manière plus progressive sur 2 ans avec des parcours à la carte et une pluridisciplinarité accrue.

La lisibilité des programmes des formations se complique. Cependant, le paysage universitaire n'en est pas bouleversé car il s'agit davantage d'une adaptation des formations existantes que de véritables innovations.

J. Avias sur le bassin du Lez (sept. 1994). À droite : J. Margat. *J.-C. Roux*

1960 - Naissance de Centres de Recherches avec de nouvelles spécialités

Pour conforter les nouveaux enseignements de 3e cycle d'hydrogéologie, des équipes de spécialistes sont constituées au sein des départements des Sciences de la Terre. Elles vont promouvoir de nouvelles orientations au sein de la discipline.

À Montpellier, sous l'impulsion de Jacques Avias, se créent, dés 1958, le Centre d'Etudes et de Recherches en Hydrogéologie (CERH) et la fondation CERGA, Centre d'Etudes et de Recherches de Géologie Appliquée, Association privée (loi 1901) gérant les moyens lourds nécessaires aux prospections de terrain. On notera pour exemple que grâce à cette fondation un avion était disponible pour développer la télédétection, un laboratoire de chimie fonctionnel pour l'analyse physico-chimique de l'eau.

De nouvelles méthodes d'études pluridisciplinaires des réservoirs karstiques se développent à l'université. Elles sont basées sur une analyse structurale fine, une quantification à l'aide de bilans hydrologiques sur des bassins versants expérimentaux et sur l'étude corrélative des phénomènes observés sur les karsts du Bas-Languedoc.

Un nouveau concept de gestion active des aquifères karstiques voit le jour dès 1961 avec le combat de J. Avias pour l'utilisation de la source du Lez comme alimentation en eau potable de la ville de Montpellier. Et on ne peut s'empêcher d'imaginer combien lui aurait fait plaisir la création récente de la Maison des Sciences de l'Eau abritant l'UMR Hydrosciences et les unités IRD, lui qui dans les années 1960 avait cherché à faire créer par le CNRS et l'Université un Centre National d'Hydrogéologie sur un terrain longtemps réservé à cet usage.

À Paris, la mise en place du DEA de Géodynamique externe s'accompagne de deux initiatives majeures de L. Glangeaud.

La première est la création du Centre de Recherches Géodynamiques (CRG) de Thonon-les-Bains sur les bords du lac Léman où les étudiants de 3e cycle viennent se former aux pratiques de terrain (cartographie hydrogéologique, mesures de débit, piézométrie et pompages d'essai, échantillonnage et hydrochimie de terrain). Pendant 45 ans jusqu'à sa fermeture en 2005, le CRG a accueilli les stages de terrain des formations parisiennes, mais aussi de nombreuses autres universités françaises ou étrangères.

Le Centre de Recherches Géochynamiques de Thonon-les-Bains, avenue de Corzent (1961). *J.-C. Roux*

Mesures de résistivité par les élèves-stagiaires du CRG (mai 1961). *J.-C. Roux*

Pierre Pouchan avec B. Blavoux et J.-J. Risler (Carcassonne, nov. 2003). *J.-C. Roux*

Henri Schoeller

Ce passage à Thonon reste certainement encore dans la mémoire de nombreux professionnels de l'hydrogéologie comme un bon souvenir de jeunesse.

La deuxième initiative de L.Glangeaud est déterminante puisqu'elle est à l'origine à l'Université, d'une nouvelle branche de recherche, la géochimie isotopique avec ses applications dans le domaine des sciences de l'eau. C'est en effet sous son impulsion, au tout début des années 1960, que de jeunes chercheurs (R. Létolle, J.C. Fontes, Ph. Olive, puis plus tard B. Blavoux) s'orientent vers l'utilisation des techniques isotopiques en hydrogéologie.

L'idée première de L. Glangeaud était de prouver que les eaux minérales chaudes du Massif Central comportaient une part importante d'eau juvénile. Ses élèves lui démontrèrent très vite qu'il n'en était rien et qu'elles étaient uniquement d'origine météorique.

Mais l'aventure était lancée. Dans une pièce reculée de la Sorbonne (l'Université de Paris était alors unique et plus qu'à l'étroit dans ces bâtiments historiques), R. Létolle achevait la construction d'un spectromètre de masse de type Nier pour la mesure des rapports isotopiques de l'oxygène et du carbone. Les premiers essais de préparation de carbone 14 étaient menés par J.C. Fontes. Philippe Olive faisait les premiers comptages du tritium, alors très abondant dans la nature, sans enrichissement préalable par électrolyse. Le dégagement potentiellement explosif de l'hydrogène durant cette opération de concentration la rendait de toute façon impossible dans les caves de la Sorbonne. Par contre, il a été possible d'installer ce dispositif dés 1967 sur un balcon de la station de Thonon au CRG. Les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau, du carbone et du soufre, le tritium et le carbone 14 devinrent très vite les outils principaux du Laboratoire de Géologie Dynamique qui s'installe en 1969 dans des locaux neufs à Jussieu (Paris VI).

L'enseignement de la géochimie isotopique fut assuré dés 1965 dans le cadre du 3e cycle de Géologie Dynamique. Une école d'hydrologie isotopique commença à se délinéer grâce aux premiers élèves qui y furent formés, parmi lesquels M. Dray, G.M. Zuppi, A.Mariotti, L. Dever, J.F. Aranyossy et beaucoup d'autres.

À Bordeaux**,** Henri Schoeller crée en 1958 le Centre d'Hydrogéologie. Avec le concours de P. Pouchan, A. Cazal, J. Vouvé (université) et Marc Schoeller (CNRS) se développent les recherches sur les eaux souterraines profondes et le géothermalisme sur un terrain d'études approprié, le Bassin d'Aquitaine. La géochimie des eaux et leur température sont les outils privilégiés de l'équipe et font l'objet d'une présentation exhaustive et originale pour l'époque, dans les ouvrages de référence de H. Schoeller " *La géochimie des eaux souterraines* " en 1955 et " *Les eaux souterraines* " en 1962.

L'équipe perdra de son unité avec le partage en 1970 entre les nouvelles universités de Bordeaux 1 et Bordeaux 3 (Institut de Géodynamique). On doit à P. Pouchan les premières notions de paléohydrogéologie avec la mise en évidence des effets de mémoire dans les nappes profondes au cours de l'Holocène en matière climatique, hydrody-

Jean-Charles Fontes (1er rang, 2e à G.)avec ses étudiants et ses collaborateurs. *B. Blavoux*

namique, géothermique et géochimique à partir des données sur l'Afar (lac Asal , système de l'Aouache) et sur l'Aquitaine (nappe des sables inférieurs et diapir de Dax). La valorisation de la ressource thermo-minérale du bassin de Dax en collaboration avec la Faculté de Pharmacie et la conservation des grottes ornées et de l'art pariétal (Lascaux) sont parmi les contributions marquantes des équipes bordelaises.

Pierre Chauve dans le Jura (juin 2006). *J.-C. Roux*

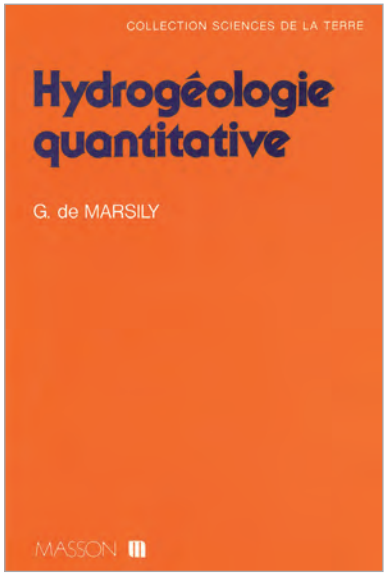
1965–1985. Un ancrage régional de la recherche avec la connaissance de la ressource

Pendant près de 20 ans, on va assister à une multiplication des équipes de recherche en hydrogéologie. Il est justifié que ces équipes soient réparties sur tout le territoire dans la mesure où l'hydrogéologie est une discipline de terrain qui nécessite de suivre des évolutions temporelles sur plusieurs cycles hydrologiques.

Cette multiplication va se faire, d'une part par essaimage de chercheurs aguerris, à la recherche d'indépendance, issus des trois unités de départ, et d'autre part grâce à la montée en puissance de la spécialité hydrogéologie au sein des centres de formation de géologues comme à Grenoble, Besançon et Lille. C'est que les étudiants sont alors nombreux à souhaiter une spécialisation qui leur assurera un débouché professionnel.

Ghislain de Marsily, 2009. *BRGM Im@gé*

Au terme de cette période, le paysage universitaire français est constitué d'une dizaine d'équipes disséminées sur le territoire, de petite taille (moins de 5 chercheurs permanents) ou de taille moyenne (entre 5 et 10 chercheurs). Ces équipes sont renforcées par un panel de doctorants car c'est la grande période des thèses de 3e cycle. Les sujets de mémoires se partagent entre recherche appliquée et recherche fondamentale, depuis des monographies hydrogéologiques d'un bassin ou d'un grand aquifère jusqu'à la mise en œuvre de nouvelles approches méthodologiques ou l'expérimentation de nouveaux outils de recherche.



Hydrogéologie quantitative, par G. de Marsily, 1991

C'est un apport très important à la connaissance de la ressource en eau souterraine. Une preuve en est donnée par les nombreuses références à ces travaux de thèse qui figurent dans les monographies régionales du récent ouvrage " *Aquifères et eaux souterraines en France* ".

On retiendra quelques étapes et faits marquants de ces 20 ans d'histoire.

En relation avec Paris, la station de Thonon-les-Bains, sous la direction de Philippe Olive s'affirme comme un centre de recherches spécialisé dans la datation des eaux souterraines à l'aide du tritium et du carbone 14. Dès juillet 1963, dans le cadre de la thèse de Bernard Blavoux sur les eaux minérales d'Evian, y débute la mesure du tri-

Jacky Mania (au centre), Jury de Thèse à El Jadida (Maroc), juillet 2001. *J. Mania*

Jacques Mudry (Besançon, sept. 2011). *J.-C. Roux*

Norbert Crampon (1978). *BRGM/PNO*

tium dans les précipitations mensuelles qui se poursuit encore aujourd'hui ce qui en fait la plus longue chronique des précipitations en France.

En 1979 J.-C. Fontes est nommé Professeur à Paris-Orsay où il crée le Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique. Il décide d'inclure de manière permanente parmi les activités de ce nouveau laboratoire les recherches de Paléohydrologie et de Paléoclimatologie. L'intérêt de ces études poursuivies avec la collaboration de F. Gasse (CNRS) est lié à la reconstitution des variations climatiques passées (programme Paléo-hydrologie en Afrique) mais aussi à la prévision des conséquences des changements de climat annoncés pour le siècle qui vient.

Dans la continuité de Paris VI, d'autres élèves y furent formés qui sont devenus des chercheurs bien connus en Hydrologie isotopique, Jean-Luc Michelot (CNRS) qui prendra la succession de l'équipe d'Orsay, Yves Travi désormais Professeur à Avignon, Laurence Chéry responsable au Service Eau au BRGM, J.-M. Garnier et beaucoup d'autres en provenance des pays en voie de développement dont K. Zouari et A. Mamou (Tunisie), H. Guendouz (Algérie), Bureima (Niger), Akiti (Ghana). En 1980 B. Blavoux quitte Paris et Thonon pour Avignon où se structure, avec l'aide de Jacques Mudry, le Laboratoire d'Hydrogéologie qui va travailler de concert avec l'Université voisine de Montpellier. L'hydrochimie, l'hydrologie isotopique et l'hydrogéologie karstique sur le système célèbre de Fontaine de Vaucluse seront les thèmes majeurs de cette nouvelle équipe.

À Montpellier, sous la direction de J. Avias, l'inventaire systématique des ressources en eau du Roussillon et du Bas Rhône-Languedoc donne lieu à la publication d'atlas hydrogéologiques.

De droite à gauche : Moumtaz Razack, Bernard Blavoux, Jacques Avias, J.-C. Roux et G. de Marsily (Paris, 1993). *BRGM*

C. Drogue, qui lui succède, propose un premier modèle de fonctionnement du karst en insistant sur les notions de double porosité, l'hétérogénéité spatiale et les effets d'échelle sur les paramètres hydrodynamiques. Les observations sur des sites expérimentaux équipés de forages de l'arrière pays montpelliérain sont à l'origine de ses propositions.

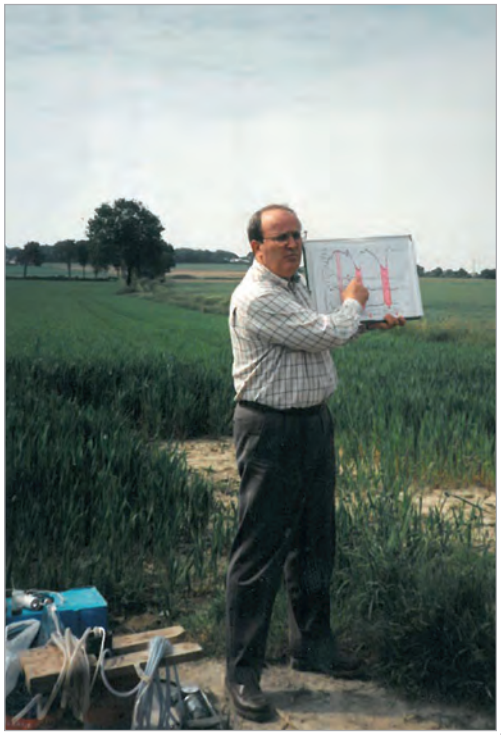
L'expérience ainsi acquise va rapidement s'exporter vers le Maghreb et jusqu'à la Chine méridionale avec l'Institut de Guilin.

À cette école montpelliéraine ont été formés Moumtaz Razack à qui l'on doit le développement de l'hydrogéologie à l'Université de Poitiers, Jean Coudray et le démarrage de la filière eau à l'université de la Réunion, et Jean-Pierre Faillat à Brest.

À Grenoble, on doit à Jean Sarrot-Reynaud une bonne connaissance de l'hydrogéologie des Alpes françaises, les karsts des Bauges, Chartreuse, Vercors et Dévoluy, les grandes plaines alluviales glaciaires et la ressource thermale. G. Nicoud qui sera à l'origine de la filière Eau à Chambéry et M. Lepiller au départ de celle d'Orléans ont soutenu leurs thèses de 3e cycle sous sa direction scientifique.

À Besançon, P. Chauve achève la reconnaissance hydrogéologique de la chaîne du Jura. L'identification des systèmes karstiques s'appuie sur des analyses structurales approfondies et la mise en œuvre généralisée des traçages par coloration qui permet, en plus, la publication d'un atlas des circulations souterraines à l'échelle régionale.
Dés 1971, P. Chauve organise, avec l'appui de M. Dreyfuss, le Premier Colloque d'Hydrologie en pays calcaire. En 1975, à l'occasion du deuxième colloque, il associe l'Université de Neuchâtel. Depuis 9 colloques se sont régulièrement déroulés en alternance à Besançon et à Neuchâtel. Il lance avec l'appui d'Alain Mangin une coopération avec le Maroc qu'il développe ensuite avec ses élèves marocains recrutés dans les universités marocaines et avec J. Mania qui est venu renforcer l'équipe bisontine en 1982.
Quatre professeurs d'Université, de nombreux Maîtres de conférences et Ingénieurs sont issus de l'école bisontine. Parallèlement, J. Mania s'implique fortement en Algérie où il développe de nombreuses actions de formation à la recherche des jeunes enseignants algériens.

Deux unités plus petites se sont structurées à Lille et à Orléans. Norbert Crampon anime à Lille une équipe de recherche sur la vulnérabilité des aquifères et les transferts hydrodispersifs en milieux calcaires fissurés avec des expérimentations sur les calcaires paléozoïques de l'Avesnois, le milieu crayeux à double porosité du Nord de la France et des essais en laboratoire, tracé d'isothermes, interactions entre traceurs, effets d'échelle (distance, temps) sur la dispersivité.



Jean-Pierre Faillat (1998).
J.-C. Roux

Michel Lepiller (2005).
J.-C. Roux

François Lelong (2008).
J.-C. Roux

Alain Mangin (2008)

M.Bakalowicz (2013) *J.C. Roux*

Laboratoire CNRS de Moulis (Ariège). *F. Boineau*

À Orléans en 1976, François Lelong, avec le recrutement de Michel Lepiller, crée le Laboratoire d'Hydrogéologie. Trois thèmes de recherche s'y poursuivront jusqu'en 1995 avec la collaboration d'E. Roose (chercheur ORSTOM, puis IRD), B. Guillet et J.-F. Didon (CNRS), l'étude du ruissellement et de l'érosion selon la nature du sol et de la végétation, l'influence du couvert végétal sur la dynamique de l'eau et sur les bilans de matière à partir des expérimentations sur les bassins versants expérimentaux du Mont Lozère en milieu granitique, l'étude du fonctionnement de systèmes karstiques en divers contextes climatiques et géologiques, Bauges (Hte Savoie) et Gâtinais (Loiret). M. Lepiller y a poursuivi des recherches méthodologiques et fondamentales sur le traitement des données de traçages hydrogéologiques pour approcher la structure des systèmes de drainage souterrain jusqu'à sa disparition accidentelle en 2006.

Le CNRS et l'Université

Alors que l'hydrogéologie possède en France une longue tradition, cette discipline fait figure de parent pauvre auprès du CNRS. Ceci paraissait d'autant plus dommage que c'était priver les applications potentielles d'un support fondamental. Son implication s'est faite, au départ, à partir d'initiatives individuelles sans qu'il n'y ait une réflexion d'ensemble

Les structures propres du CNRS

Du point de vue CNRS, il existe deux structures propres, le Laboratoire souterrain de Moulis initialement orienté vers la Biologie et le Centre de Recherches Géophysiques de Garchy. L'activité de ces deux structures s'est diversifiée au cours du temps et concerne pour partie dès les années 1970 la discipline Hydrogéologie.

Le Laboratoire souterrain de Moulis

À l'initiative de Félix Trombe, le père du four solaire d'Odeillo, et de Bernard Gèze, alors professeur à l'Institut Agronomique de Paris, tous deux spéléologues, était créée, en 1945, au sein du CNRS, la commission de spéléologie qui ne devait être dissoute qu'en 1978.
Cette création est importante, car c'est elle qui devait permettre de développer à partir de 1968, grâce à la présence du Laboratoire souterrain de Moulis, une équipe d'hydrogéologie karstique. Entre temps, un chercheur isolé à l'université de Bordeaux était rattaché à la discipline hydrogéologique, il s'agissait de Marc Schoeller, spécialiste d'hydrogéochimie, travaillant sous la houlette de son père, notamment sur des programmes portant sur l'hydrothermalisme.
Le Laboratoire souterrain de Moulis ayant vu le jour en 1948, était surtout orienté vers des recherches en biolo-

gie. En 1968 avec le recrutement de Alain Mangin, puis quelques années plus tard de Michel Bakalowicz, prenait corps l'étude hydrogéologique du karst, notamment autour du bassin expérimental du Baget (cf. encadré).

Ils développeront, en plusieurs décennies, de nombreux concepts (système karstique, système annexe au drainage, épikarst…) et méthodes (approche de la structure de l'aquifère par le fonctionnement : hydrodynamique, chimique, thermique, biologique ; classification fonctionnelle des systèmes, traitement des séries chronologiques par analyses corrélatives et spectrales, ondelettes…).

Le Centre de Recherches Géophysiques de Garchy

À Garchy, sous la direction de Y. Benderitter, l'étude des structures géologiques par l'intermédiaire de leurs propriétés physiques trouve un domaine d'application en hydrogéologie superficielle (approche de la perméabilité). Les travaux dans le domaine de la géothermie s'y développent dès le démarrage du Programme Géothermie Profonde Généralisée de l'AFME.

Les Unités Associées au CNRS et les tentatives de recentrage vers le fondamental

Les équipes universitaires avaient été ainsi volontairement dispersées sur tout le territoire parce que l'hydrogéologie est une discipline de terrain et parce que de fortes demandes de spécialisation se sont exprimées là où sont formés les étudiants de géologie. Mais la communauté scientifique a besoin d'être coordonnée sur le plan national si l'on veut éviter l'isolement, engendrer des coopérations thématiques et informer les uns des travaux et résultats obtenus par les autres. Des tentatives de recentrage de l'hydrogéologie vers le fondamental ont été menées par le CNRS.

Dans le milieu des années 70, le CNRS avait mis en place une ATP (1629) sur l'étude quantitative et qualitative des aquifères karstiques dont le rendu a été donné en mai 1975.

En 1976, le CNRS prenait conscience de l'importance de cette discipline et après la suppression d'une RCP montpelliéraine P. Chauve obtenait la création d'une RCP nationale regroupant les hydrogéologues de Paris, Montpellier et Besançon.

Mais c'est en 1980 que P. Chauve à Besançon réussissait la mise en place d'un GRECO (GRECO 35) dont il laissa la direction à G. de Marsily quatre ans plus tard. Ce groupement réunissait la plupart des chercheurs abordant l'hydrogéologie, soit de la communauté universitaire, soit du CNRS. À cette époque, le CNRS possédait deux

LE BAGET

De par sa situation (4 km à l'Ouest du Laboratoire souterrain de Moulis), sa géologie relativement simple (calcaires secondaires métamorphisés en structure monoclinale), sa délimitation assez précise (limite nord constituée de Trias et de Paléozoïque imperméable, limite sud terrains argilo-pélitique de l'Albo-Cénomanien, limite est assurée par les alluvions de la vallée du Lez, limite ouest assurée par des formations dolomitiques), les nombreux regards sur le fonctionnement hydrodynamique (sources, trop-pleins, pertes, gouffres servant de piézomètres) et ses dimensions (13,25 km², altitude moyenne de 923 m, altitudes extrêmes + 1 417 m et + 498 m), ce bassin a été équipé dès 1968 pour suivre et étudier le fonctionnement des systèmes karstiques.
En hydrométrie, ce bassin possède 3 stations permanentes au pas de 1 jour de 1968 à 1995, au pas de 30 minutes depuis, et 6 autres stations équipées pour des périodes plus courtes. La climatologie est suivie à partir de 3 stations réparties tout autour (en moyenne 1700 mm/an, ETR : 550 mm). La température et la conductivité ont été enregistrées de façon continue de 1972 à 1990 aux différents points d'accès à l'eau (sources, piézométrie, trop plein) (9,3 °C à 10,8 °C) et un échantillonnage à des fins d'analyse est réalisé de façon hebdomadaire sur différents points d'eau du système (Ca^{2+} : 53,0 à 73,2 ; Mg^{2} : 2,7-5,5 ; Na^{+} : 0,90 – 1,50 ; K^{+} : 0,30 – 0,55 ; HCO_3^{-} : 165 à 208 ; SO_4^{2-} : 7,0 – 40,5 ; Cl^{-} : 1,20 à 2,25). Durant plusieurs années des suivis isotopiques sur l'eau ont fourni de nombreuses données. Enfin des analyses biologiques par filtrage ont été réalisées de 1969 à 1985 aux différents exutoires, à raison de plusieurs crues annuelles, portant sur des communautés de crustacés (Copépodes – Harpacticides).
Deux études plus ponctuelles ont été conduites. La première est relative à un pompage à fort débit sur un piézomètre, le Gouffre de la Peyrère : débit de 260 l/s avec un rabattement de près de 20 m et avec renvoi des eaux à 1 km en aval. La seconde avait pour but d'analyser, à partir d'éléments traces, des gaz rares et des éléments radioactifs, les transferts en milieu karstique (projet Katrin, 1998).
Une grande partie des concepts actuels sur la structure et le fonctionnement des karsts s'appuie sur les résultats obtenus sur le Baget. La notion d'écosystème (couplage entre la structure physique et l'aquifère et celle des communautés animales) a pu être démontrée. En 1993 le Baget a été retenu dans le programme BVRE et dans les European Network of Experimental and Representative.

Alain MANGIN

Lothaire Zilliox (1992). *BRGM*

structures qui lui étaient propres : Moulis et Garchy où était affichée une activité hydrogéologique. Il existait également au sein de l'université deux UA qui avaient des activités hydrogéologiques, l'UA (Dir. J.-C. Fontes) à Paris-Orsay avec le Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique et l'UA Géochimie organique et Biogéochimie (Dir. J. Trichet) à laquelle était rattachée l'équipe d'hydrogéologie de F. Lelong à Orléans. Puis un certain nombre d'équipes universitaires avait ainsi des liens avec le CNRS par le biais du GRECO : Avignon, Besançon, Bordeaux, Chambéry, Fontainebleau, Lille, Montpellier, Paris VI. Le rôle du GRECO a été de réunir, informer, mettre en commun des acquis scientifiques, des logiciels, des grands équipements et de servir de lien entre la communauté universitaire nationale et le reste de la communauté nationale d'une part et l'étranger de l'autre.

Le GRECO a été partie prenante de programmes en coopération sur le plan national, programme de recherches sur les roches fissurées lancé par le Ministère de l'Environnement, programme Géologie Profonde de la France, programme Géothermie Profonde Généralisée de l'AFME, programmes de recherches sur les déchets nucléaires du CEA et sur le plan international avec en particulier la Chine (Guiling et Guizou) Ce GRECO devait servir de cadre général de la recherche lors de la création en 1985 du DEA National d'Hydrogéologie dont les équipes du GRECO constituaient les laboratoires d'accueil.

En 1988, une demande de création d'un Groupement de Recherche " Hydrogéologie " était soumise au CNRS par G. de Marsily, essayant de mettre en place " une école française d'hydrogéologie " fortement souhaitée par différentes instances, mais qui, malheureusement, n'a pas abouti.

L'avènement des appels d'offre : les PIREN

Les programmes PIREN (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement) ont été mis en place au CNRS par Zaher Massoud et Christian Lévêque en 1984. Parmi eux, ont été lancés des programmes " Grands Fleuves ", dont l'objet d'étude était l'hydrologie, la qualité des eaux et l'ensemble des écosystèmes aquatiques des grandes vallées fluviales, avec les programmes de sciences sociales associés (économie, gestion, gouvernance, etc.). Ont ainsi été montés sur appel d'offres des programmes sur le Rhône, le Rhin, la Garonne, la Durance, et dans un second temps sur la Seine, mais hélas, jamais sur la Loire, malgré une tentative initiée par F. Lelong.

Ces recherches étaient menées en coopération entre des universitaires, des chercheurs du CNRS, et des équipes des écoles d'ingénieurs ou des Organismes de recherche (INRA, CEMAGREF, etc.). Sur le Rhône, la recherche a été plus axée sur les écosystèmes et également les crues et le transport sédimentaire, avec P. Roux, J.-P. Bravard, et bien d'autres ; mais en hydrogéologie on lui doit la naissance de l'étude de la faune vivant dans la porosité des aquifères alluviaux, avec Jeanine Gibert.

Le Piren Rhin a, en revanche, beaucoup travaillé sur la nappe d'Alsace, avec Lothaire Zilliox, Philippe Ackerer et leurs collaborateurs, plus précisément sur la qualité des eaux de la nappe et sa protection contre les pollutions. Le Piren Durance s'est préoccupé des aspects économiques, tandis que le Piren Garonne (et ses successeurs, comme le GIS ECOBAG, avec Roger Lohou), a travaillé en particulier sur les échanges entre le fleuve et le corridor fluvial, la ripisylve avec H. Décamps, et la pollution du fleuve par les rejets métalliques des exploitations minières sur la Dordogne.

Enfin le Piren Seine, initié par G. de Marsily en 1989 puis repris par G. Billen en 1999 a étudié, en hydrogéologie, les échanges nappe-rivière, notamment lors des lâchers d'eau par les barrages, la dénitrification des eaux de la nappe de la Craie lors de leur arrivée dans la nappe alluviale, et plus généralement s'est consacré à l'établissement de bilans de circulation de matières à l'échelle de tout le bassin de la Seine, en particulier pour établir le rôle respectif de l'agriculture et des apports ponctuels urbains dans la contamination des eaux en azote et en micropolluants organiques.

Bernard BLAVOUX

Avec la collaboration de
Ghislain de MARSILY
et Alain MANGIN

IFARE

Genèse de l'IFARE

L'exploitation de la potasse d'Alsace depuis le début du 20e siècle, avec pour conséquence la salure de la nappe phréatique rhénane, ainsi que la traversée des lits majeurs des cours d'eau alsaciens par l'oléoduc sud-européen de Lavera à Karlsruhe au début des années 60, sont deux exemples où le " risque industriel " a mobilisé plusieurs équipes de recherche en géosciences et sciences pour l'ingénieur.

Cette situation allait offrir l'opportunité de pratiquer une recherche transdisciplinaire nouvelle, capable de répondre à la demande du secteur socio-économique de plus en plus sensible aux préoccupations écologiques dans la perspective du développement durable.

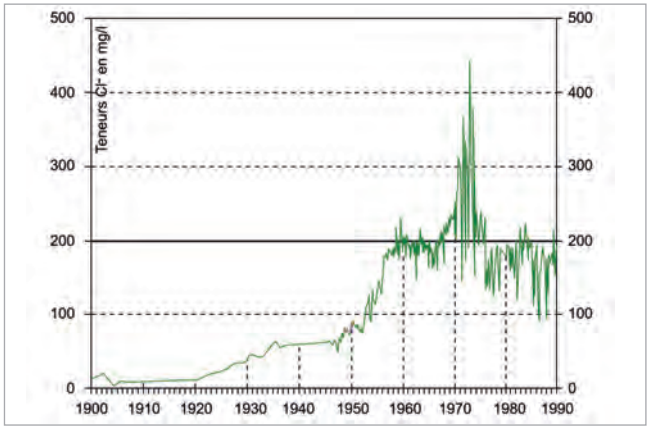
Dés 1979, le CNRS lança, en concertation avec le Ministère de l'Environnement et l'Etablissement public régional d'Alsace, le Programme Interdisciplinaire de Recherche en ENvironnement (PIREN) sur la maîtrise de l'eau dans l'espace du Rhin supérieur.

Le " Piren-Eau/Alsace " plaça la démarche scientifique au cœur de la société rhénane marquée par l'enjeu stratégique de gestion efficace des 300 milliards de m^3 d'eaux souterraines du fossé rhénan de Bâle à Mayence. La démarche était soutenue par un groupe de travail du Conseil de l'Europe, intéressé par la protection des ressources en eau de ce bassin de vie, à forte densité de population et comptant parmi les régions les plus industrialisées de l'espace européen.

Dans ce contexte, le rassemblement organisé d'acteurs du monde scientifique (Universités, Organismes de recherche tels le CNRS, le BRGM et l'INRA), du secteur de la production agricole et industrielle, et de la sphère politique sur les deux rives du Rhin, a permis la création de l'Institut Franco-Allemand de Recherche sur l'Environnement (IFARE) de Strasbourg-Karlsruhe, inscrit au Plan État-Région en 1989. En tant qu'instrument de recherche fédératif transrhénan, l'IFARE développa son réseau transfrontalier de recherche associant dans ses " zones ateliers franco-allemandes " de recherche, des équipes du Bade-Wurtemberg (Universités de Karlsruhe, Stuttgart, Tübingen,…), des équipes de laboratoires universitaires et du CNRS en Alsace (Bureau d'économie théorique et appliquée, Centre de géochimie de la surface, Institut de mécanique des fluides,…), ainsi que de l'Ecole nationale du Génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg.

Le " réseau IFARE " s'est ouvert dans les années 90 à des partenaires scientifiques suisses (ETH Zürich) et autrichiens (TU Wien) ainsi qu'à des partenaires des secteurs

Publicité des potasses d'Alsace, vers 1930



Évolution des teneurs en chlorures dans la nappe d'Alsace dans un piézomètre en aval des terrils de sel. *BRGM*

techniques et industriels (IFP, Compagnie Générale des Eaux, BURGÉAP…).
Pour comprendre et explorer les enjeux de l'eau sur le territoire du Rhin supérieur et de son aquifère, les chercheurs de l'IFARE ont développé simultanément les connaissances hydrologiques, géologiques, écologiques, associées à celles de l'économique, du social et du juridique. Pour exemple, la représentation du champ des lignes de courant dans le cas d'un puits placé dans un écoulement rectiligne, sert classiquement à la définition du périmètre de protection d'un captage d'eau dans l'aquifère alluvial.

Ainsi, du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère, est-on passé, à travers la notion de zone d'influence du captage et de risque de pollution de l'eau prélevée, à une règle de protection juridique de la qualité de l'eau distribuée. En somme, venant d'une science géo-hydraulique de base, le " faisceau de lignes de courant " devient l'outil de décision politique, de référence juridique et de protection sanitaire.

Avec les zones ateliers franco-allemandes de l'IFARE, la recherche sortait d'une démarche linéaire de la connaissance pour la connaissance, discipline par discipline, et entrait

Inauguration de l'IFARE à Strasbourg (déc. 1992)
Au centre : M. Rudolf, Président du Conseil Régional d'Alsace; à sa droite,
X. Doublet, représentant le Préfet de Région. *IFARE*

Séminaire de l'IFARE (1992)
De G. à Dr. : Pr. D. Bernard (Univ. Strasbourg), L. Zilliox (Dr. IFARE),
Pr. O.Rentz (Univ. Karlsruhe). *IFARE*

dans celle de la connaissance transdisciplinaire au service de la société humaine et notamment de son développement à l'échelle pertinente de l'espace du Rhin supérieur.

Programmation

Lors de sa création, l'IFARE comportait deux localisations :

– Karlsruhe où les activités concernent la consommation énergétique industrielle, la réduction et la valorisation des déchets de démolition de bâtiments et d'installations industrielles, les stratégies de réduction des émissions de polluants atmosphériques ;

– Strasbourg où le programme-cadre scientifique est structuré en zones ateliers franco-allemandes concernant la gestion des hydrosystèmes continentaux, leur fonctionnement, le devenir de leurs polluants et leurs effets sur l'environnement et la santé.

Sur le plan de l'hydrogéologie, les recherches ont porté essentiellement sur la modélisation et la prévention active de la pollution de captages d'eau et sur la protection des aquifères contre la pollution par les hydrocarbures, mais auparavant quelques autres aspects caractérisant l'hydrosystème rhénan, support des recherches de l'IFARE, doivent être évoqués.

Pour les écosystèmes alluviaux, dans les cours d'eau drainants de la plaine alluviale du Rhin supérieur, la végétation aquatique a été validée comme outil biologique d'évaluation de la qualité des eaux : mise au point d'une échelle de bio-indication du degré de trophie, plantes aquatiques sentinelles (phosphore, azote ammoniacal), capacité autoépuratrice des écosystèmes aquatiques en milieu inondable. Le rôle de la forêt alluviale dans l'épuration de l'eau souterraine et des eaux de crues a été établi vis-à-vis de la charge minérale à travers le système sol-plantes.

Dans le domaine des sols et eaux souterraines, des résultats significatifs concernent :

– les plantes utilisées comme support de tests de toxicité de substances polluantes et comme agents décontaminants d'un site pollué ; travail sur cultures cellulaires par une approche moléculaire ; étude du dépérissement du houblon cultivé sur d'anciens champs de betteraves sucrières : sols pollués par un pesticide, l'heptachlore ;

– la contamination des sols agricoles et de la nappe phréatique par l'atrazine : devenir de l'atrazine dans les sols, dans les eaux de surface et les eaux souterraines ; isolement des couches bactériennes capables de dégrader l'atrazine dans les sols et les écosystèmes aquatiques ;

– le transfert des nitrates vers les eaux souterraines : état de la pollution nitrique dans la nappe phréatique rhénane avec expériences de terrain comportant des mesures *in-situ* de la teneur en nitrates du sol et la modélisation du transfert de nitrates vers les eaux souterraines ; prévention active et pratiques culturales palliatives ;

– l'étude sociologique et juridique de l'évolution de la gestion de l'espace dans le Ried central de l'Ill : charte des zones inondables de l'Ill domaniale avec proposition d'une typologie des agriculteurs en fonction de leur attitude par rapport à cette charte ; mise en relief de l'inadéquation entre intégration technique et acceptation des inondations ; rôle des collectivités locales dans la gestion de l'espace rural riedien, enjeu de pouvoirs croisés entre différents groupes sociaux ; représentations divergentes de la nature.

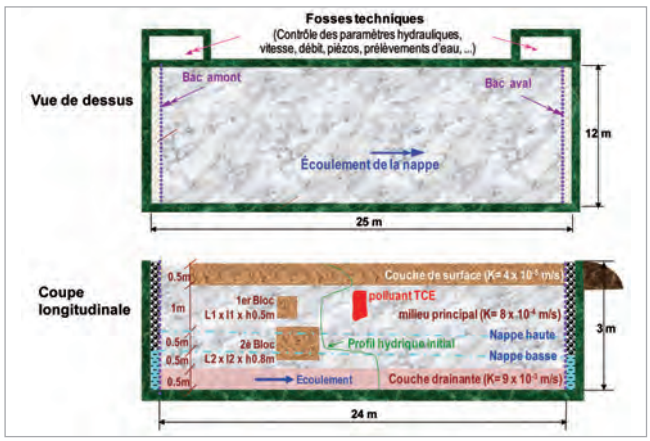
Contributions au développement de l'hydrogéologie en France

L'IFARE à Strasbourg, par les activités de deux de ses zones-atelier franco-allemandes a mené plusieurs programmes ayant comme support et cadre de recherche l'aquifère rhénan. La première s'est intéressée aux pollutions des eaux souterraines par les produits pétroliers et les solvants chlorés (appellation générique NAPL, Non Aqueous Phase Liquid)) qui sont toujours de plus en plus fréquemment recensées tant dans plusieurs endroits de l'aquifère du fossé rhénan que dans d'autres sites hydrogéologiques en France et dans les pays industrialisés. La deuxième a développé des modèles mathématiques de simulation de la dynamique des eaux souterraines et du transport des polluants dans le but de pouvoir remonter à la source de pollution et identifier les flux de polluants. Ces travaux de modélisation ont aidé à prévoir jusqu'où la pollution peut être dangereuse et à prendre les mesures de prévention qui s'imposent, notamment en matière de captage d'eau et/ou d'optimisation de la décontamination.

Les résultats des recherches de ces deux zones-atelier trouvent leurs applications dans les aquifères alluviaux des grandes vallées fluviales.

Pour simuler dans des conditions réalistes et contrôlées des pollutions accidentelles par NAPL, un grand modèle expérimental de nappe phréatique appelé SCERES (Site Contrôlé Expérimental de Recherche pour la réhabilitation des Eaux et des Sols) a été conçu en 1992 par les scientifiques de l'IFARE.

Ce site pilote implanté sur le Campus CNRS de Strasbourg-Cronenbourg reconstitue un aquifère à granulométrie comparable à celle des alluvions du fossé rhénan dans un bassin souterrain construit en béton armé étanche de



Plan et coupe schématique de SCERES. *L. Zilliox*.

Site expérimental SCERES : vue d'ensemble. *L. Zilliox*.

SCERES : Injections. *L. Zilliox*.

SCERES : Transferts. *L. Zilliox*.

25 m sur 12 et d'une profondeur de 3 m. Équipé de plusieurs instruments de mesures des paramètres hydrodynamiques, de puits et piézomètres ainsi que d'un réseau spatial de cellules de prélèvements d'eau, ce dispositif unique en Europe, offre l'opportunité de permettre des acquisitions de données en situation quasi réelle, à une échelle intermédiaire entre le laboratoire et le site industriel. Faire des travaux de recherche et s'intéresser aux processus à l'échelle de SCERES sont des actions vitales requises par les chercheurs de l'IFARE afin de pouvoir aborder certains concepts qui sont difficilement accessibles sur les modèles physiques réduits de laboratoire et/ou dans les investigations sur site industriel, comme par exemple la quantification du rôle de la frange capillaire ou des échanges entre la zone non saturée et la nappe souterraine.

Dans le domaine du transfert de polluants dans les sols et les eaux souterraines, les programmes scientifiques ayant bénéficié de soutiens financiers divers (ADEME, Agences de l'Eau, ANR, CNRS, CPER, ULP, etc.) que l'IFARE a pilotés ou auxquels il a participé, ont contribué au développement de l'hydrogéologie.

Les diverses actions menées ont renforcé le transfert d'acquis scientifiques et de méthodes d'application concrète impliquant des retombées opérationnelles pour les diagnostics de cas de contamination sur site industriel, comme en témoignent par exemple ces quelques faits marquants :

– Simulation d'un déversement accidentel de près de 500 litres de gazole dans SCERES dans les travaux couvrant la période 1992-1996 : Evaluation quantitative des effets de battement de nappe sur le transfert du polluant (degré de pollution par le corps d'imprégnation et les produits dissous, étendue du domaine contaminé de l'eau souterraine, quantification du rôle de la frange capillaire dans la propagation des composés dissous dans la nappe…) ;

– Démonstration *in situ* de la capacité des solutions de tensioactifs à re-mobiliser vers le puits de pompage le polluant résiduel piégé dans le sol et identification du principal facteur responsable de la réduction de la perméabilité et/ou du colmatage du réservoir poreux lors de la mise en œuvre de la décontamination par lessivage du corps d'imprégnation résiduel.

Les chercheurs de l'IFARE ont mis en évidence que ce colmatage est dû à l'instabilité de la solution de tensioactifs et proposé à cet égard une formulation améliorée de tensioactifs dont l'application sur site a révélé une très bonne performance aussi bien sur le plan de la perméabilité que celui de l'efficacité de la récupération du polluant résiduel. La qualité de ces résultats a conduit au dépôt d'un brevet d'invention et l'expérience acquise a été appliquée aux tra-

vaux de décontamination *in situ* sur le terrain de l'ancienne usine à gaz et cokerie de la ville de Kehl en Allemagne ;

– La propagation et l'évolution dans l'hydrosystème souterrain des produits comme le trichloréthylène (TCE) et/ou le Perchloréthylène (PCE), très couramment utilisés dans l'industrie et rencontrés dans beaucoup de zones de nappe phréatique à des concentrations dépassant largement les limites admissibles, ont été étudiées par l'IFARE depuis 1997 ;

– La quantification des transferts de masse entre la zone non saturée et la nappe et l'impact des précipitations sur le transport des solvants chlorés ont fait apparaître dans les conclusions tirées des travaux, l'importance des flux de vapeurs de polluant dans l'air du sol (prédominance de la contamination sous forme gazeuse, dissolution des vapeurs, rôle de la frange capillaire, etc.) ;

– Les travaux de l'IFARE se sont aussi inscrits dans le projet de recherche européen INCORE (INtegrated COncept for groundwater REmediation) du 5e PCRDT (période 2000-2003), dans lequel une nouvelle approche d'investigation intégrale de la qualité de la nappe a été testée et validée sur des sites industriels pollués par des solvants chlorés dans quatre villes européennes (Milan, Strasbourg, Stuttgart et Graz).

Cette technique fondée sur la quantification de l'émission de polluants et l'inversion mathématique des courbes de concentrations mesurées pendant des essais de pompage à l'aval de la zone polluée, a permis de fournir le profil transversal de concentrations au droit du puits.

La mise en œuvre de cette technique sur le site de la plaine des Bouchers à Strasbourg a permis de confirmer que le polluant principal est le PCE, et que, fin 2000, les flux massiques du PCE dans le panache ont été de l'ordre de 200 g/j. La méthode d'investigation intégrale a ainsi fourni un profil transversal de concentration du PCE au droit du puits 933 avec des concentrations maximales comprises entre 25 et 35 µg/l.

Les simulations numériques effectuées ont cependant montré les limites de la technique, notamment lorsque le panache de polluant dissous est caractérisé par un rapport élevé entre le gradient de concentration longitudinal et le gradient de concentration transversal. En 2005, un projet R&D, portant sur l'étude méthodologique d'évaluation de pollution multisites, cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, et en collaboration avec le BRGM, a été mené.

L'objectif a été d'appliquer la technique de pompage intégral du projet INCORE pour distinguer les panaches issus de différentes sources de pollution et d'évaluer les flux de polluants. Le secteur d'étude est une zone très industrialisée du Dreieckland, région dite des trois frontières située au Nord de Bâle comprenant les communes de Hégenheim, Huningue, Hésingue, Saint-Louis et Village-Neuf.

Cette région est affectée de diverses pollutions avérées ou suspectées liées notamment à un certain nombre de décharges d'ordures ménagères suspectées d'avoir accueilli des déchets de l'industrie chimique. Les recherches ont porté sur trois aspects :

– mise en place d'un modèle d'écoulement régional 2D pour la région transfrontalière (Suisse, France) au Nord de Bâle en intégrant les données hydrodynamiques disponibles ;

– calibration du modèle hydrodynamique en régime d'écoulement permanent et transitoire sur la base de relevés piézométriques 2000-2004 ;

– dimensionnement des essais de pompage au moyen du modèle hydrodynamique calibré en régime transitoire.

– Dans le cadre du programme de R&D MACAOH (Modélisation Atténuation Caractérisation dans les Aquifères des Organo-Halogénés) (2001-2006), soutenu par l'ADEME, l'IFARE a réalisé sur SCERES des travaux qui visent à mieux caractériser les zones sources de pollution où les résultats obtenus en relation avec les sites industriels sont destinés à élaborer des outils d'aide à la décision, sous forme de protocoles techniques permettant de guider les maîtres d'ouvrages et les bureaux d'études lors d'études de diagnostic-pollution sur des sites industriels contaminés par des solvants chlorés.

Les chercheurs de l'IFARE ont été sollicités à ce titre, pour étudier deux aspects concernant l'eau souterraine : d'une part sur le plan des performances et de l'applicabilité de la méthode du traçage bi-soluble (PITT) (Partitioning Interwell Tracer Test) pour localiser et quantifier une pollution résiduelle dans le réservoir souterrain, et d'autre part, sur la représentativité des prélèvements effectués dans les piézomètres.

Sur le traçage bi-soluble, les principales recommandations de l'IFARE consistent à connaître au préalable la cinétique de partage du traceur bi-soluble dans les conditions d'écoulement attendues avant de mener les investigations sur site, et aussi à porter une attention particulière sur l'ampleur de la zone d'emprunt du couple de traceurs (idéal et réactif) afin de pouvoir optimiser les échanges des traceurs avec le polluant. Sur la question de la représentativité des

prélèvements dans un piézomètre, les premiers dispositifs de prélèvements multi-niveaux (DMLS, PDB,…), testés sur SCERES, ont mis en évidence leur difficulté à restituer des pics de concentrations très localisés dans une nappe souterraine.
L'IFARE, en partenariat avec le BURGÉAP, s'est fixé alors comme objectif dans les recherches en cours de concevoir une nouvelle approche/instrumentation permettant de mieux prendre en compte les fortes hétérogénéités de distributions verticales des concentrations dans l'eau souterraine.

Une approche de calcul a été développée pour quantifier la distribution verticale en zone saturée d'aquifères poreux d'un solvant chloré sous forme résiduelle à partir de concentrations en traces dissoutes mesurées à proximité de la source présumée. S'appuyant sur une inversion itérative des profils de concentration pour retrouver la localisation et le volume initial du polluant dans la zone source, cette étude analytique a été ensuite couplée avec une modélisation numérique du transfert et du transport de traces dissoutes. L'approche innovante a été appliquée à un cas de pollution contrôlée en TCE sur le site expérimental SCERES et à un cas de pollution en PCE sur un site industriel.

Pollution de captages d'eau potable dans la nappe. Modélisation et prévention active

Les travaux de modélisation mathématique effectués peuvent être regroupés en deux parties : d'une part la vérification et l'analyse des performances des méthodes de résolution des équations décrivant l'écoulement de la nappe et le transport de polluants dans la nappe, d'autre part l'identification des paramètres nécessaires à la mise en œuvre des modèles. À ce titre, les chercheurs de l'IFARE ont notamment mis au point deux types de modèles :

– un outil de simulation couplant l'hydrodynamique et l'hydrochimie, utilisé pour décrire les écoulements en aquifères alluviaux et la propagation des polluants en zone saturée ;

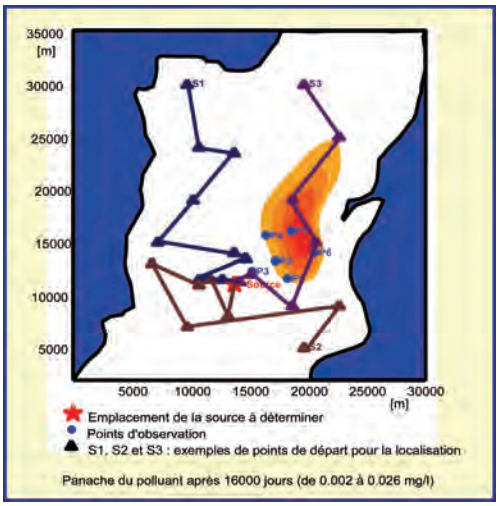
– un modèle numérique simulant l'hydrodynamique en milieu non saturé permettant de calculer la quantité d'eau qui circule de la surface du sol jusqu'à la nappe.

Les modèles développés font appel à des méthodes numériques robustes et récentes pour la résolution des équations différentielles telles que les éléments finis mixtes et les éléments finis discontinus.

En outre, les chercheurs ont été sollicités pour tester ces outils dans le cadre du programme européen LIFE. Ce programme communautaire conduit par le Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) du Bade Wurtemberg, de 1994 à 1996, avait pour objectif final de mettre au point un modèle hydrodynamique appliqué à la nappe de la plaine du bassin du Rhin supérieur.

L'ensemble de la plaine rhénane a été découpé en 11 zones, 5 en France et 6 en Allemagne. Deux secteurs " Strasbourg " et " Offenburg " ont fait l'objet de deux modélisations hydrodynamiques différentes.
L'une par une simulation numérique utilisant le modèle de différences finies MODFLOW et un calage manuel.
La seconde, effectuée à l'IFARE, par approche inverse (HPP-INV) qui utilise la méthode des éléments finis couplée à des outils d'identification automatique des paramètres. Sur le domaine à modéliser d'une superficie de 1014 km^2, quatre paramètres ont été identifiés : les apports d'eau latéraux au niveau des conditions aux limites à l'Est (Forêt Noire) et à l'Ouest (Vosges) du domaine, les coefficients d'échanges nappe-rivière, les conductivités hydrauliques et la valeur moyenne de la recharge de la nappe.

Par ailleurs, les techniques d'identification de paramètres comme la méthode des sentinelles permettant la hiérarchisation des sources de pollution ont suscité l'intérêt des utilisateurs potentiels et ont été testées sur plusieurs cas d'école avec des résultats prometteurs.



Pollution de la nappe du Rhin par du CCl 4 : Localisation de la source par la méthode des sentinelles. *L. Zilliox*

En 2009, l'IFARE a été regroupé avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Strasbourg (IMFS), le Laboratoire de Géologie de l'Université de Strasbourg et une partie de l'École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), pour créer le LHyGeS (Laboratoire d'Hydrologie et de Géologie de Strasbourg, UMR 7517 du CNRS.

Lothaire ZILLIOX, Paul MUNTZER,
Olivier RAZAKARISOA, Gerhard SCHÄFER

ÉCOLE DES MINES DE PARIS

L'enseignement en hydrogéologie

De longue date, l'enseignement de la géologie appliquée aux élèves-ingénieurs de l'Ecole des Mines de Paris comportait un enseignement de l'hydrogéologie, conçue comme appliquée aux travaux de l'ingénieur ou à l'activité minière. Jean Goguel, par exemple, incluait dans son enseignement quelques notions d'hydrogéologie.

Mais c'est à Hubert Pélissonnier, professeur de métallogénie, que revint la tâche de créer un enseignement moderne de l'hydrogéologie dans les années 1950. Voulant aborder le sujet sous l'angle quantitatif, il constitua un premier cours développant les équations de base des écoulements souterrains, à partir de la Loi de Darcy, de l'équation de continuité et des équations d'état des fluides et de la matrice poreuse, aboutissant à l'équation dite de la diffusivité. Il poursuivit par la résolution analytique de cette équation, avec les solutions classiques en écoulement parallèle ou radial (hydraulique des puits et essais de débit), ou les méthodes générales de résolution comme le potentiel complexe et les transformations conformes.

Il alla chercher les bases de cet enseignement, qui n'était traité en France que dans les écoles d'hydraulique ou Instituts de Mécanique des Fluides (Grenoble, Toulouse, Strasbourg...) chez les auteurs russes (Polubarinov-Kochina…) ou américains et anglais (Muskat, Hantush, Boulton…).

Ces cours, optionnels, d'une trentaine d'heures par an, s'adressent d'abord à ceux ayant choisi la spécialité géologie, mais aussi aux autres élèves. Une trentaine d'ingénieurs sont ainsi formés chaque année. Cet enseignement a été repris en 1972 par Ghislain de Marsily et en 1995 par Emmanuel Ledoux assisté de P. Goblet.

Parallèlement, un Ingénieur des Mines intéressé par les problèmes d'estimation minière, Georges Matheron, consacre une partie de sa recherche aux problèmes hydrogéologiques et de transport en milieu poreux. Il publie en 1967 " Eléments pour une théorie des milieux poreux ", en s'inspirant de l'école russe initiée par Schwidler, où il démontre comment s'établit la linéarité de la Loi de Darcy, puis traite du problème du changement d'échelle et de l'estimation des perméabilité moyennes. Ouvrage très important mais de lecture difficile, ce livre est peu connu en France mais plus cité à l'étranger. Associé à ses travaux sur la géostatistique et le krigeage, Georges Matheron jettera ainsi en pionnier les bases de l'hydrogéologie stochastique, que reprendra ensuite en France J.-P. Delhomme en 1979, puis les écoles américaines avec L. Gelhar au MIT et israélienne avec G. Dagan. Il continuera de temps en temps à publier des articles très fondamentaux sur ces sujets, comme celui sur la dispersion en 1980 (Is transport in porous media always diffusive ? Water Resources Research) qui sera le premier à expliquer l'effet d'échelle du coefficient de dispersion, mis en évidence expérimentalement par Pierre Peaudecerf au BRGM.

La recherche en hydrogéologie

La recherche en hydrogéologie à l'Ecole des Mines de Paris a été initié par Yves Emsellem, jeune Ingénieur des Mines en poste à Bordeaux, qui avait été confronté aux problèmes des ressources en eau de la Ville de Bordeaux dans la nappe de l'Eocène, sur lequel H. Schoeller avait tiré la sonnette d'alarme au sujet des rabattements trop importants risquant d'engendrer une arrivée d'eau salée dans l'aquifère éocène, et éventuellement dans les nappes superficielles et le vignoble.

Ayant suivi les cours de H. Pélissonnier, il se lança dans l'hydrogéologie mathématique et fut par exemple le premier à inverser le paramètre " u " de la courbe de Theis pour interpréter les essais de débit, de façon à ce que le temps se lise en croissant de gauche à droite en abscisse, et non en inverse du temps comme le faisaient les Américains.

Il réussit à convaincre en 1967 Pierre Laffitte, alors Directeur des Recherches de l'Ecole des Mines, de créer un Laboratoire d'Hydrogéologie Mathématique au sein du Centre d'Informatique Géologique que P. Laffitte dirigeait à l'époque à Fontainebleau.

Yves Emsellem prit alors la direction de ce Centre d'Informatique Géologique à l'Ecole des Mines jusqu'en 1973. Il mit l'accent initial sur les modèles mathématiques en hydrogéologie (rappelons que le premier modèle mathématique hydrogéologique en France fut créé par Jacques Zaoui à SOGREAH au début des années 1960 sur le Chott-el-Chergui en Algérie).

Il s'entoura initialement d'une petite équipe où figurèrent entre autres G . Assens, A. Bendhia, E. Cordier, J.-P. Delhomme, A. Dreyfus, P. Goblet, P. Hubert, E. Ledoux, Y. Lerolle, A. Levassor, G. de Marsily, D. Poitrinal, M. Poulin, D. Rousselot, et bien d'autres, auxquels se joignirent ultérieurement M. Besbes, D. Bruel, P. Combes, A. Coudrain, L. Dewindt, G. Girard, P. Iris, Ph. Jamet, F. Habets, V. Lagneau, B. Madé, J. Vanderlee, P. Viennot, F. Vincent et bien d'autres encore.

Un flux régulier de 2 à 4 thésards par an a soutenu les recherches. Ce Centre créa des modèles monocouches, puis multicouches (NEWSAM, par E. Ledoux appliqué

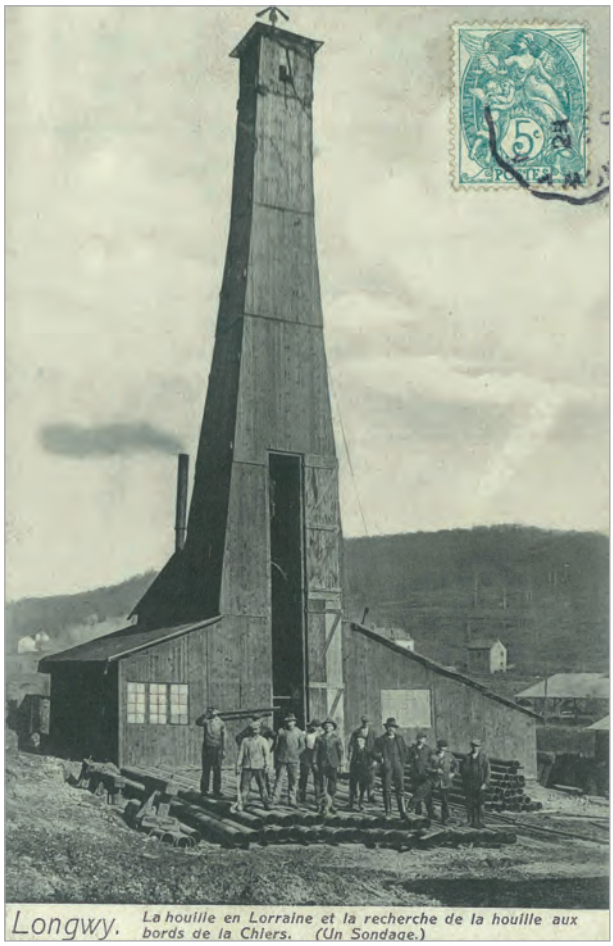
initialement au Bassin aquitain), puis de transport en éléments finis (METIS, par P. Goblet).

Le Centre fut ensuite dirigé par G. de Marsily de 1973 à 1984, puis par E. Ledoux de 1984 à 2006 pour être fusionné depuis cette date dans un Centre de Géosciences, regroupant l'ensemble des Sciences de la Terre à l'Ecole des Mines, dirigé par D. Goetz.

Le Centre d'Informatique Géologique a aussi étudié les problèmes dits " inverses " d'identification des paramètres des modèles à partir des mesures de charge, le transport des polluants dans les aquifères et milieux peu perméables, en particulier les radionucléides issus de l'enfouissement de déchets nucléaires, la géothermie et le stockage de chaleur dans les nappes (P. Iris), et construit l'un des premiers modèles couplant les écoulements souterrains et les écoulements de surface pour représenter simultanément l'ensemble des mécanismes hydrologiques à l'échelle d'un bassin.

Il a réalisé de nombreuses études et expertises en France et à l'étranger avec ces modèles, dont un certain nombre appliqué au domaine de l'après-mine (arrêt de l'exhaure, pollutions des eaux, etc). Ce Centre a aussi participé activement à la formation initiale et continue ; il a ainsi organisé annuellement depuis 1969 un séminaire d'initiation à la modélisation mathématique des systèmes hydrologiques, par lequel est passé un bon nombre de professionnels et d'étudiants en France ou en Europe, de toute origine.

Ghislain de Marsily
Emmanuel Ledoux



Tour de forage de Charbon (vers 1920)

Forage d'eau minérale de Nancy Thermal

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE GÉOLOGIE DE NANCY

L'Institut de Géologie Appliquée de Nancy (IGAN), précurseur de l'ENSG, fut créé par René Nicklès en 1908 avec l'objectif de former des ingénieurs exerçant leur savoir-faire dans la recherche, l'exploitation et la valorisation des matières premières minérales. En ce début de siècle, l'université de Nancy était en plein développement du fait de l'annexion des départements de Moselle et du Rhin par l'Allemagne. Ainsi, les premiers cours d'hydrogéologie ont été dispensés dès le début du siècle dans le cadre d'un programme général qui allait s'étoffer au fil des années. En 1937, Albert Robaux, enseignant à l'École, était détaché dans le Sud marocain pour deux ans afin de diriger une mission d'hydrogéologie ; le développement de l'école française d'hydrogéologie en Afrique du Nord commençait alors.

En 1944, après le deuxième conflit mondial, l'Institut, dont quelques rares élèves s'étaient déjà lancés dans l'hydrogéologie, comme Marcel Roubault et R. Ambroggi au Maroc, est transformé par décret en ENSG (École Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière), confirmé par un nouveau décret en date du 27 mars 1948. Les contraintes liées à la reconstruction du territoire et à la remise en exploitation des mines lorraines, sarroises et alsaciennes, incitent alors l'ENSG, conception visionnaire de l'époque, à mettre en place des stages en entreprises au cours du cursus scolaire de trois années.

C'est encore au Maroc, où A. Robaux avait créé le Centre d'Études Hydrogéologiques, que débutèrent les premiers élèves voués à l'hydrogéologie : Edmond Bolleli et Pierre Taltasse en 1946, Jean Margat en 1947, dont les travaux, mondialement connus, ont contribué largement au développement de l'hydrogéologie française (cf. p. 100).

L'enseignement en hydrogéologie s'enrichit dès 1947 dans le cadre de " l'application de la géologie à l'hydrogéologie " grâce à l'intuition du doyen Marcel Roubault. Ces cours vont se développer en s'appuyant sur un corpus d'enseignants et d'ingénieurs en activité qui sauront établir des passerelles entre l'enseignement et l'industrie, mais également avec d'autres formations, santé, pédologie, génie civil… Dans les années 1960, l'enseignement bénéficie de l'expérience nord-africaine de grands noms de l'hydrologie (Jean Archambault notamment) et du pétrole (Alain Perrodon). Un cours spécialisé d'hydrogéologie est confié à Jean Aurouze dès 1962.

Après la création du BRGM en 1959, la mise en place de la loi sur l'eau (1964) et la création des Agences financières de bassins en 1966 accélèrent la demande du marché français dans les domaines de l'exploitation des eaux

Chevalets de puits de mines (vers 1920)

Marcel Roubault. *ENSG.*

L'école nationale supérieure de Géologie de Nancy. *ENSG*

Jean Margat reçoit le «Prix du Président» de l'AIH
(Dijon, 30 mai 2006)
À G. : W. Struckmeïer, Secrétaire Général de l'AIH et S. Foster,
Président de l'AIH. *P. Marchet*

Jean Margat reçoit le prix AIHS/OMM à l'UNESCO
(Paris, 10 juin 2008)
De G. à Dr. : A. Szollosi-Nagy (UNESCO), A. Askew (AIHS),
J. Margat et G. Arduino (WMO - OMM). *J.-C. Roux*

et de l'aménagement du territoire. Cela se traduit par la mise en œuvre de l'inventaire des ressources hydrauliques au sein de services géologiques régionaux. Pour répondre à cette attente apparaît en 1966 à l'ENSG, un programme de formation en géotechnique et hydraulique, puis la création en 1971 du Centre de mécanique des sols et des roches dirigé par René Houpert. Simultanément est mise en place une formation en hydraulique souterraine sous la conduite de Laurent Demassieux en 1969, confortée en 1971 par des cours d'hydrologie mathématique animés par J.-P. Laborde. Avec l'individualisation d'une option " hydraulique appliquée à l'hydrogéologie et au pétrole ", cette spécialisation du tronc commun de troisième année atteint alors sa pleine maturité.

En 1971, l'ENSG participe à la création de l'INPL (Institut National Polytechnique de Lorraine) avec les autres grandes écoles d'ingénieurs de Nancy, ENSAIA (agronomie), ENSEM (électricité), ENSMIM (mines) et ENSIC (chimie), source de synergies en enseignement et recherche appliquée. La diversification progressive des géosciences a ainsi donné naissance à un cursus spécifique au domaine de l'eau et de l'environnement, à côté de ceux du génie civil, de l'exploitation du pétrole et, enfin, de prospection minière et de traitement des minerais. En un siècle, les cours se rapportant à l'hydrogéologie sont passés de quelques heures d'enseignement à plus de 200 heures pour les élèves qui choisissent cette spécialisation de 3e année.

L'ENSG a ainsi contribué à la formation de grands noms de l'école française de l'eau, notamment Jean Margat, fondateur de l'hydrogéologie moderne aux côtés d'universitaires de renom tels Gilbert Castany et Henri Schoeller. En parallèle, se mettaient en place des équipes d'hydrogéologues issus de l'ENSG dans les universités et établissements à rayonnement international (BRGM, BCEOM, BRE…), ainsi que dans les Agences de l'eau, les collectivités et les entreprises industrielles. Tous ont œuvré pour faire rayonner l'École française de l'hydrologie reconnue par le prix spécial de l'Association Internationale de Sciences Hydrologiques décerné en 2008 à J. Margat, à Paris, à l'AISH et l'UNESCO, lors du colloque sur la " Gestion des eaux souterraines ", et pour la première fois à un hydrogéologue.

Aujourd'hui, plus de 3 000 ingénieurs ont été formés à l'ENSG dont environ un tiers issus de la filière eau, formations permettant d'accéder à de nombreux postes où la composante " eau " est une des clefs du développement durable des sociétés humaines.

Serge RAMON
Jacques RICOUR

BRGM

Le BRGM tel qu'il est connu actuellement est issu de nombreuses restructurations.

Vers la fin des années 30, Édouard Friedel, ingénieur des Mines, et Pierre Pruvost, professeur à la faculté des Sciences de Lille, prônent la création d'un organisme chargé de la sauvegarde des données sur le sous-sol (puits, forages, carrières, travaux souterrains).

En 1941, est créé le Bureau de Recherches Géologiques et Géophysiques (BRGG), service extérieur du ministère chargé des Mines, dont la direction est confiée à E. Friedel, assisté de Jean Goguel et de Louis Guillaume.

La loi du 10 octobre 1941 rend obligatoire la déclaration de tout ouvrage souterrain de plus de 10 mètres et tout levé de mesures géophysiques (articles 131 et 133 du Code minier), et la conservation des données est confiée au BRGG.

En 1953, le BRGG devient le Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières, de la France métropolitaine (BRGGM), établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). Outre les attributions du BRGG, il est habilité à la prospection et à l'exploitation de concessions minières et à prendre des participations dans des sociétés d'exploitation.

En 1959, après l'accession à l'indépendance des territoires coloniaux d'Afrique et de Madagascar, le regroupement des bureaux miniers d'Outre-mer (BRMA, BMG) et du BRGGM donne naissance au BRGM.

Entre 1960 et 1962, le BRGM reprend le Service de la Carte Géologique de Guyane, une grande partie des personnels de la Direction fédérale des Mines et de la Géologie d'AOF et d'AEF, puis, en 1968, il englobe le Service de la Carte Géologique de la France, et en 1970 celui de la Carte Géologique d'Alsace-Lorraine (SCGAL).

Les prémices de l'hydrogéologie

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

En effet, compte tenu de l'abaissement préoccupant du niveau des nappes dans certaines régions industrialisées (Nord – Pas-de-Calais, Lorraine, Gironde, Seine-Maritime), le BRGGM créa des Services d'Inventaire des Ressources Hydrauliques (IRH), sous l'impulsion de P. Lafitte, L. Guillaume et J. Ricour, tout d'abord dans le

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*

Le département Hydrogéologie en 1971
1. E. Berkaloff ; 2. J.-M. Dezwarte ; 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

Nord - Pas-de-Calais, puis en Lorraine, Gironde et Seine-Maritime, ainsi que dans le Jura et l'Yonne.

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 Tazzief. *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 1/8e 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 3e 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 Mégnien, 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

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

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

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, pompages 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).

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 plupart) 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...

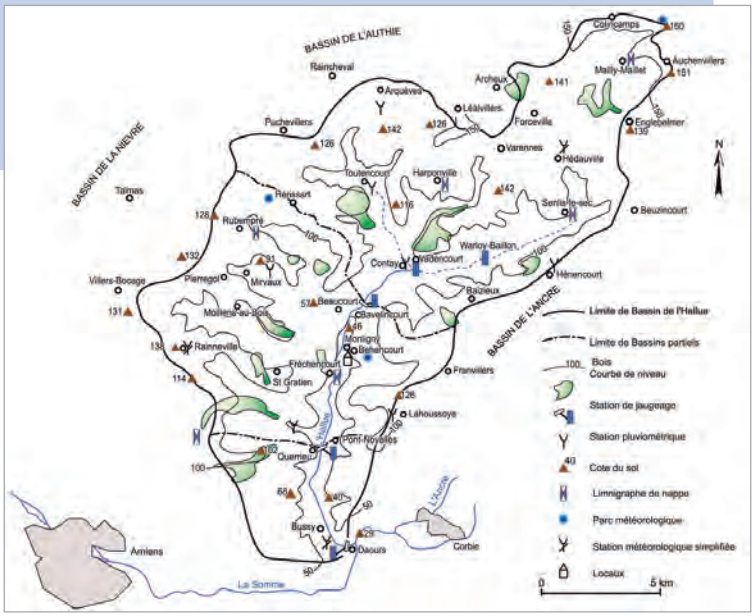
La nappe de la craie a fait l'objet des premières modélisations, les écoulements ont été simulés à moins de 15 % près. Un modèle de calcul de l'évapotranspiration a été mis au point. Plusieurs études statistiques ont été réalisées sur les relations pluies-débit, l'optimisation des points de mesures pluviométriques et piézométriques.

Deux des stations de jaugeage (Bavelincourt et Querrieu) 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 km^2.
- Altitude moyenne : 96 m (mini 27 - maxi 160).
- Surface de plateaux : 123 km^2.
- Surface de vallées sèches et humides : 75 km^2.
- Surface des vallées humides : 5 km^2.
- 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 Mm^3/an (moyenne : 17,6 Mm^3/an).
- Capacité d'emmagasinement : 21,6 Mm^3/an.

Caractéristiques hydrologiques
- Débit moyen annuel : 1,14 m^3/s ; d'étiage : 0,62 m^3/s.
- Débit spécifique moyen : 5,2 l/s/km^2.
- Lame 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..

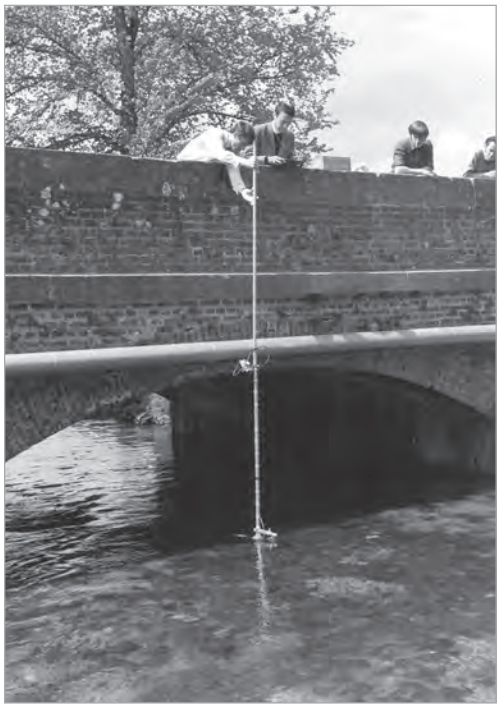
Des jaugeages de sources et de cours d'eau étaient effectués régulièrement dans certaines régions (Nord, Pas-de-Calais, Picardie, Normandie), ces " réseaux hydrométriques " ayant pour objectif d'étudier les relations entre eaux souterraines et de surface dans les bassins sédimentaires, et d'effectuer 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-Monpelliéraines. *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. Trémenbert à Dr.), 1975. *BRGM*

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*

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 pompages 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/rivière), 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

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 m^3/h, et exceptionnellement de 50 à 100 m^3/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).

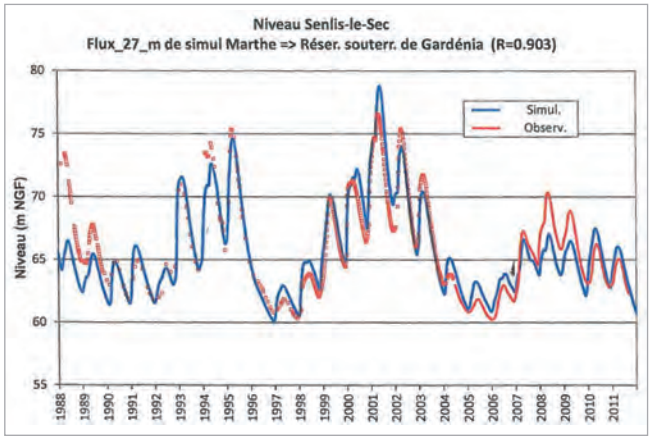
Au début des années 2000, les travaux de recherche dans les aquifères du socle se poursuivent avec les programmes SILURES, RAPSODI en Ille-et-Vilaine, et CASPAR.

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 préfectures.

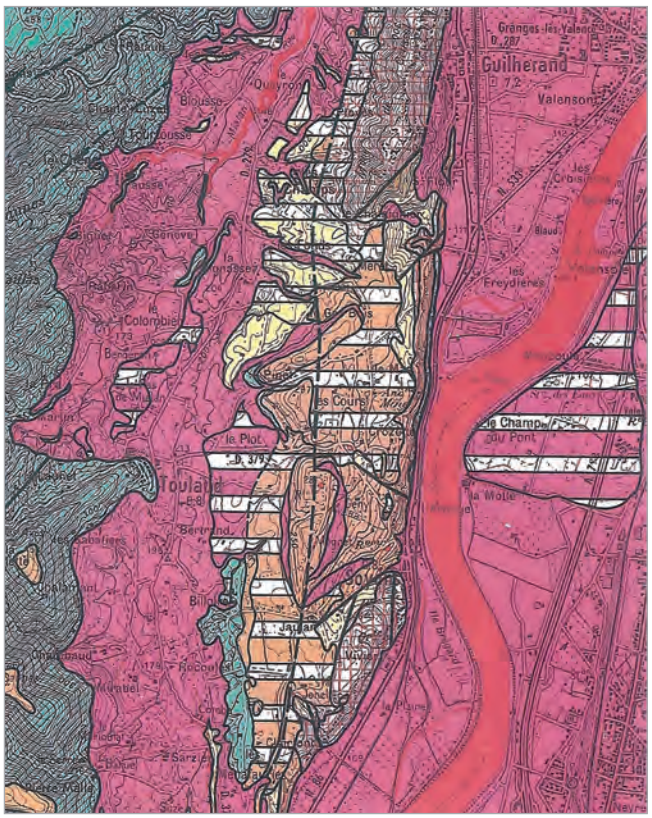
Les roches carbonatées font l'objet de nombreuses études et recherches dans les régions et massifs calcaires (Craie du Nord, du Bassin de Paris, Jura, Préalpes, Causses, Provence, Pyrénées). Parmi les plus célèbres, le système karstique de la Fontaine de Vaucluse et la Craie en Picardie (bassin de l'Hallue) 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*

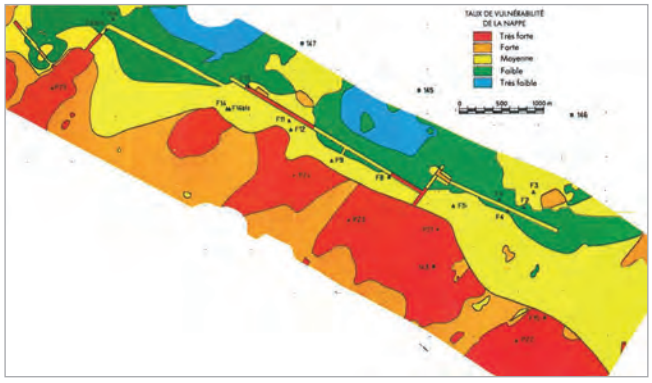
Pompage d'essai dans la nappe de la Craie à Radicatel (Seine-Maritime) pour l'AEP du Havre. *J.-C. Roux, 1975*



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*



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

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 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'Allier, Lorraine…). La méthodologie est affinée par l'utilisation de méthodes multicritères.

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.

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 ".

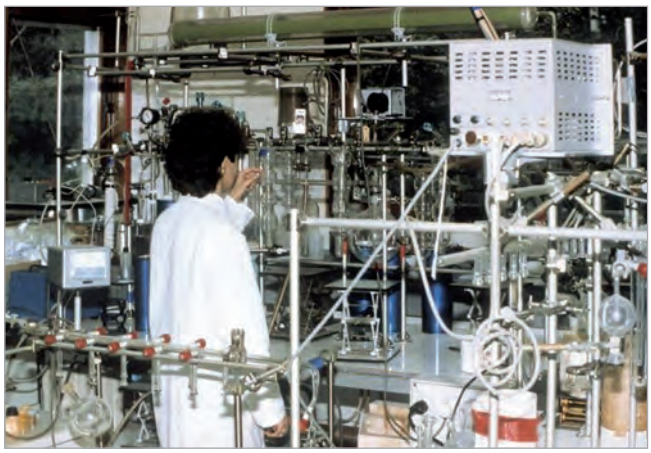
Les progrès de l'infographie permettent des avancées significatives dans la cartographie avec les approches " multicritères ", associant paramètres géologiques, technologiques, socio-économiques (de la ressource en eau, de l'aptitude à l'assainissement individuel, de résistance à la sécheresse) ou encore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

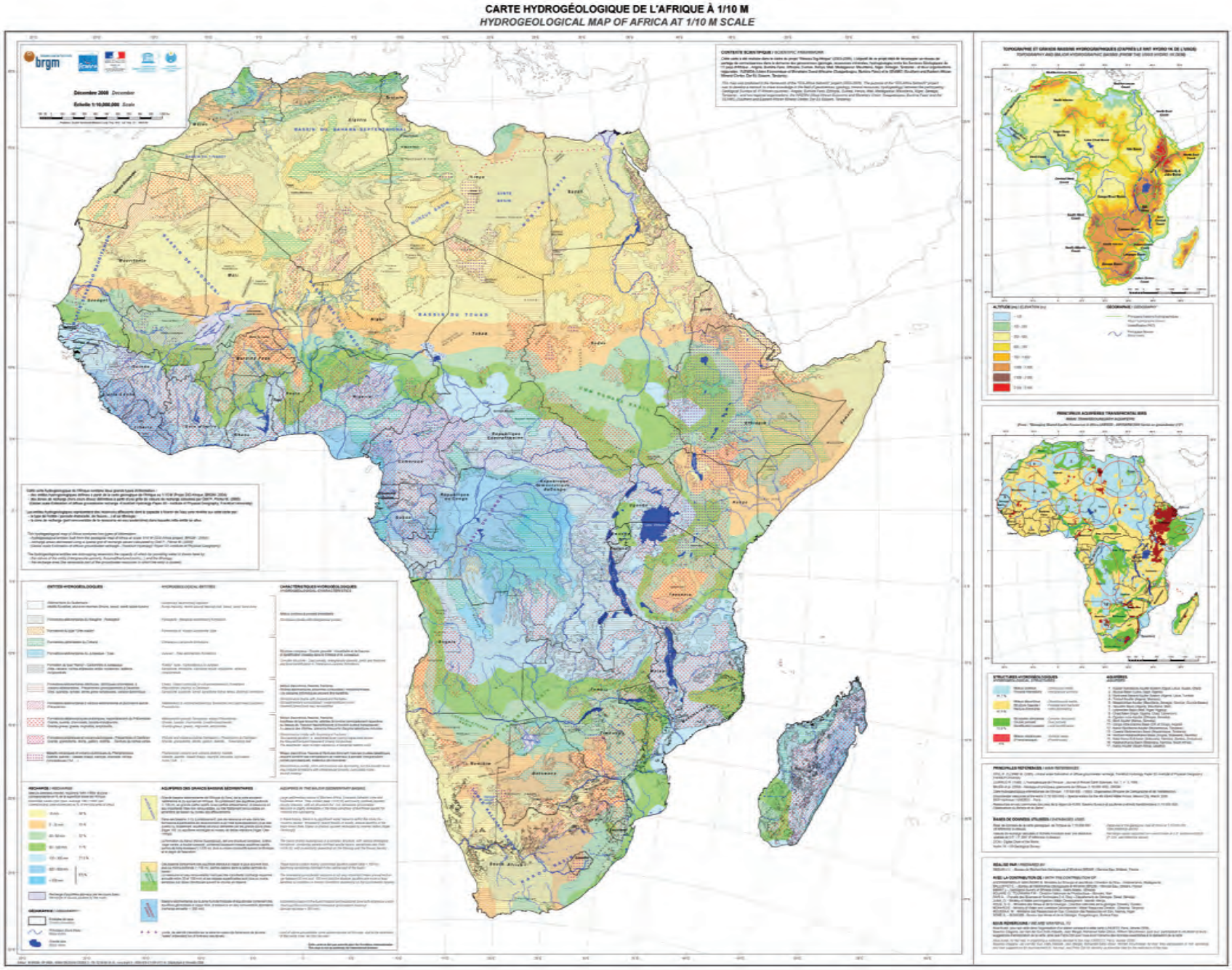
■ **En Australie**, dans les années 70, des hydrogéologues du BRGM détachés auprès de la " Water Conservation and Irrigation Commission du New South Wales " ont apporté leur concours à l'étude, à l'évaluation et au développement des ressources en eau dans le versant ouest des reliefs côtiers.

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 km^2 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. *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.

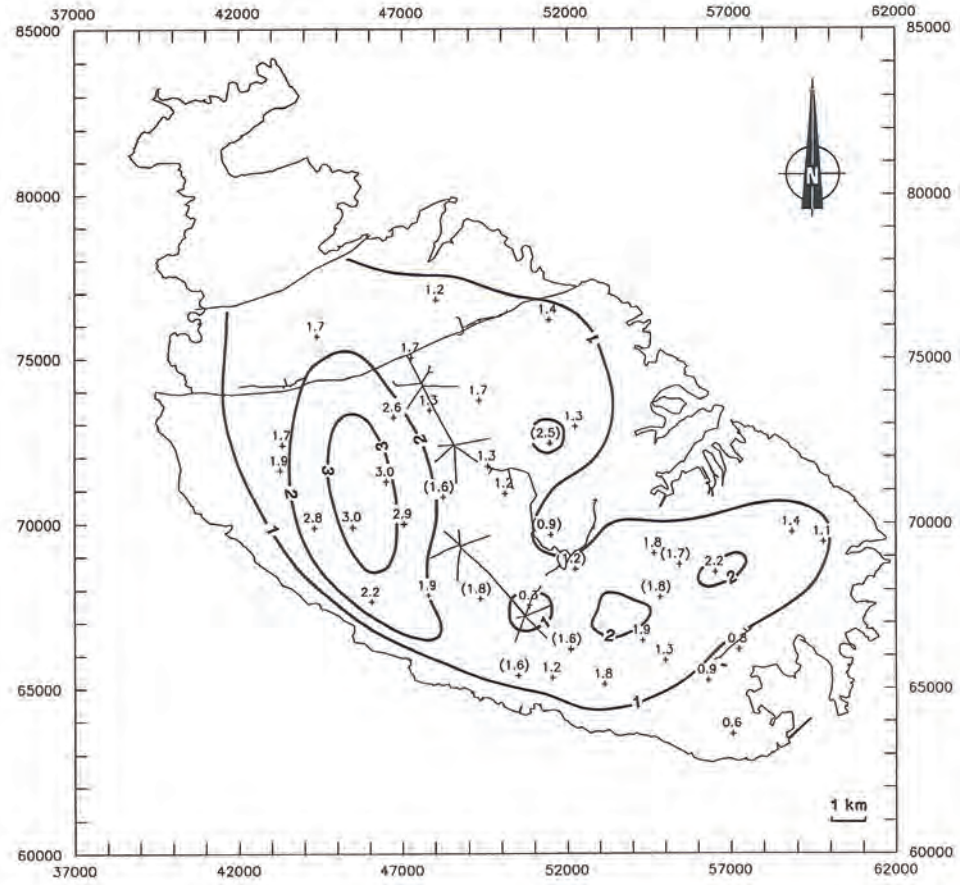
Les échelles de travail sont très variables : elles vont de la dimension multinationale (Carte Hydrogéologique de l'Afrique au 1/10 000 000), à nationale (cartographie hydrogéologique du Sultanat d'Oman au 1/1 000 000) et régionale (cartographie des ressources en eau souterraine du Burundi au 1/250 000).

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

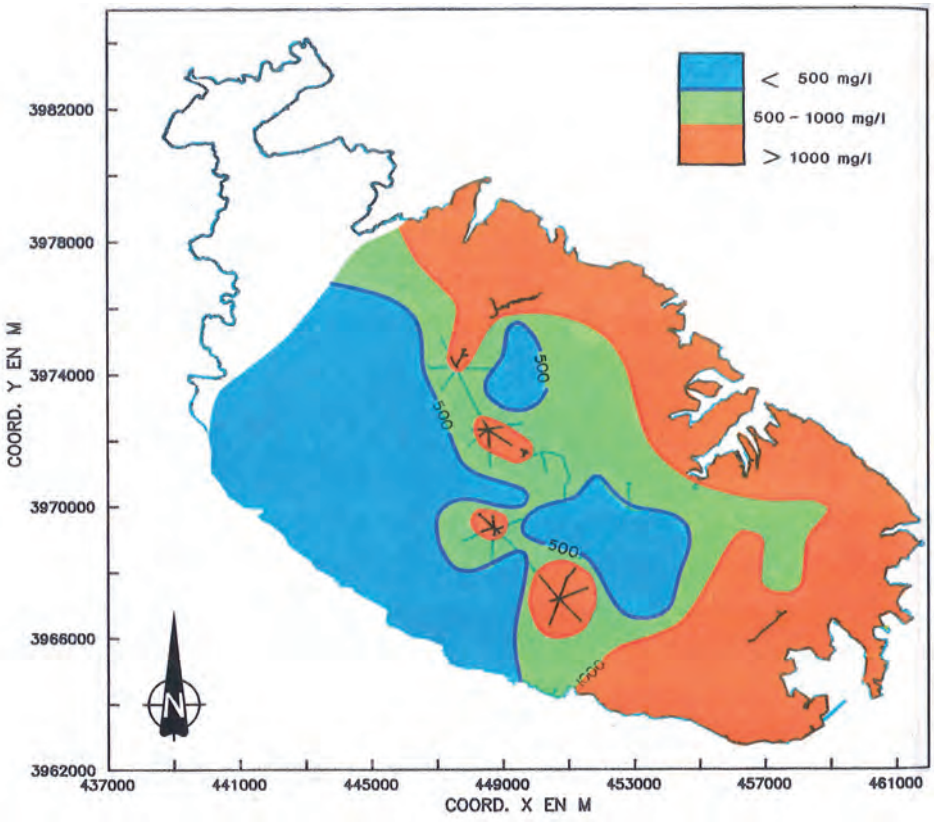
Forage en Grèce. *R. Biscaldi, 1972*

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 (Nigéria, 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, CO_2).

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 CO_2, 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 cenrale 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…).

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.

Soultz-sous-Forêts
Un site référence en géothermie profonde

Le projet franco-allemand de géothermie profonde de Soultz-sous-Forêtz 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 (Groupement 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 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

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

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.

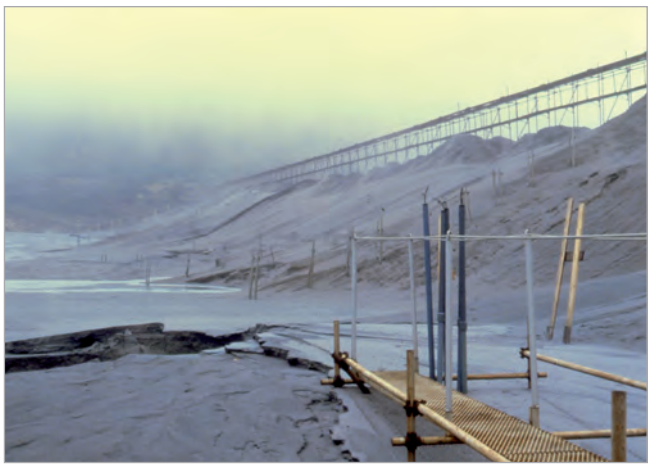
Les études ont commencé dès le début des années 70 pour les déchets ménagers ou industriels, avec des inventaires régionaux de sites peu perméables favorables à l'implantation de décharges, ou nationaux (sites POLMAR) ainsi que pour l'enfouissement de cadavres d'animaux en 1973 , en cas d'épidémies. 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)…).

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

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.



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

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.

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 prospecter 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).

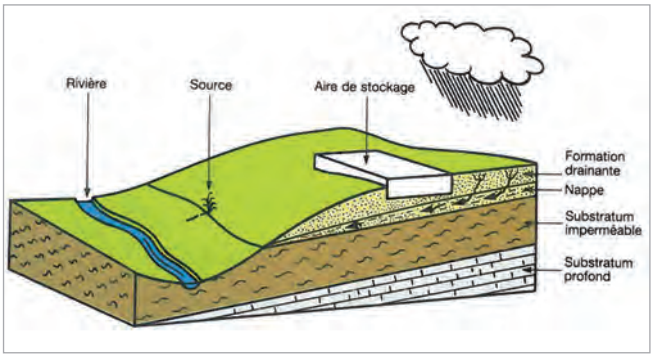
En 1999, le site de Bure (Meuse) concernant les argiles callovo-oxfordiennes, reconnues à Montcornet, situées à 420-550 m de profondeur, est sélectionné pour y implanter un laboratoire souterrain.
L'ANDRA confie à ANTEA la maîtrise d'œuvre scientifique du creusement des deux puits, de 5 et 6 mètres de 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'" 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 MDPA, 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)

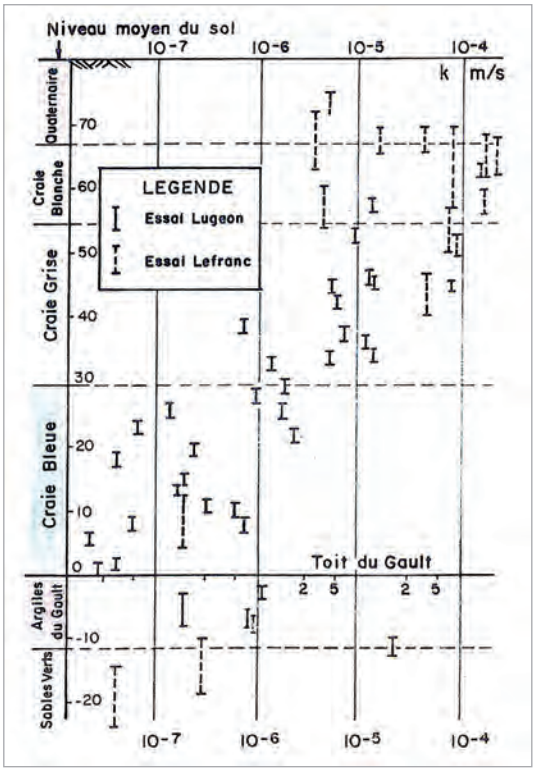
dans l'île Seguin à Boulogne-Billancourt, Metaleurop à Noyelles-Godault, et le terril d'arséno-pyrite de Chessy.

Travaux souterrains - Risques naturels

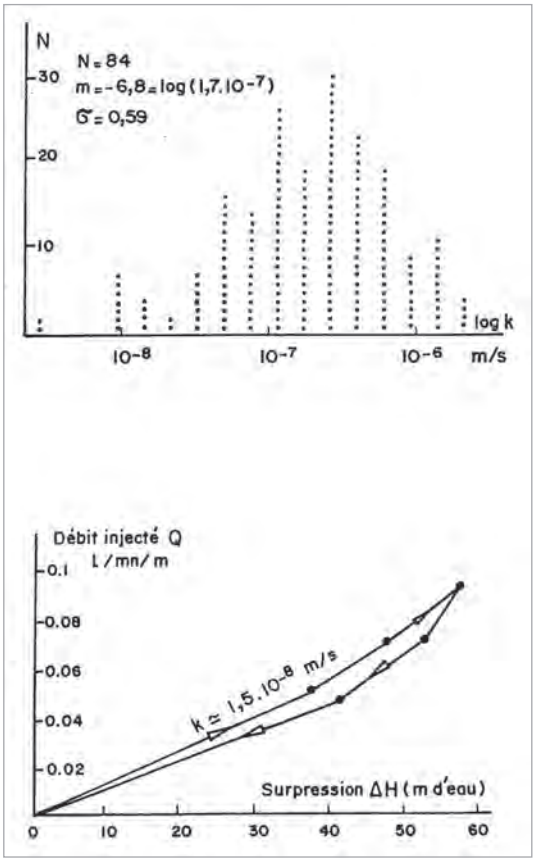
Ce sont les conditions hydrogéologiques qui déterminent pour une large part la faisabilité et le coût des ouvrages exécutés dans le sous-sol : fondations profondes, grandes fouilles et déblais, mines et ouvrages souterrains, etc. Le dossier hydrogéologique est donc un élément essentiel des projets correspondants ; 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 (déduit 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



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*

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 Cénomanien, 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 logarythmique de $1{,}7.10^{-7}$ 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 :

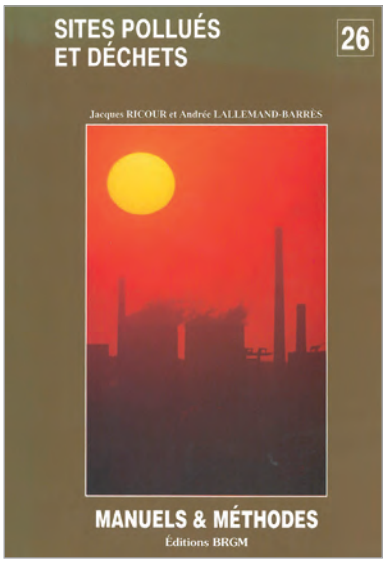
- Le bilan de l'exhaure des galeries hydroélectriques d'EDF en Maurienne, qui, sur un linéaire total de 104 km, ont donné en moyenne un débit spécifique stabilisé de 9,5 l/s/km ;
- L'étude de 961 points d'eau (sources, captages, puits, torrents…) identifiés au voisinage du tracé et susceptibles d'être 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

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.

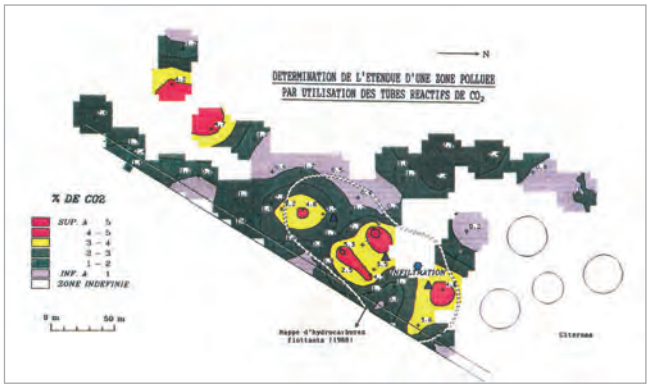
La synthèse de ces données a permis de calculer au sein de chacun de ces ensembles, d'une part le débit transitoire prévisible dans les 100 m suivant le front de taille, d'autre part le débit stabilisé loin du front, compte tenu de la perméabilité, de la profondeur et de la réalimentation par les pluies. En fin de compte, le débit d'exhaure prévisionnel devrait atteindre entre 1,2 et 2,3 m^3/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, dûs 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.



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



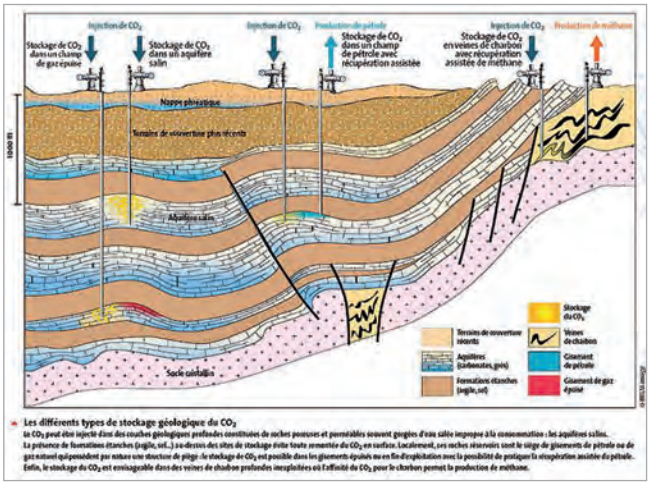
Détermination d'un sol pollué par hydrocarbures par mesure du CO_2. *BRGM*

Confinement géologique du CO_2

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 CO_2, vers la surface, et la profondeur doit être suffisante pour atteindre des conditions de pression et de température qui déterminent



Conditions de confinenent du CO_2 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 Ungerground Disposal of Carbon dioxyde " (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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2.

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 CO_2 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 CO_2 Geonet, réseau d'excellence européen sur le stockage du CO_2.

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.

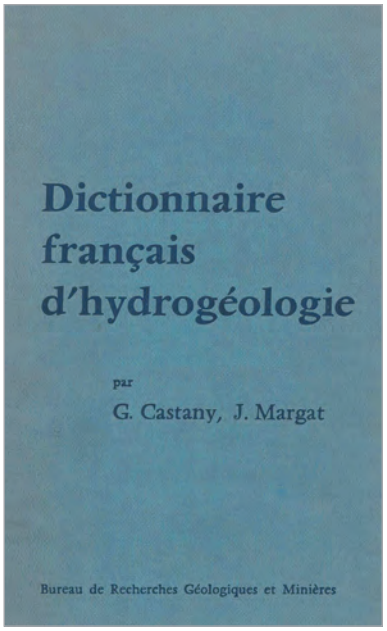
Diffusion des connaissances et éditions

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

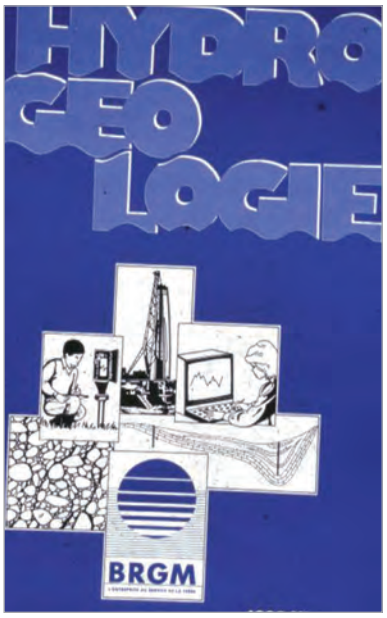
- l'édition d'ouvrages de référence (cf. chap. IX) parmi lesquels :

- " *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* ".

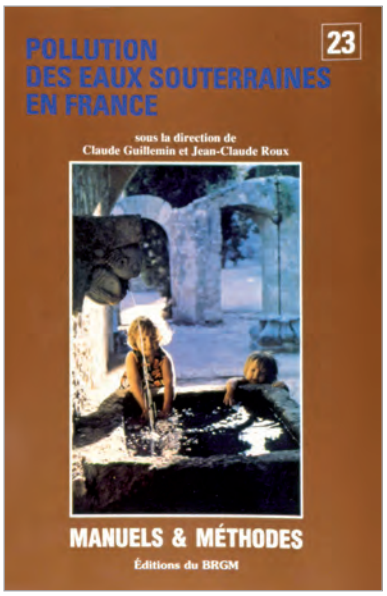
- la coédidition d'ouvrages réalisés par ses ingénieurs ou des associations professionnelles : " *Les eaux souterraines, connaissance et gestion* " (2004), " *Aquifères et eaux souterraines en France* " (2006).



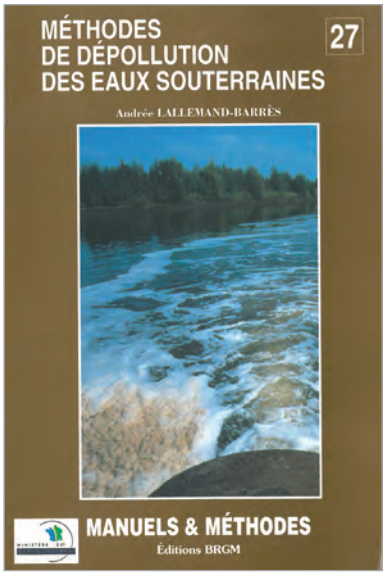
Dictionnaire français d'hydrogéologie, G. Castany et J. Margat, 1977



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 CO_2* " (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
avec la collaboration des hydrogéologues du BRGM mentionnés en tête de l'ouvrage

BURGÉAP

L'école française d'Afrique du Nord

Dès 1940, en Tunisie, et jusqu'en 1946, dans le cadre du service de l'hydraulique du Protectorat, Jean Archambault pose, avec Gilbert Castany et Henri Schoeller, les bases de l'hydrogéologie, discipline encore toute nouvelle, visant l'étude des nappes d'eau souterraines, dont la mise en valeur et la gestion revêtaient déjà, dans cette région méditerranéenne et sub-aride, une importance prépondérante dans l'alimentation en eau des populations comme du bétail. Leurs travaux, ainsi que peu après ceux de Robert Ambroggi et Jean Margat, au Maroc, orienteront la formation et la recherche dans ce domaine pour des décennies.

Pendant les " trente glorieuses "

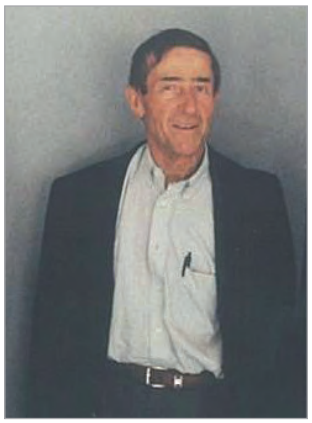
En 1947, de retour en France Jean Archambault fonde BURGÉAP, premier bureau de droit privé spécialisé en hydrogéologie, qui contribuera largement, après la libération, à la reconstruction du pays et à la modernisation de son alimentation en eau. Ses premiers collaborateurs furent Jacques Lemoine en 1954 et Lucien Bourguet en 1956. Dès cette époque, et jusqu'à aujourd'hui, le rôle innovant de BURGÉAP dans le domaine de l'hydrogéologie pratique et appliquée s'est affirmé de manière permanente. Il donnera notamment son avis hydrogéologique à Jean Goguel au sujet du projet - déjà envisagé à l'époque - de tunnel sous la Manche, recommandant qu'il soit creusé dans le niveau de la Craie Bleue du Cénomanien inférieur, légèrement argileux et presque imperméable, en évitant de pénétrer dans le Cénomanien moyen plus fracturé et plus altéré, donc plus perméable. Ceci fut réalisé 40 ans plus tard avec la réussite que l'on connaît.

Dès 1954 et jusqu'en 1974, pour le compte de la société des Eaux minérales de Saint-Galmier, BURGÉAP réalisera les études et dirigera les recherches par forages pour parvenir au réaménagement complet de l'exploitation du gisement hydrominéral des sources de Saint-Galmier Badoit.

Dès 1959, BURGÉAP réalise, à la demande du Commissariat à l'énergie atomique, (CEA), un " aperçu des possibilités de stockage souterrain de déchets radioactifs sur l'ensemble du territoire français métropolitain ".

En 1962-63, dans le cadre de la construction de l'autoroute de la vallée du Rhône BURGÉAP réalise, sur la section Vienne-Valence, la toute première " étude hydrogéologique linéaire " sur le territoire français. Dans ce cadre sera mise au point la technique de " rabattement et drainage préalable aux terrassements " qui permettra de creuser sans encombre, au " col du Grand Bœuf ", une tranchée autoroutière profonde de 35 mètres, à travers un multicouche sablo-argileux comportant trois niveaux aquifères superposés.

Jean Archambault (Rouen, 1978). *BRGM/PNO*



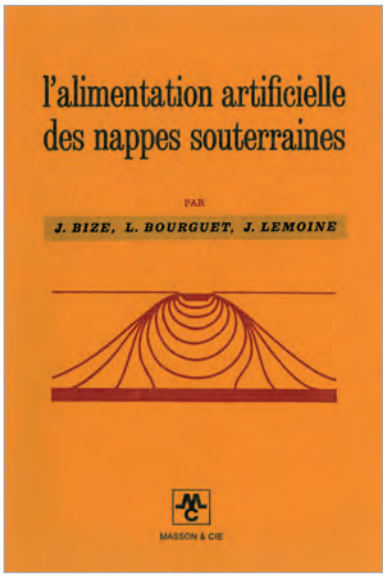
Jacques Lemoine. *BURGÉAP*

Lucien Bourguet (2003). *J.-C. Roux*

Entre 1962 et 1969, BURGÉAP contribue de manière fondamentale à l'aménagement (hydroélectricité, navigabilité) de la vallée du Rhône en concevant, pour la CNR (Compagnie nationale du Rhône), tous les travaux " d'hydrogéologie corrective " (drains de protection, canaux navigables, captages à déplacer) à mettre en œuvre en tout point de la vallée pour contrebalancer les effets des barrages sur l'écoulement de la puissante nappe alluviale du fleuve : (relèvement à l'amont, abaissement à l'aval), notamment le réaménagement complet des zones industrielles de Pierre Bénite, et de Saint-Vallier.

Reconnaissance hydrogéologique par forage (Odex - Ain). *BURGÉAP*

Réalisation d'un pompage d'essai (Levallois-Perret - 92). *J.F. Béraud*



L'alimentation artificielle des nappes souterraines, J. Bize, L. Bourguet, J. Lemoine, 1972

En 1967, BURGÉAP participe aux aménagements de la zone industrielle de Lillebonne Port Jérôme dans la basse vallée de la Seine, comportant la création de plusieurs captages industriels importants, et de sous-sols protégés, dans une zone d'alluvions et de craie sujette au marnage de la marée.

Dès cette époque, BURGÉAP contribue au développement et à l'étude de la recharge artificielle des aquifères, notamment après le congrès de 1967 à Haïfa qui ouvre un nouveau chapitre de l'hydrogéologie théorique : l'hydrodynamique de l'infiltration verticale colmatante et des transferts en milieu non-saturé. Le couplage barrage-recharge porte à son maximum le potentiel de régularisation de la ressource, comme le montre l'aménagement de la vallée du Souss au Maroc, où des lâchures du barrage d'Aoulouz fixées à 85 m^3/s permettent d'atteindre l'objectif " pas de pertes en mer ".

La somme des expériences acquises dans le monde dans le domaine de la recharge artificielle des aquifères, après analyse et traitement d'une enquête internationale détaillée, est finalement l'objet d'un ouvrage de synthèse publié en 1972 : " *L'alimentation artificielle des nappes souterraines* ".

Lutte contre la pollution des aquifères

En 1972, les agences de Bassin, récemment créées, avalisent la nouvelle approche proposée par BURGÉAP de tenir compte de l'épuration anaérobie des effluents d'industries agroalimentaires au cours de leur transfert dans le milieu non-saturé entre les bassins de stockage et la nappe. Cette nouvelle approche va conduire à la refonte de tout un pan de la politique financière de l'eau en France.

Dès 1974, les risques de pollution des aquifères par les autoroutes (hydrocarbures, produits de salage) sont étudiés pour le compte de l'Agence de bassin Rhin-Meuse, dans le domaine des mines de fer de Lorraine, en milieu calcaire fissuré et karstique, largement exploité pour l'alimentation en eau potable de toute la région minière.

En 1976 pendant les 3 mois d'été, une fuite de 500 m^3 de super carburant dans une station service d'autoroute, à Saint-Rambert d'Albon (Isère), a pollué la nappe des alluvions du Rhône. Une étude hydrogéologique, rapidement diligentée sous contrôle judiciaire, permit de concevoir et modéliser un barrage hydraulique de 24 forages. Réalisé entre octobre et février, ce " barrage " permit d'assurer, dès le mois de mars le fonctionnement printanier " antigel " d'une station de pompage agricole d'un débit d'un m^3/seconde située en aval immédiat de la fuite.

En 1991, à l'occasion d'un colloque organisé par le Forum du Droit et des affaires, est présentée une synthèse

des connaissances acquises en matière de pollutions du milieu souterrain, et sont exposées les bases de ce qui deviendra ensuite la méthodologie générale d'étude et de lutte contre ces pollutions en France.

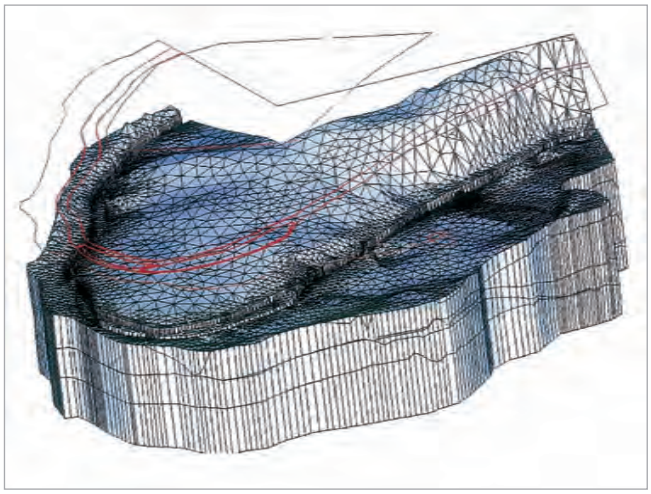
Entre 2001 et 2006, BURGÉAP a coordonné un important programme de Recherche & Développement concernant le comportement et le devenir des composés organochlorés aliphatiques dans les aquifères. Cofinancé par l'ADEME, ce programme fut mené en partenariat avec l'IFP (Institut français du Pétrole), l'IMFS/IFARE (Institut de mécanique des fluides et des solides de Strasbourg / Institut franco-allemand de recherche sur l'environnement) et l'IMFT (Institut de mécanique des fluides de Toulouse). Contribuant à combler des lacunes en matière de compréhension et de connaissances appliquées, cette opération visait en outre à élaborer trois guides méthodologiques relatifs aux thèmes " Caractérisation des zones sources ", " Atténuation naturelle " et " Modélisation ".

Expérience de dépollution par aéroflotation de sols pollués par hydrocarbures (Issy-les-Moulineaux, 92). *BURGÉAP*

Ces trois guides sont référencés dans les outils méthodologiques de gestion des sites potentiellement pollués du Ministère chargé de l'Ecologie et du Développement Durable.

Hydrogéologie appliquée au génie civil

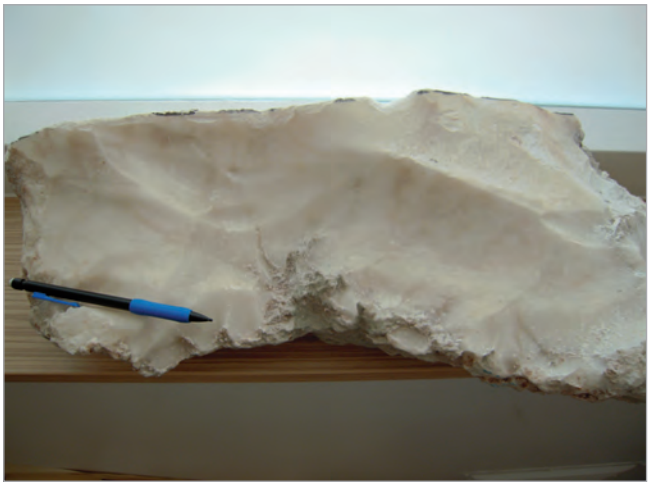
En 1976 BURGÉAP réalise au Chesnais (78) l'une des toutes premières études " d'hydrogéologie appliquée au génie civil " comportant la prévision, par modélisation, des impacts de la construction de sous-sols enterrés sur la nappe des sables de Fontainebleau. La méthodologie des études prévisionnelles de la remontée de niveau des nappes, par la suite largement développée par BURGÉAP, sera élaborée à l'occasion de cette opération.



Modélisation mathématique de la boutonnière crayeuse de Boulogne-Billancourt (92). *BURGÉAP*

Épuration des effluents par le sol

Dès 1977, sont conçus par BURGÉAP tous les fondements théoriques de l'épuration des effluents par infiltration dans le sol (E.P.I), et sont mises au point les techniques à mettre en œuvre dans des bassins à sable contrôlés. Cette technique sera développée largement, tant en France qu'à l'étranger, et notamment au Maroc, pour l'épuration des effluents urbains comme à Agadir.



Impact d'un pompage à fort débit sur la dissolution du gypse et de l'anhydrite des formations triasiques (Meurthe-et-Moselle). *BURGÉAP*

Protection des champs captants

Le site de Crépieux-Charmy, exploité par VÉOLIA pour le compte de la Communauté urbaine de Lyon, est un des plus grands champs captants d'Europe (90 000 000 m^3/an : 3 m^3/sec. Depuis 1989, BURGÉAP a mis au point un système de riposte pour la sécurité de l'alimentation de l'agglomération lyonnaise en eau (Système Rosalye). Les objectifs ultimes sont la protection

Réalisation d'un puits de pompage (descente de la machine de forage dans les sous-sols au moyen d'une grue - Paris). *J. F. Béraud*

Etude de la stabilité hydrogéologique d'un coteau (Chaumont-sur-Loire, Loir et Cher). *BURGÉAP*

dynamique du champ captant par création d'une barrière hydraulique, et la mise en place d'un outil d'aide à la décision en ligne en cas de pollution sur ce fleuve très rapide.

Appui aux grands travaux en souterrain

En 1992-96 pour la construction du réseau du RER " EOLE ", BURGÉAP conçoit, modélise et contrôle, à la demande de la SNCF, toute la réalisation de l'important rabattement de nappe nécessité par la construction " à sec " de la gare souterraine de " Saint-Lazare - Condorcet ". Ainsi, pendant 4 ans, 24 forages exploitant l'aquifère des sables yprésiens permettront le pompage continu de 780 m^3/heure, et rabattront la pression de l'aquifère à la cote zéro NGF, en plein cœur de Paris, sans que soit signalé aucun désordre au bâti.

En 1995, PARIS (15e) immeuble Télédiffusion de France : avant ce projet, en région parisienne, les grands bâtiments comportant plus de 3 à 4 sous-sols, étaient construits sous protection de parois moulées et de fonds injectés. Pour la première fois en région parisienne, sur le site de TDF, le matériau géologique naturel, (la craie rocheuse), a été utilisé comme " fond injecté naturel ". Cette optimisation novatrice, résultant d'une bonne analyse géologique et régionale et d'une utilisation maîtrisée du micro moulinet de forage s'est avérée très intéressante en terme financier et surtout de délai de réalisation de l'ouvrage. Plusieurs cas ont été, depuis, traités de façon similaire.

En 1999-2000, BURGÉAP réalise, pour les Charbonnages de France, un modèle hydrodynamique de 30 couches et 50 000 mailles, sur le bassin minier du Nord-Pas de Calais : ce modèle hydraulique, hydrogéologique et hydrochimique a permis de déterminer et de prévoir avec grande précision l'incidence de l'arrêt des exhaures sur les régimes des eaux superficielles et souterraines, sur les mouvements de terrain ainsi que sur les risques d'explosion liés au gaz.

Réalisation de forages de rabattement d'un fond de fouille, équipés de crépines inox à fils enroulés, dans l'Ain. *J.F. Béraud*

En 2006, Conseil général du Rhône : la nappe de l'Est lyonnais classée comme aquifère patrimonial par le SDAGE RMC, connaît des enjeux, usages et pressions importants. Dans la démarche du SAGE de l'Est lyonnais, le Conseil Général du Rhône et ses partenaires décident l'étude d'un état des lieux ''zéro" des ressources qualitatives et quantitatives. L'étude vise à synthétiser l'ensemble des données documentaires et des points d'accès à la nappe existants pour analyser l'évolution du contexte depuis 1995. Des investigations de terrain sont ensuite réalisées (implantation de piézomètres, mesures qualitatives et piézométriques) pour déterminer l'état initial de la nappe et aider à la définition d'objectifs pour le SAGE.

L'accès à l'eau potable en Afrique

Dès 1948, sur la demande des services de l'élevage de l'ancienne AOF sont entreprises les premières études et jetées les bases de l'inventaire des points d'eau, et de l'identification des aquifères en Afrique de l'Ouest francophone.

En 1960, L'ouvrage de synthèse de J. Archambault " Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale " présente les résultats de ces tout premiers travaux. Jean Archambault y émet notamment l'hypothèse, vérifiée plus de trente ans après, du rôle de l'évapotranspiration profonde sur l'origine des " nappes en creux ".

Après 1961 et l'indépendance des États africains francophones, BURGÉAP identifie les ressources en eaux souterraines, développe et systématise les inventaires et dans divers pays d'Afrique francophone et lusophone (Mozambique, Mauritanie, Burkina-Faso, Côte d'Ivoire) et notamment, dès 1960, dans le Sud-Est Mauritanien, BURGÉAP réalise les premières implantations de points d'eau sur fractures et " linéaments " sur photographies aériennes, en zones de socle métamorphique.

Hydrogéologie des îles volcaniques

Dès 1969, BURGÉAP pose les fondements de l'aménagement hydraulique à partir des eaux souterraines dans l'archipel volcanique du Cap Vert, de climat sahélien, situé au large des côtes sénégalaises. Dès 1972, les premiers forages au " marteau fond de trou " sont réalisés (Île de Santiago). Des études de base, assorties d'un aménagement hydraulique complet, seront conduites par la suite dans cet archipel entre 1972 et 1990, avant comme après son accession à l'indépendance en 1975.

Entre 1980 et 1984, BURGÉAP poursuit son action aux Iles du Cap Vert, où, sur demande du Ministère français de la coopération, il étend les forages à l'Ile de San Nicolau, où parallèlement est conçue et réalisée une galerie

Dimensionnement hydrogéologique de parois moulées (Paris). *BURGÉAP*

Pose de piézomètres inclinés dans le tunnel de l'Autoroute A 86 (Rueil-Malmaison, 92). *BURGÉAP*

Pompage d'essai dans le tunnel de l'Autoroute A 86 (Rueil-Malmaison, Hauts-de-Seine). *BURGÉAP*

de captage gravitaire d'eau de plus de 2 kilomètres, qui amène un débit de 1 000m^3 par jour. Ce choix technologique, qui permet de diviser par 5 le coût de l'eau souterraine captée, est l'exemple type d'un " investissement durable ".

Rabattement de nappe dans la Molasse à Lyon. *BURGÉAP*

Développement de l'hydraulique villageoise en Afrique, de l'AEP des petits centres et des zones périurbaines

L'action de BURGÉAP dans ce domaine, entreprise dès les années 50, a été continue et reste déterminante à ce jour.

Après les années 1970, le début de la grande sécheresse au " Sahel " fait exploser les besoins en eau des populations : les grands projets d'hydraulique villageoise se multiplient, fondés sur les forages équipés de pompes manuelles, et lancés dans l'urgence par divers organismes.

La révolution technique apportée par la technique du forage au " marteau-fond-de-trou " et la pompe manuelle (ou à pied : pompe " Vergnet "), marquera à partir de 1975, l'hydraulique villageoise en Afrique. Ces techniques, que BURGÉAP a été parmi les touts premiers à développer ont permis de réaliser presque partout, même en zone de socle, et avec des cadences élevées, des ouvrages couvrant les besoins des villages, sans délaisser toutefois l'apport fondamental - et gratuit - du puisage traditionnel autorisé par les puits de grand diamètre.

Recherche de zone fissurée dans le socle en Afrique de l'Ouest par géophysique électrique. *R. Biscaldi*

Revenant rapidement sur le mythe de l'eau gratuite, BURGÉAP fut l'un des tous premiers maîtres d'œuvres à mettre l'accent sur la nécessité de replacer les bénéficiaires au centre des aménagements, en créant et en formant des structures, ancrées dans les populations villageoises locales, leur permettant de suivre, contrôler, réparer et pérenniser les ouvrages de captage modernes mis à leur disposition par les aides internationales.

Hydraulique villageoise en Guinée. *BRGM*

Dès 1980, le projet Yatenga-Comoé au Burkina Faso sera, dans ce domaine, le prototype d'un tout premier projet de type " équipement durable " : ces 600 points d'eau, entretenus par les villageois eux-mêmes, fonctionnent toujours.

Parallèlement, BURGÉAP continue d'apporter sa contribution pour " affiner " les techniques d'implantation dans les zones fissurées du socle cristallin, et met au point, à la demande du Comité inter-Etats d'études hydrauliques (CIEH), des procédures d'essais de débit simplifiés, (sur puits, puis sur forages), faciles à systématiser dans les programmes de construction de points d'eau à l'entreprise, et visant à garantir la pérennité des ouvrages malgré les

aléas climatiques. De même, BURGÉAP compare avec CGG les différentes techniques de reconnaissance géophysique afin d'optimiser les recherches d'eau en Afrique.

Après avoir contribué à mettre au point le modèle technique, et socio-économique des projets d'hydraulique villageoise en Afrique francophone, BURGÉAP introduit le concept dans les années 80, en pays anglophones (Ghana) et en pays lusophones (Mozambique, Guinée Bissau). C'est désormais aux populations et aux structures privées locales de prendre en charge la gestion des points d'eau ruraux.

Sur financement de l'Agence française de développement (AFD), " le paiement de l'eau au volume " est introduit en zone rurale en Central Region du Ghana dés 1986 ; l'eau y est devenue payante.

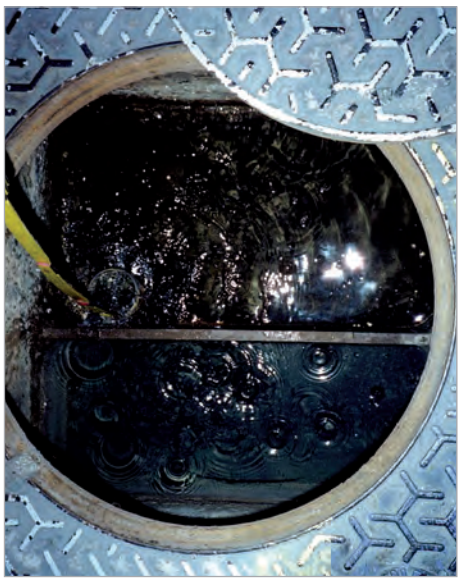
BURGÉAP et le BRGM mettent au point en commun, dés 1985, le progiciel PROGRES qui permet aux Etats d'Afrique de gérer la desserte en eau des populations rurales. Ce progiciel permet de programmer les équipements nécessaires pour alimenter tous les villages d'un pays.

BURGÉAP réalise au Ghana l'alimentation en eau de 50 petits centres urbains. Autant les modèles de gestion étaient au point pour les grandes villes ou dans les zones rurales, autant aucun modèle n'était disponible pour les centres de taille intermédiaire. L'étude permet de définir de nouvelles modalités de desserte technique et de gestion déléguée passant par de petits opérateurs privés.

BURGÉAP s'intéresse également aux zones périurbaines (bidonvilles) des grands centres urbains des pays en développement, et finance une thèse sur les modalités de gestion des points d'eau dans ces secteurs et l'élasticité des prix pour les populations concernées.

Dans le cadre de l'atteinte des Objectifs du Millénaire (ODM), BURGÉAP participe à plusieurs études visant à établir, tant au niveau national qu'au niveau régional, les programmations nécessaires en infrastructures pour réduire de moitié le nombre d'habitants n'ayant pas accès à l'eau potable et l'assainissement d'ici à 2015. C'est le cas notamment au Ghana et à Madagascar.

Aujourd'hui, BURGÉAP apporte tout son savoir-faire dans la mise au point de mécanismes financiers et institutionnels (Partenariats Public Privé) pour l'exploitation et la maintenance d'infrastructures liés aux services publics essentiels : eau, énergie, déchets. Ces études sont réalisées dans de nombreux pays : Cambodge, Sénégal, Ghana.



Expertise de structures de drainage (tapis drainant). *BURGÉAP*

Domaine minier

Dès 1963, BURGÉAP étudie pour la compagnie Péchiney, en Grèce (Metoxi) comme dans le Midi de la France (Villeveyrac, Mazaugues, Vins) tous les délicats problèmes d'exploitation et d'environnement liés à l'exhaure et à la stabilité des mines.

De 1970 à 1980, poursuivant cette action, BURGÉAP a réalisé toutes les études de drainage et d'alimentation en eau de la très importante carrière à ciel ouvert de la mine de Marquesado, en Espagne, pour la compagnie Andaluza de Minas.

1985-1986 pour la Compagnie générale des phosphates de Taïba au Sénégal, une étude complète du contexte hydrogéologique de la mine à ciel ouvert a permis de définir les systèmes de drainage à mettre en œuvre, un système d'alimentation en eau de la mine, et en même temps d'évaluer son impact sur l'aquifère régional.

Jean-François BÉRAUD
Lucien BOURGUET

J.-C. Andreini, Directeur Général du BURGEAP en 2003. *J.-C. Roux*

SOGREAH

SOGREAH a vu le jour en 1923, lors de l'édification à Grenoble d'un laboratoire d'essais hydrauliques, le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique. Ce laboratoire, dévolu aux essais de turbines, était l'un des fleurons de la Houille Blanche grenobloise.

La société prend le nom de SOGREAH (Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques) en 1955. Son activité couvre alors l'aménagement du territoire (barrages, fleuves, torrents, littoral) et les techniques industrielles. Le génie rural, l'irrigation, l'alimentation en eau et l'assainissement s'ajouteront à ces activités en 1958. L'activité industrielle donnera naissance à NEYRPIC en 1970.

Ce qui fait la richesse de SOGREAH et de son histoire, ce sont donc les multiples facettes de ses activités dont le fil conducteur reste l'Eau. L'étude des écoulements souterrains a suscité bien des vocations et la curiosité, il y a plus de 60 ans, de quelques ingénieurs visionnaires de cette société qui ont contribué à établir les fondements de l'hydrogéologie.

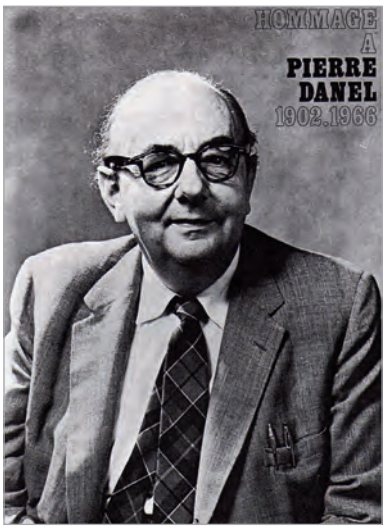
L'hydrogéologie, comme toute science de la nature, se base sur l'observation des phénomènes et s'efforce d'en donner une explication rationnelle. Elle se fonde conjointement sur deux disciplines : la géologie, étude du milieu où se trouve l'eau, et l'hydraulique qui traite de la façon dont se déplace cette eau. Il était donc normal que SOGREAH s'intéresse aussi à cette question.

Dans ce domaine, comme dans beaucoup d'autres, les progrès sont nés des projets, fruits de la rencontre entre les besoins des clients et le savoir-faire de ses ingénieurs, projets qui, souvent, furent l'occasion de nouvelles recherches. C'est à travers l'histoire de quelques-uns de ces projets que sont présentés les développements des activités de SOGREAH dans le domaine de l'hydrogéologie, en particulier les développements des outils de modélisation.

Pierre DANEL, précurseur de l'Hydrogéologie

Parmi les fondateurs de SOGREAH en hydrogéologie, il convient de citer en premier lieu Pierre Danel.

Jeune ingénieur, P. Danel est entré en 1928 au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, duquel est issu SOGREAH. Après un début de carrière comme enseignant chercheur à l'université de Grenoble, il crée et anime une équipe de chercheurs qui atteindra bientôt une réputation mondiale dans le domaine de l'hydraulique, des modèles physiques et mathématiques, pour le développement de techniques



Pierre Danel. *SOGREAH*

hydro-agricoles innovantes. Il était chargé d'enseigner l'hydraulique générale à l'École des Ingénieurs Hydrauliciens (INP de Grenoble). Il s'intéressa à la forme et aux caractéristiques des écoulements souterrains et de surface. Il traita les écoulements à potentiel suivant la méthode classique, c'est-à-dire en utilisant les fonctions analytiques, base des calculs analytiques en hydrogéologie. Au cours de la préparation de ses cours, P. Danel fut frappé et séduit par la représentation géométrique des fonctions analytiques pour obtenir des schémas permettant de se faire une idée rapide des formes des écoulements **:** son enseignement a débouché sur la rédaction d'un traité sur les transformations conformes, base du cours d'hydrodynamique graphique repris ensuite par Gaston Sauvage de Saint Marc, ancien Directeur Technique. Les activités hydrogéologiques se sont surtout développées sous son impulsion. Pour cela, ce dernier fit appel à François Bazin qui créa véritablement et structura le service d'hydrogéologie de SOGREAH à partir des années 1950. Ce service réalisera les premières grandes études hydrogéologiques.

Pierre Danel est le fondateur de la version moderne de la revue " La Houille Blanche " en 1945, dont il a longtemps été le Directeur Général. De nombreux numéros ont, dès l'origine (revue n° 1 en 1946), dédié des articles à l'hydrogéologie. Certains articles étaient signés d'ingénieurs du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, comme par exemple R Meyer, mais la participation de Pierre Danel à tous ces articles était forte, les thèmes étant souvent initiés par lui.

Contribution au développement des outils de modélisation hydrogéologique

P. Danel et G. Sauvage de Saint Marc ont largement contribué au développement des études sur modèles réduits, ou maquettes, dans le laboratoire d'essai dauphinois. Mais, avec F. Bazin, ils ont aussi initié et fait réaliser les modèles analogiques, dont le principe est de substituer

au phénomène hydraulique étudié un autre phénomène physique qui obéit à la même forme d'équation mais dont la mise en œuvre pratique est plus facile et moins onéreuse que celle du phénomène hydraulique.

Le phénomène physique de remplacement est l'électricité : en effet les champs électriques et les champs d'écoulement en milieu poreux obéissent aux mêmes équations et, sous réserve d'une correspondance des conditions aux limites, les observations faites sur un de ces phénomènes sont transposables sur l'autre. Cette technique a été mise en œuvre au cours de la période 1955 à 1965. Cependant la mise au point de tels modèles analogiques reste longue et ne permet de traiter que des cas classiques d'écoulement, souvent sur des zones de faible extension.

Des réflexions ont été menées à cette époque pour la réalisation de maquettes physiques pour l'étude des écoulements souterrains. Ces études ont porté sur quelques cas particuliers et pour des secteurs de faible étendue :

- Étude des rabattements autour d'un puits, incidence de la dimension d'un puits ou de la pénétration partielle d'un puits dans une nappe, étude des phénomènes de recharge de nappe (analyse des causes du blocage de l'infiltration : dissymétrie entre un écoulement en pompage et en injection) ;
- Drainage d'un sol, milieu poreux saturé et non saturé en eau ;
- Phénomènes locaux d'hydro-dispersion et de rétention des polluants ;
- Caractéristiques d'un béton poreux pour la conception d'un filtre statique pour des prises d'eau en rivière ou en mer.

La réalisation d'une maquette en milieux poreux pose des problèmes très particuliers, d'une part à cause de la capillarité qui n'obéit pas aux mêmes lois de similitudes que l'écoulement sous-jacent dans la nappe elle-même, et d'autre part à cause de l'hétérogénéité des couches aquifères qui ne peuvent pas faire l'objet d'ajustement pour réglage des perméabilités, une fois que le modèle physique est réalisé.

P. Danel et G. Sauvage de Saint Marc ont contribué par la suite à l'analyse mathématique des phénomènes physiques portant sur les écoulements dans tous les milieux, et couvrant ainsi le cycle de l'eau complet dans la nature (pluie, ruissellement, crues, courant marin, houle…) et le cycle de l'eau dans la ville (captage AEP, traitement de potabilisation, adduction, distribution, récupération des eaux usées, transfert vers une station de traitement et rejet dans le milieu naturel des effluents dépollués). Cette analyse des phénomènes a débouché sur la conception de modèles mathématiques inspirés des méthodes d'intégration graphique : décomposition en différences finies pour une intégration pas à pas, pour, par exemple les épures de propagation des coups de bélier dans les conduites, les épures de propagation d'ondes dans les canaux, l'intégration graphique de la propagation d'une onde dans une nappe phréatique, etc.

Les ingénieurs font avancer la recherche en hydraulique

Dans le cadre de ce développement, P. Danel a su attirer, dans son équipe de chercheurs, des spécialistes qui ont à leur tour fortement marqué le développement des activités hydrogéologiques, en particulier dans le domaine du développement des modèles mathématiques :

- Alexandre Preissmann qui était l'un des initiateurs et promoteurs de l'utilisation des modèles numériques de simulation en hydraulique et notamment en hydraulique des eaux souterraines et en transport et dispersion de polluants dans les milieux poreux. Les premières communications sur ce sujet du groupe dirigé à SOGREAH par A. Preissmann signalant le développement des algorithmes et logiciels ainsi que leurs applications pratiques ont été présentées à la Neuvième Assemblée Générale de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques à Dubrovnik en 1961. Les développements ultérieurs, ainsi que leurs utilisations pour les projets menés à SOGREAH continuaient par A. Preissmann et ses collaborateurs, notamment Jacques Zaoui, jusqu'à la participation essentielle dans les années 1970 à la création de l'ensemble logiciel SHF (Système Hydrologique Européen), lequel est bien connu aujourd'hui sous le nom MIKE SHE.
  Rappelons le livre en deux volumes " *Engineering Applications of Computational Hydraulics - Homage to Alexandre Preissmann* ", rédigé par Michael B. Abbot, J.-A. Cunge *et al.*, avec la participations de 25 spécialistes mondiaux de l'hydraulique numérique.

- Francis Biesel qui a dirigé le département informatique de SOGREAH qui a compté plus de 120 ingénieurs de développement en 1966. Dans ce département ont été conçus et réalisés les premiers logiciels de calcul des écoulements de surface, souterrains, maritimes, de mécanique des sols, etc.

- Parmi les développeurs des modèles d'écoulements dans les nappes souterraines on doit nommer François Bazin pour sa contribution à la numérisation des équations fondamentales (différences finies), avec l'aide d'Alexandre Preissmann.

- La construction même des logiciels et les premières applications sont l'œuvre de Jacques Zaoui, Pierre Fontanet, Pierre Gaillard, Jean Pierre Sauty.

• Au début des années 1970, le département informatique de SOGREAH a accueilli un stagiaire de grande qualité, Yves Emsellem. Après 6 mois de stage, il fondait le Laboratoire d'Hydrogéologie Mathématique de l'Ecole des Mines de Paris.

En 1972, F. Biesel quitte SOGREAH pour rejoindre le Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF). L'une des filiales du LCHF était GEOHYDRAULIQUE qui, sous l'initiative de F. Biesel, a également développé des logiciels d'hydrauliques souterraines. Les principaux développeurs ayant été Marc Bonnet, entré ensuite au BRGM, et Jean-Luc Henri.

En 1985, GEOHYDRAULIQUE et le LCHF sont reprises par SOGREAH, et les équipes d'hydrogéologues se rapprochent.

À cette diffusion par SOGREAH du savoir-faire dans la conception des modèles mathématiques en France, il faut ajouter la collaboration entre le Danish Hydraulic Institute (DHI, Danemark), Hydraulic Research Wallingford (HRW, Grande-Bretagne) et SOGREAH (France), pour la construction du Système Hydrologique Européen (SHE), dont l'ambition était de représenter le cycle complet de l'eau. Cette collaboration débuta en 1976 et se poursuivit pendant plus de 10 ans. Aujourd'hui seul le DHI poursuit le développement d'un logiciel issu de ce concept (logiciel MIKE SHE).

Un dernier logiciel a été développé à SOGREAH par P. Gaillard à partir de 1976, puis par Michel Bonneton au cours des années 1980, et enfin au cours des années 1990, par Adel Aboujaoude et Marc Boisson sous la direction de Jean Marc Usseglio Polatera, directeur de la filiale LHF (Laboratoire d'Hydraulique de France) de SOGREAH et de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et avec l'appui de spécialistes d'ENEL/CRIS (Italie, copropriétaire du logiciel). Ce logiciel, nommé DEDALE-3D, simule les mouvements de l'eau et des contaminants solubles dans les sols et dans les nappes, y compris dans les cas où la présence de ces contaminants modifie l'écoulement, par une représentation complète des 3 dimensions spatiales (selon les coordonnées horizontales X, Y, et verticale Z). Ses fonctionnalités sont multiples : infiltration, lixiviation, zone saturée et non saturée, nappe. Il permet de représenter les anisotropies des formations géologiques ainsi que des formes géométriques complexes : puits verticaux en petits ou grands diamètres, puits à drains rayonnants, tranchées, voiles imperméables, palplanche, impact d'ouvrages. Les modifications des écoulements sous l'effet des changements de densités par des polluants solubles sont intégrées, ainsi que la dégradation et la transformation des contaminants. Il apparaît que ce logiciel représente l'aboutissement des objectifs de connaissance et représentation des écoulements souterrains souhaité par P. Danel et F. Bazin.

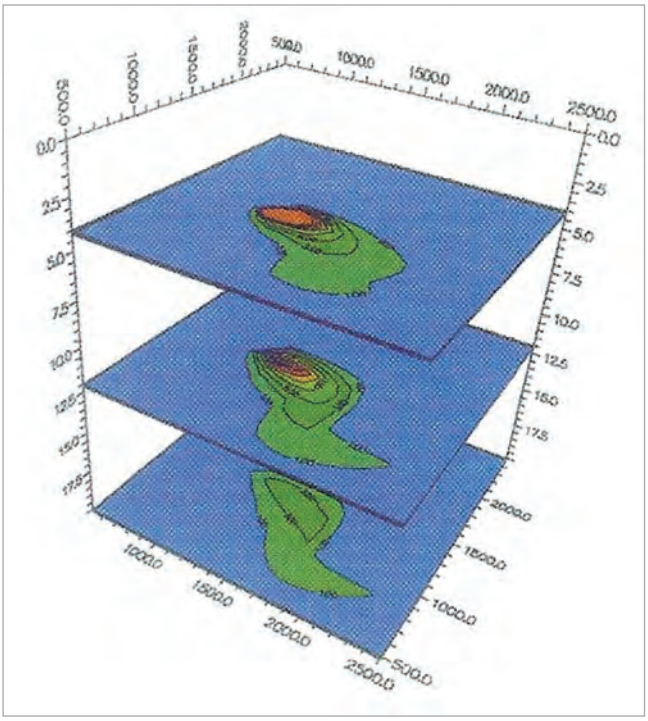


Schéma de DEDALE 3 D. *SOGREAH*

Au total, SOGREAH a investi plus de 50 années de travail d'ingénieur pour le développement de logiciels en hydraulique et en hydrogéologie. Ceux-ci ont été utilisés avec succès dans de nombreux projets tant en France qu'à l'étranger.

Cependant, il est ensuite apparu difficile aux bureaux d'études privés comme SOGREAH de poursuivre le développement de logiciels à un rythme aussi soutenu, pour plusieurs raisons :

• Évolution des demandes des clients qui souhaitent disposer eux-mêmes des logiciels et modèles. Cela implique des développements de pré-processeurs et post-processeurs performants. Ces développements doivent intégrer des interfaces utilisateurs très conviviales et de nombreuses fonctions de contrôle pour une utilisation par des non-spécialistes. Ils sont plus coûteux à développer que les noyaux de calcul des logiciels ;

• Développement de logiciels performants par des instituts et universités à l'étranger qui les distribuent parfois gratuitement ou pour un prix modique ;

• Exigence des clients en termes d'assurance qualité, qui n'est plus couverte par les assureurs.

• Absence de financement de l'État.

À cette contribution à la conception des modèles mathématique en France, on doit ajouter la formation à l'utilisation des logiciels de clients, chez qui des modèles ont été installés tant en France qu'à l'étranger. La formation a également été apportée à certains bureaux d'étude comme CPGF.

Après une forte concurrence et une dispersion des savoirs et des énergies au niveau national entre les bureaux d'étude privés, les bureaux semi-étatiques et les universités ou grandes écoles, il ne reste rien de français dans les logiciels " standards " utilisés par les bureaux d'étude français. Est-il encore possible d'associer ces différentes forces vives pour créer et produire des outils français pour le futur ?

Avant l'apparition des moyens informatiques et de la construction de logiciels, SOGREAH a rédigé dès les années 1950, des notes techniques en hydrogéologie portant, par exemple, sur l'interprétation des essais de pompage, incluant les cas particuliers (puits incomplets, puits en gros diamètres, recharge des nappes, dessalement des sols…). Elles ont complété les importants moyens de recherche bibliographique mis à la disposition des ingénieurs dans la documentation, qui, dans les années 1960, était l'un des plus grands centres mondiaux de documentation de l'hydraulique. Dix documentalistes multilingues récupéraient et traduisaient en fiches les revues, publications et livres de tous les pays : Chine, Japon, Russie, Etats-Unis d'Amérique, Portugal…. Plus d'un million de fiches permettaient une recherche rapide et particulièrement efficace, avec l'assistance des documentalistes, pour tous les sujets touchant à l'hydraulique.

Contribution de l'hydrogéologie au développement international

Si les activités en France sont importantes, c'est toutefois à l'étranger que les hydrogéologues de SOGREAH ont réalisé les plus significatives études, entraînant dans leur sillage les autres activités à l'export ou même d'autres bureaux d'étude français. Ils ont permis ainsi, d'une part l'identification des potentiels de développement de vastes régions sur le plan des ressources en eau, en sols, en moyens humains, et d'autre part l'appréciation de la demande locale, ce qui a conduit à l'élaboration de projets intégrés adaptés aux besoins.

À l'international, les hydrogéologues de la SOGREAH ont réalisé d'importantes études de ressources en eaux, quelquefois à l'échelle des pays (Arabie, Yémen, Tunisie, Iran…). Ils ont également contribué de manière active à certains grands projets d'infrastructures dans le domaine de l'énergie ou des aménagements hydro-agricoles.

Ils ont en effet souvent été les pionniers des activités de SOGREAH à l'exportation, parfois accompagnés par les hydrologues, les pédologues, les topographes et les agro-économistes, notamment dans le cadre de schémas ou plans directeurs de développement. Certains de ces projets couvrent des territoires plus étendus que plusieurs départements français ou même que la France. Cet esprit pionnier avait toutefois été développé et facilité au sein de la société par la variété des modèles réduits hydrauliques. Le laboratoire d'hydraulique où se côtoient des modèles de tous les pays, a en effet été un véritable miroir du monde. Il a permis une large ouverture sur l'extérieur de la France, en apportant une notoriété forte facilitant les contacts internationaux.

Le développement à l'international a été conforté par le regroupement de SOGREAH et SOGETHA (SOciété GEnérale des Techniques Hydro-Agricoles), l'une des filiales créées par NEYRPIC dès les années 1950. Les activités de cette société étaient dédiées au développement de l'agriculture et aux techniques hydro-agricoles dans les pays d'Afrique : Tunisie, Maroc, Algérie, Afrique de l'Ouest,… Pédologues, topographes, géologues, hydrogéologues, agronomes, hydrologues, hydrauliciens formaient des équipes complètes permettant d'identifier le potentiel de développement sur un vaste territoire. Au début des années 1970, ces équipes ont été regroupées avec celles de SOGREAH et ont renforcé ses capacités dans le domaine de l'hydrogéologie.

Dans chacune de ces thématiques les hydrogéologues sont souvent intervenus à l'amont des projets, pendant les phases de projets, mais également pour leur mise en route, l'assistance au maître d'ouvrage, et l'analyse des performances et des impacts. Les études sélectionnées et sommairement décrites ci-après présentent quelques innovations en matière d'hydrogéologie.

Au cours des années 1960 – 1980, les équipes d'hydrogéologues de la SOGREAH sous la conduite de F. Bazin, ont entrepris des études de grande envergure avec modélisation mathématique de grands aquifères sur l'Algérie (Chott Chergui), sur les plaines de la Thessalie en Grèce, sur les nappes de Libye, sur la source de Figeh en Syrie. Au cours de cette période, on peut également citer les études de modélisation de la nappe de Kirkuk en Iraq dans le cadre d'un périmètre d'irrigation de 120 000 ha.
En 1985, les équipes d'hydrogéologues de la SOGREAH et de GEOHYDRAULIQUE ont fusionné, ce qui a permis, sous la direction de Jean-Luc Henry, d'intervenir de manière massive en Afrique de l'Ouest sur de grands projets d'hydraulique villageoise. Au cours des années 1990 – 2000, des modélisations de nappes ont été établies suite aux études des équipes de GEOHYDRAULIQUE sur

Hydraulique villageoise au Togo (gravure, 1977)

Passage inférieur U2, cours de la Libération, Grenoble. *SOGREAH*

Ouvrage de drainage pour la stabilisation de la nappe et protection du Synchrotron à la confluence Drac - Isère (Grenoble - 38). *SOGREAH*

plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest : nappes d'Abidjan en Côte-d'Ivoire, nappe des grès de Bobo Dioulasso au Burkina-Faso, nappe de Cotonou au Bénin. On doit en effet rappeler que l'une des activités qui a été développée par GEOHYDRAULIQUE est dédiée à la recherche en eau et à l'alimentation des populations dans les pays en voie de développement, en particulier dans les pays d'Afrique.

Depuis 2005 les nouvelles générations d'hydrogéologues dirigées par Marc Boisson mènent des études de modélisations sur les grands aquifères des plaines algériennes ou tunisiennes.

Hydrogéologie et hydraulique villageoise

Les hydrogéologues de GEOHYDRAULIQUE ont été les premiers à apporter une vision globale du problème particulier de ce continent et à trouver des solutions innovantes et évolutives pour l'alimentation en eau potable de ces populations.

Pendant près de 15 ans, des milliers de forages ont été ainsi réalisés en Côte-d'Ivoire, Bénin, Mali, Burkina Faso, Togo, Cameroun. Ces projets à forte composante humanitaire ont permis d'améliorer les conditions de vie de millions de ruraux d'Afrique de l'Ouest, et ce pour un coût relativement modique : le coût de création d'un point d'eau en Afrique ramené à l'individu représente pour le bailleur de fonds, un investissement de l'ordre de 40 €. Ce coût de 40 € est à mettre en rapport avec les 2 milliards d'hommes et de femmes qui ne disposent pas encore d'eau potable à travers le monde.

Les nouvelles orientations

Depuis les années 1980, les activités se sont beaucoup recentrées sur la problématique des pollutions historiques générées par les activités industrielles, et sur les moyens d'y remédier. Ainsi se sont développés de nouveaux domaines d'activité.

Les volets " Eaux souterraines " des études d'impact de dossiers ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) ou Loi sur l'Eau, les mémoires de réhabilitation et aujourd'hui les " plans de gestion " de sites pollués constituent alors le cadre réglementaire dans lequel l'évaluation des vulnérabilités des eaux souterraines doit être menée.

Ce type d'études représente aujourd'hui un axe important de développement des activités de la SOGREAH en Environnement et des équipes dirigées par Noëlle Doucet, Stéphane Fourny et Jérôme Duchene.
Les équipes d'hydrogéologues interviennent comme in-

génieurs-conseils dans diverses thématiques et doivent répondre à toutes les demandes des clients :

L'énergie et les grands barrages

C'est au cœur du métier historique du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, que les hydrogéologues et géologues interviennent dans les études des sites de grands barrages. Ils identifient la faisabilité, le type d'ouvrage le mieux adapté et la dimension maximale possible de l'ouvrage et de la retenue, les impacts hydrogéologiques. L'autre domaine énergétique dans lequel les hydrogéologues interviennent étant la géothermie.

> Domaine hydroélectrique.

Les principales études dans lesquelles les hydrogéologues sont intervenues sont : la détermination des débits d'épuisement de fouilles et les conditions de la mise en œuvre de cet épuisement nécessaire à l'implantation des fondations. Par exemple pour la Centrale hydro-électrique de Greenup dans le lit de l'Ohio… Suivant un nouveau concept inventé par SOGREAH, la centrale au fil de l'eau a été entièrement construite sur les chantiers de l'Atlantique à Nantes, puis transportée par barge sur le site du projet et " déposée " sur une fondation en béton préalablement installée. Cette centrale est du type de celles installées sur le Rhône par la CNR, mais plus puissante. Les hydrogéologues ont participé à la définition des fondations, aux calculs des épuisements de fouilles et aux études d'impacts sur la nappe alluviale.

Pour l'étude des fondations des barrages, les calculs des épuisements de fouilles de grandes dimensions et l'optimisation des moyens électromécaniques à mettre en œuvre, SOGREAH a développé à partir de 1976, un modèle mathématique de représentation des écoulements en 3 D. Ce logiciel permet de représenter les écoulements souterrains complexes autour des ouvrages . Pour les fouilles du barrage de Chasma sur l'Indus par exemple, il a permis de déterminer le débit d'épuisement de fouille et d'optimiser la dépense d'énergie. Initialement, les entreprises consultées avaient estimé à 10 m^3/s le besoin de pompage. Le modèle a conduit à un équipement de 2,5 m^3/s, valeur qui s'est avérée très satisfaisante, puisque le débit maximum d'épuisement a été d'un peu moins de 2 m^3/s.

Ce même logiciel a été utilisé pour divers problèmes particuliers, dans des situations complexes, et nécessitant des solutions innovantes, par exemple pour le calcul de l'hydro-dispersion des pollutions radioactives de longues périodes, dans un sous-sol rocheux peu perméable, sur des périodes de 2000 ans (étude du stockage en galerie des déchets radioactifs), ou pour le calcul de l'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers.

> Hydrogéologie énergétique et géothermie.

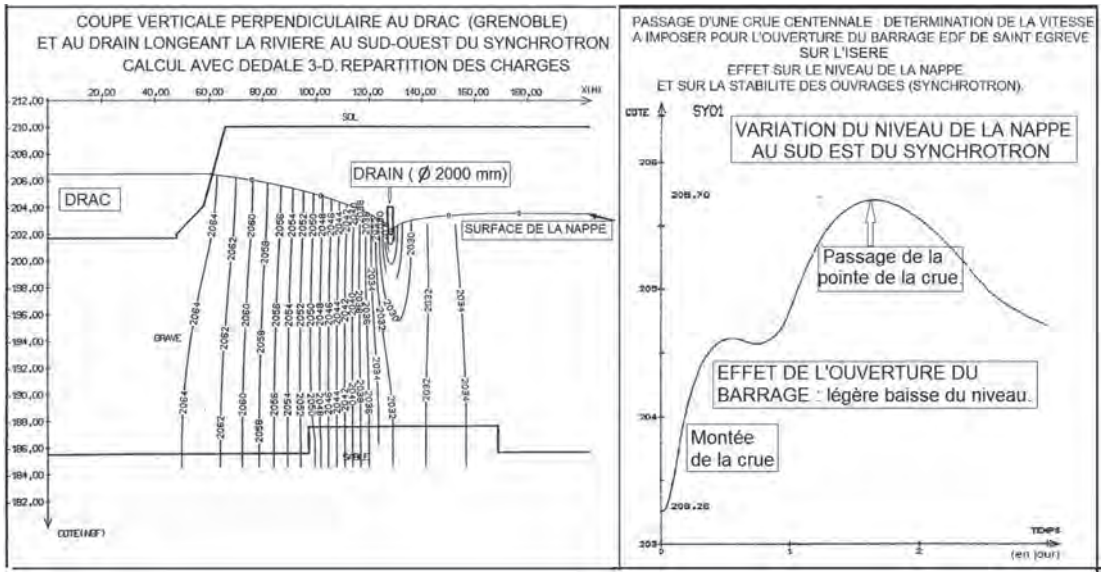
Les réservoirs d'eaux souterraines constituent une source d'énergie renouvelable utilisable à la fois pour la production de chaleur mais également de froid. L'équipe " Ressources en Eau et Modélisation " développe aujourd'hui une offre de services en la matière, valorisant les compétences purement hydrogéologiques de la SOGREAH (réalisation de forages à usage thermique, modélisations hydrodynamiques et thermiques des aquifères exploités), en association désormais avec celles plus récentes, des équipes " Energies Renouvelables " et d'ARTELIA Bâtiment & Industrie.

Développement rural

Les hydrogéologues apportent la connaissance des ressources en eaux, le fonctionnement et les caractéristiques qualitatives et quantitatives des nappes souterraines. Ils identifient les impacts des aménagements et les usages possibles des eaux souterraines afin d'éviter les conflits d'usages.

Un exemple intéressant est donné par l'étude, en 1962-65, de la nappe d'eau contenue dans les formations dolomitiques de l'Aaléno-Bathonien du Chott Chergui (environ 30 000 km^2). Après 2 ans d'études de terrain, dont un an consacré à des pompages à gros débit (4 m^3/s), les données acquises et en particulier les mesures piézométriques, ont permis de construire et régler un des premiers modèles mathématiques pour reproduire l'évolution de la nappe soumise à ce fort pompage, puis pour définir un projet pertinent d'exploitation des eaux souterraines sur le long terme pour les besoins agricoles et les autres usages.

L'une des principales études complètes dans le domaine hydro-agricole, est l'aménagement et la mise en service de 2 périmètres d'irrigation dans les plaines de Thessalie en Grèce. C'est au total 65 000 ha qui sont irrigués à partir de pompage dans 2 réservoirs souterrains : nappes alluviales rechargées en périodes hivernales par les infiltrations d'eau à travers les fonds et les berges des rivières. Les modèles mathématiques construits à partir des mesures et observations des hydrologues et hydrogéologues ont permis de confirmer les choix judicieux des implantations de 2055 forages (capacité totale de pompage instantanée supérieure à 100 m^3/s). Les hydrogéologues de SOGREAH ont assuré la supervision des travaux de forage et assisté les irrigants sur une période totale de 10 ans. Les modèles des nappes ont correctement reproduit les évolutions saisonnières des réserves en eaux. A la demande de la Banque Mondiale, les réglages des modèles ont été actualisés sur une période transitoire observée de 10 ans de 1970 à 1980. Pendant cette période, ont



Synchrotron : résultat de DEDALE 3D, crue et nappe. *SOGREAH*

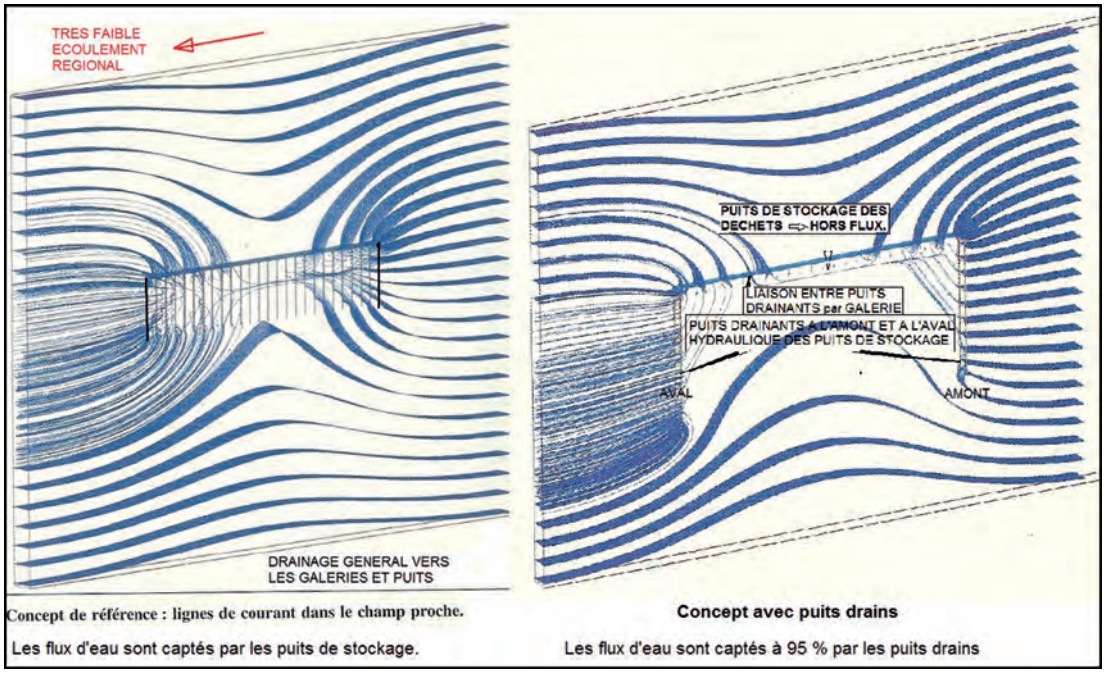


Illustration du procédé HYDRAUFARADAY (DEDALE 3D). *SOGREAH*

été intégrés dans le modèle l'hydrologie de surface, les débits des rivières et débits infiltrés, les consommations en eau par les plantes avec prise en compte des calendriers de consommations en eaux spécifiques (calendriers culturaux). Ces éléments ont permis de calculer le prix de revient complet du m^3 d'eau par type de culture (investissement et exploitation).

Une autre étude remarquable est celle des nappes souterraines fossiles du désert de Libye (Oligocène - Miocène). Ces nappes s'étendent au sud de Benghazi sur plusieurs centaines de kilomètres carrés. Leur fonctionnement hydrodynamique est particulier : bien qu'elles ne soient plus alimentées en eau, ni exploitées, la surface piézométrique présente des variations non négligeables de plusieurs décimètres au cours d'une année. Ces variations sont dues à la répercussion dans le sous-sol des variations de la pression atmosphérique, à cause d'une structure sédimentaire particulièrement fine. Le contexte hydrogéologique entraîne une réaction élastique du milieu aquifère : il s'agit toutefois d'une nappe libre, mais, au démarrage d'un pompage, le rabattement est de plusieurs mètres, comme celui que l'on observe dans les nappes captives. Puis, après quelques jours de pompage, le rabattement se stabilise suivant un palier horizontal, et après 2 à 3 mois on observe à nouveau un rabattement logarithmique typique des nappes libres. La demande du maître d'ouvrage était de connaître le débit exploitable sur une période de 20 ou 30 ans pour des exploitations agricoles à installer dans le désert : dispositifs d'exploitation, nombre de fermes possibles, implantation des forages et débits unitaires. Le fonctionnement théorique de ce type de nappe a fait l'objet d'études par Mme Streslova (Londres) et Mr Neuman (USA). Chacun avait développé un logiciel spécial pour interpréter les essais de pompage permettant de déterminer le coefficient d'emmagasinement élastique (phase initiale du pompage), puis le coefficient de drainage (phase finale). Tous deux ont offert leur logiciel à SOGREAH qui les a repris pour en faire un nouveau logiciel industriel appelé NEWMAG. Un autre logiciel régional aux différences finies a ensuite été développé par SOGREAH : le logiciel PACT. Il permet de prendre en compte simultanément les deux coefficients d'emmagasinement pour une simulation d'exploitation des eaux souterraines (minage), répondant ainsi à la demande du client.

À signaler également le modèle de la nappe de Kirkuk en Iraq réalisé pour étudier les phases de mise en place du réseau de drainage à associer à la mise en irrigation d'un périmètre de 120 000 ha. L'objectif du drainage est d'accompagner la remontée de la surface de la nappe sous l'effet des infiltrations des eaux non consommées par les plantes pour, d'une part, maintenir une zone de sol non saturé en eau nécessaire au développement des racines des plantes et, d'autre part, garantir la non-accumulation du sel dans le sol, pouvant entraîner la salinisation des sols comme cela a été observé dans de nombreuses régions arides ou semi arides : basse plaine du Nil, vallée du Pakistan, vallée du Cheliff en Algérie. Même si l'eau d'irrigation est de bonne qualité au départ, avec moins de 0,6 g/l de sel total en solution, après évaporation d'une grande partie du débit d'environ 100 m^3/s apportée par le réseau d'irrigation, c'est 60 kg/s de sel qui doivent être évacués hors du périmètre irrigué. Si le débit drainé est au total de 6 m^3/s, c'est une eau concentrée à 10 g/l qui doit être stockée dans une zone appropriée, hors des secteurs de culture.

Le même phénomène a été rencontré par SOGREAH dans de nombreux pays. Par exemple dans la plaine d'Esfahan (Iran), qui était parcourue par un réseau d'irrigation datant d'environ 500 ans (réseau traditionnel d'irrigation par submersion mis en place par un mathématicien célèbre : Tabatabai, à l'époque du Chah Abbas Premier), le bon fonctionnement du drainage et l'élimination du sel étaient assurés par des conditions naturelles favorables. Avant élimination complète vers le désert des eaux résiduelles salées, les eaux apportées aux parcelles depuis les canaux et non consommées par les plantes étaient récupérées par pompage pour un recyclage aval. L'équilibre hydraulique et physico-chimique de ce réseau ancien apparaissait comme fragile, inapte à supporter une modernisation de son fonctionnement sans mise en place d'un nouveau système de drainage adapté. La conception de ce système de drainage a été fondée sur la réalisation d'un modèle mathématique de représentation des écoulements souterrains et de surface, intégrant la rivière Zayandé Roud, et le chevelu complexe des canaux d'irrigation et de drainage. Il a débouché sur la définition d'un projet de drainage original respectant le recyclage traditionnel par pompage et le drainage classique assurant le transport hors des zones de culture de plusieurs tonnes de sels par an. Le modèle mathématique de la nappe, qui couvre environ 100 000 ha, a été construit sur place par une équipe d'hydrogéologues chargée d'étudier et de saisir toutes les données de terrain : inventaire des puits, fonctionnement des réseaux traditionnels d'irrigation et de drainage, caractéristiques de l'aquifère, cartographie de la qualité chimique des eaux.

D'une façon générale, les modèles de nappe ont toujours été construits par les hydrogéologues ayant participé directement aux mesures et reconnaissance de terrain.

Hydrologie, aménagements de rivières et protection contre les crues, aménagement du littoral

De nombreuses études de nappes ont complété des études de cours d'eau pour la gestion des crues, des submersions des sols par remontée de la surface piézométrique, des abaissements excessifs des nappes alluviales.

Par exemple, le modèle mathématique général de la nappe de Grenoble construit en 1983 a permis de :

- déterminer la cote de calage des seuils en rivières qui fixent les cotes de la nappe à leurs contacts. Ces seuils étaient nécessaires à l'arrêt des érosions régressives des fonds des lits de l'Isère et du Drac. Leur mise en place ne devait pas entraîner des submersions des sous-sols des bâtiments,

- déterminer la cote de calage des ouvrages de franchissement routier inférieurs (passage de la voie de contournement sud U2 au-dessous du Cours de la Libération à Grenoble),

- dimensionner et positionner les ouvrages de stabilisation de la nappe autour du Synchrotron implanté à la confluence du Drac et de l'Isère. Toutes les situations hydrologiques ont été prises en compte : crues exceptionnelles, vidange rapide de la retenue de Saint-Egrève, étiages,

- identifier les risques de submersion par remontée de nappe (crues de nappe),

- calculer les impacts sur la surface de la nappe de la construction de fondations profondes,

- déterminer les effets sur la surface de la nappe de son drainage par le réseau d'égout et analyser les conséquences des éliminations de ces eaux dites " parasites " pour la station d'épuration de la région de Grenoble.

- calculer les trajectographies et l'hydrodispersion des pollutions à travers la plaine de Grenoble en régime transitoire d'écoulement, sur des périodes de plusieurs années, intégrant les variations saisonnières des débits des rivières Drac et Isère.

Une attention particulière a été apportée à l'étude des relations nappe-rivières (l'Isère et son affluent, le Drac). À cet effet, des modèles locaux en 3 dimensions ont été mis en œuvre à l'aide du logiciel DEDALE 3D et ont permis de valider la représentation hydrogéologique des rivières dans le modèle régional.

Les aménagements de zones urbaines initiés par les hydrogéologues de SOGREAH sont extrêmement variés et adaptés aux conditions environnementales spéciales et aux besoins particuliers : étude des contraintes de sol et sous-sols préalablement à la création de construction, potentiel énergétique des nappes, ressources en eau, risques divers.

On peut citer les solutions particulières combinant la gestion des fortes crues et la recharge des aquifères qui ont été étudiées et mises en œuvre pour la protection de vastes zones urbaines dans des régions semi-désertiques : Oman, Tunisie, Arabie Saoudite… Par exemple, à Oman, la ville de Sur a fait l'objet de travaux de retenue des crues pouvant être soudaines et très destructrices (digues de 250 mètres de longueur et de 22 mètres de hauteur). La protection de la ville et de l'aéroport de Sallalah (Oman) est assurée par une digue de 6 km de longueur et de 15 mètres de hauteur en moyenne ; l'eau stockée dans la retenue s'infiltre et recharge la nappe. L'écoulement souterrain a renforcé et pérennisé l'alimentation en eau des oasis à l'aval.

En ce qui concerne l'aménagement du littoral, la protection des plages et le développement portuaire, les hydrogéologues interviennent principalement pour les impacts des travaux de creusement portuaire : modification de la piézométrie, intrusion saline...

Développement industriel, industrie propre, gestion des sites pollués

En s'appuyant sur les compétences de ses hydrogéologues et le développement de ses outils internes, SOGREAH a très tôt été missionnée par des maîtres d'ouvrages privés sur des problématiques touchant aux eaux souterraines, d'abord en tant que ressource en eau industrielle, puis de plus en plus comme milieu vulnérable à protéger vis-à-vis d'activités potentiellement polluantes. Essentiellement pour le marché français, mais pas seulement, ces contrats étaient de tailles plus modestes que ceux des gros projets internationaux énergétiques ou de développement rural, fluvial ou maritime décrits ci-avant, mais ont permis de diversifier la clientèle de SOGREAH. L'alimentation en eau a toujours constitué un enjeu important pour certaines industries. De nombreuses études sur le captage des eaux à usage industriel ont été conduites par les hydrogéologues de la SOGREAH à partir des années 1960. Depuis cette période, ceux-ci entretiennent des relations étroites avec le secteur industriel et notamment, avec les grandes entreprises industrielles : TOTAL, LAFARGE, ARKEMA, OCP MAROC, VALE, SNPE, ARCELOR, RHÔNE POULENC, RHODIA, PECHINEY…

Des champs captants de forte capacité ont été ainsi réalisés. On peut citer le champ captant de la nappe littorale de Laayoune (intrusion d'eau de mer) pour l'industrie des Phosphates au Maroc (débit 5 000 m^3/h).

Les eaux souterraines constituent une contrainte forte pour certaines industries, notamment pour les industries minières. Des études hydrogéologiques très pointues avec

modélisation des écoulements souterrains sont menées sur les exploitations minières de Nouvelle-Calédonie pour le compte de la société minière VALE.

De nouvelles exigences de la part de ces clients en termes de réactivité, d'engagement sur les performances attendues, de prise en compte de contraintes opérationnelles particulières ont demandé à SOGREAH de maintenir son niveau d'exigence et de remise en cause permanente de ses acquis. Dans ce domaine, les sujets d'intervention suivants peuvent être succinctement décrits par ordre chronologique :

> Ressource en eau industrielle et puits privés

De nombreuses références, surtout à partir des années 1950, démontrent le développement des études hydrogéologiques assurées par SOGREAH auprès de nouveaux clients industriels, le plus souvent désireux d'implanter des puits de captage pour leurs besoins en eau industrielle : au-delà des études d'implantation et de faisabilité, d'estimation des débits de production et de conception des ouvrages, SOGREAH a progressivement accompagné ses clients en phase de réalisation (consultation d'entreprises, suivi et réception de travaux, monitoring…). Les activités de papeteries notamment ont, à cette époque, justifié la réalisation de nombreuses études de dimensionnement d'ouvrages de captage. La renommée de SOGREAH à l'international a permis d'intervenir ponctuellement dès les années 1960 – 1970 en Espagne (Air Liquide), en Tunisie (Phosphates de Gafsa), en Iran (Dupont de Nemours), en Indonésie (Technip)… Mais le marché de ce type d'études est resté très majoritairement français, et a gagné la plupart des secteurs industriels (pétrole, chimie, métallurgie, agroalimentaire …), même si aujourd'hui les projets de développement industriels en France ne constituent malheureusement plus un gros potentiel d'études de nouveaux ouvrages de production d'eau.

> Impacts environnementaux et sites et sols pollués

La prise en compte des eaux souterraines non plus seulement en tant que ressource mais comme milieu vulnérable vis-à-vis des risques de pollution industrielle, a généré pour SOGREAH de nombreuses missions plutôt à partir des années 1970 et surtout 1980. Les volets " eaux souterraines " des études d'impact de dossiers ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) ou Loi sur l'Eau, les mémoires de réhabilitation et aujourd'hui les " plans de gestion " de sites pollués constituent alors le cadre réglementaire dans lequel l'évaluation des vulnérabilités des eaux souterraines est à mener. Ce type d'études représente encore aujourd'hui un axe important de développement des activités de SOGREAH (désormais ARTELIA) en environnement, et comprend notamment :

- des **investigations de terrain** avec réalisation de sondages, piézomètres, piézairs et prélèvement d'échantillons d'eau, de sols, de gaz du sol, d'air ambiant, de sédiments, de végétaux pour analyses en laboratoire : encouragée en France par les réglementations successives en matière de gestion des sites pollués, la caractérisation des milieux et la mesure des paramètres physico-chimiques et des pollutions chimiques ont demandé à SOGREAH de constituer progressivement une équipe de techniciens de terrain spécialisés équipés de matériels adaptés, et un réseau de partenaires sous-traitants (foreurs, laboratoires). La norme X31-620, actualisée en juin 2011, encadre aujourd'hui les prestations de service relatives aux sites et sols pollués, et notamment les opérations de diagnostic des milieux : les eaux souterraines sont alors la plupart du temps la problématique la plus délicate à gérer, en raison de contraintes de dépollution souvent complexes et de risques de migration de polluants dans le voisinage de sites industriels ou de friches polluées, dont la maîtrise demande la combinaison de mesures de terrain et d'outils de modélisation ;

- des **modélisations de transfert de polluants**, nécessitant parfois la simulation de la propagation de panaches de pollution au sein d'aquifères impactés. Comme explicité en introduction, SOGREAH utilise pour cela aujourd'hui des logiciels du marché reconnus par les autorités compétentes, et a peu à peu abandonné ses propres outils de modélisation, et définitivement au début de la décennie 2000 ;

- des **évaluations des risques sanitaires** associés aux expositions de polluants pour les cibles humaines identifiées (travailleurs et salariés d'un site industriel en activité, riverains, futurs usagers d'un projet de réhabilitation et de changement d'usage – bureaux, logements, établissements sensibles) ;

- des **plans de gestion** définissant les conditions opérationnelles d'une opération de dépollution des sols et des eaux souterraines, ou de gestion des déblais et des eaux d'exhaure en cas de travaux de terrassement importants (création de parkings souterrains, re-profilage de sites, assèchement de fouilles…) ;

- enfin des missions classiques de maîtrise d'œuvre de travaux de dépollution ou générant des mouvements de terres non inertes, le plus souvent validés par des Analyses des Risques Résiduels (ARR) et la mise en place de programme de surveillance des eaux souterraines, souvent sur plusieurs années.

Cette activité en développement est aujourd'hui celle de l'équipe dédiée " Sites et sols pollués " d'ARTELIA, structurée autour de grands comptes privés (TOTAL, Exxon-Mobil, CASINO, NEXANS, RENAULT, RETIA…) et bénéficiant de l'appui de l'équipe " Ressource en eau & Modélisation " d'ARTELIA, quand des études fines des écoulements souterrains et des panaches de pollution sont nécessaires. Dans ce contexte, les solutions de traitement *in situ* des pollutions, y compris les solutions de confinement, sont de plus en plus privilégiées par rapport aux solutions classiques de traitement sur site ou hors site.

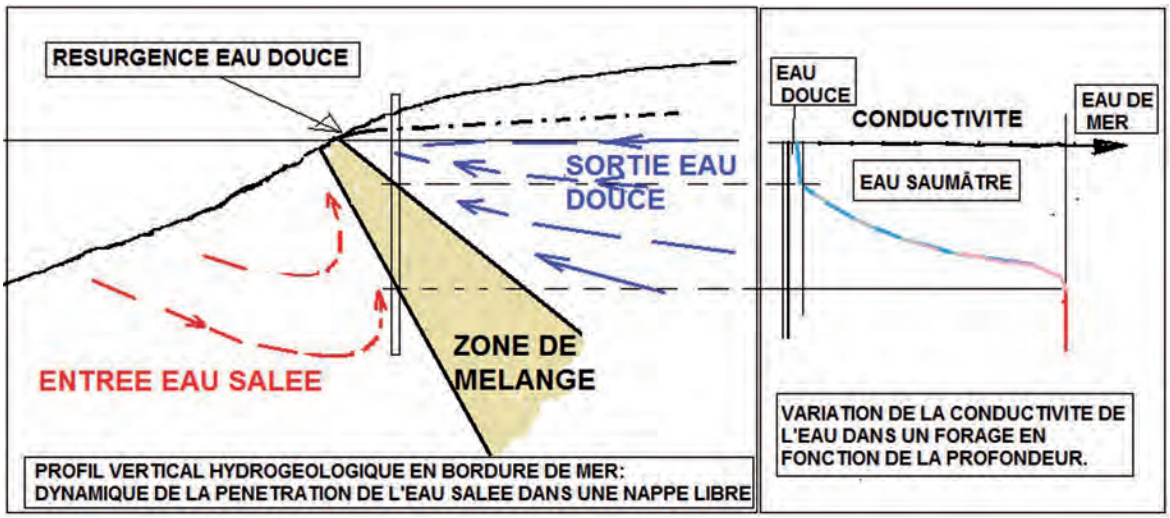
Sur le sujet particulier du confinement de déchets radioactifs (mené pour le compte du CEA), la filiale LHF de SOGREAH a été appelée dès l'origine des études. La solution proposée est complémentaire du concept qui consiste à interposer plusieurs barrières de confinement. Elle consiste à réaliser une barrière hydraulique par la mise en place de puits drainants qui isole hydrauliquement la zone de stockage proprement dite. La validation du système proposé a été réalisée à l'aide d'un modèle mathématique construit avec le logiciel DEDALE-3D. Il prend en compte la structure détaillée du stockage et a nécessité 360 000 mailles. Ce logiciel est un vrai 3D. Il permet de modéliser les écoulements et le transport de soluté en zone saturée et non saturée. Il prend en compte les hétérogénéités et les anisotropies des sols, les singularités hydrauliques ainsi que l'influence de la variation de la densité sur les gradients d'écoulement liées aux variations de température au voisinage des produits stockés.

Une attention particulière a été apportée à la bonne convergence des calculs dans un milieu de perméabilités fortement contrastées, avec des valeurs de 10^{-11} m/s pour la formation géologique en place et de 10^{-6} m/s pour le milieu drainant. La durée représentée des phénomènes est en accord avec la longue période radioactive du produit stocké.

Les solutions originales proposées, permettant d'améliorer la sécurité, ont conduit à proposer le procédé Hydraufaraday® pour le confinement de sites pollués. Après avoir aidé le CEA à défendre la brevetabilité du dispositif (notamment à la suite de la procédure de recherche d'antériorité), SOGREAH a conclu en 2003, avec le CEA, un accord de développement avec une licence d'exploitation du brevet pour des usages non-nucléaires (accord de licence pour l'exploitation du brevet FD 242 " Mur drainant implanté dans un sol ".

Hydraufaraday® est ainsi un procédé original de confinement hydraulique passif de sites pollués, ou de sites pouvant présenter des risques de pollution. Il se différencie de la famille plus classique des solutions fondées sur les barrières perméables actives. Ce procédé repose sur le principe de fonctionnement d'une cage de Faraday hydraulique. Cette " cage " est constituée de puits et de galeries drainantes entourant le site pollué. L'écoulement passera alors préférentiellement de l'amont hydraulique du site à l'aval par ces voies privilégiées à pertes de charges faibles (perméabilité infinie), plutôt qu'à travers le sous-sol du site pollué beaucoup moins perméable. Le résultat de ce détournement des eaux souterraines de l'amont vers l'aval est qu'au droit du site la nappe présente un gradient quasiment nul. Il n'y a donc plus d'écoulement souterrain et les polluants ne migrent plus (en considérant la diffusion moléculaire négligeable), assurant ainsi le confinement d'une pollution.

Le principe Hydraufaraday® a intéressé de nombreux industriels, inspiré le dimensionnement de solutions de



Dynamique de pénétration d'eau salée dans un aquifère. *SOGREAH*

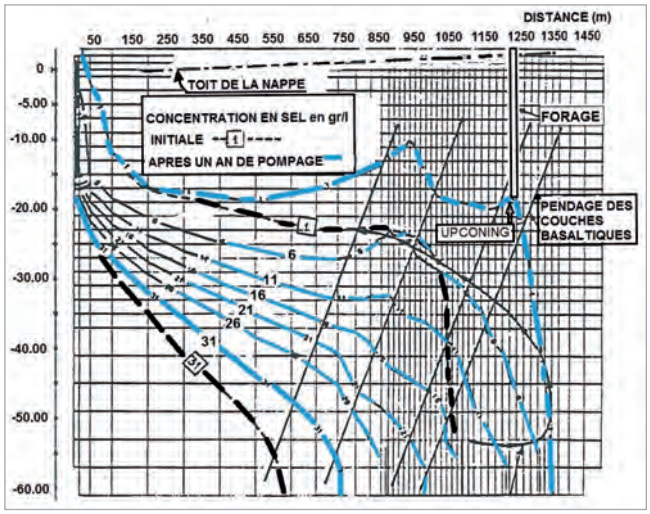


Illustration du phénomène d'Upconing dans un aquifère (DEDALE 3D). *SOGREAH*

confinement / traitement de sources de pollution des eaux souterraines au sein de sites industriels, et constitue aujourd'hui une alternative pouvant être proposée par ARTELIA dans ses plans de gestion (notamment pour une friche fortement polluée d'ARCELOR MITTAL.

> Stockages souterrains

SOGREAH a été dès l'origine appelée à participer aux études sur le confinement de déchets radioactifs (menées pour le compte du CEA puis de l'ANDRA). SOGREAH a ainsi participé aux premières réflexions sur les principes et la faisabilité de ce type de stockages profonds, et a ensuite participé, avec d'autres bureaux, aux études de la stratification des radionucléides dans les galeries de manutention des concepts de stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Ces études ont utilisé, au début des années 2000, des solutions analytiques et des modèles mathématiques 2D et 3D, pour procéder à la simulation des propagations des radionucléides lors de scénarios de dysfonctionnement.

> Hydrogéologie des eaux thermales et minérales

Depuis les années 1990 SOGREAH a développé une offre spécifique dans le domaine des eaux thermales et minérales, à l'occasion d'une évolution de la réglementation imposant notamment aux établissements thermaux de sécuriser leur alimentation en eau : il s'est agi à la fois de mieux maîtriser les risques de développement bactériologique (problématique des légionnelles) et de garantir le maintien de la qualité et de la composition de l'eau au cours de son transport, depuis la source ou le puits de captage jusqu'aux cabines de soins. Un savoir-faire en matière de captages et de circuits de distribution d'eau thermale a été progressivement développé par SOGREAH et mis à l'épreuve sur de nombreuses stations (Enghien-les-Bains, Plombières-les-Bains, Guagno-les-Bains, Allevard, Uriage, Amnéville, Châteauneuf-les-Bains, Evaux-les-Bains, La Léchère…). Ce savoir-faire a été mis à profit en parallèle par SOGREAH auprès de producteurs d'eau minérale et de porteurs de projet d'embouteillage (Wattwiller, Parot, Valecrin, Oriol, Vittel, Hépar, Contrex). En France, de nouveaux gisements d'eaux minérales sont en train de se développer en marge des grands gisements historiques : Jonzac, Velleminfroy. Les équipes d'hydrogéologues de la SOGREAH associées aux équipes d'ARTELIA du secteur Bâtiment & Industrie accompagnent ces projets depuis l'exploitation de la ressource jusqu'à la construction de l'usine d'embouteillage.

> Protection des eaux souterraines dans le cadre d'aménagements spécifiques (création de décharges et centres d'enfouissement technique, carrières, projets d'exploitation minière…)

Par nature, tous ces projets ont potentiellement un impact fort sur les eaux souterraines et l'environnement en général, et sont depuis longtemps particulièrement encadrés sur le plan réglementaire. Les années 1990 et 2000 ont vu plus précisément le développement des études d'impact de carrières ou de décharges, au moment de leur création ou de leur extension, mais également lors de leur fermeture ou de leur réhabilitation. SOGREAH a alors participé à l'amélioration des pratiques pour mieux protéger les eaux souterraines et les milieux, notamment en termes de conception de centres d'enfouissement technique (exigences en matière de perméabilité des couches géologiques sous-jacentes, aménagement des casiers, gestion des eaux pluviales, des lixiviats, des biogaz…). Ce savoir-faire est encore exploité aujourd'hui, le plus souvent à l'international dans des pays émergents maintenant que l'essentiel du parc français des " décharges " a été progressivement réhabilité et sécurisé. Des décharges de type classe I ont été conçues par SOGREAH pour le stockage mono-produit et réalisées pour le compte d'industriels.

> Géothermie

Cette source d'énergie renouvelable, bien qu'ancienne et ayant fait l'objet d'études de la part de SOGREAH dès les années 1970, redevient, depuis quelques années une option intéressante pour les porteurs de projets industriels ou urbains. L'équipe " Ressources en Eau et Modélisation " développe aujourd'hui une offre de services en la matière, valorisant les compétences purement hydrogéologiques de SOGREAH en association avec celles plus neuves de l'équipe " Energies renouvelables ", pour concevoir et suivre la réalisation de doublets géothermiques, avec des applications pour des systèmes de forte puissance.

Développement urbain, alimentation en eau, gestion des déchets

L'alimentation en eau de Damas en Syrie est un exemple d'étude hydrogéologique caractéristique. Cette ville est alimentée à partir de la source de Figeh, émergeant du massif karstique, l'Anti-Liban. Connue depuis l'antiquité et captée depuis l'époque romaine, cette source au débit saisonnier très variable apparaissait comme insuffisante pour satisfaire les besoins en eau de la ville et sa région sur le moyen terme. À partir de 1962, les hydrogéologues associés aux hydrologues ont étudié en détail cette source au fonctionnement complexe : identification du bassin versant, identification des temps d'infiltration des pluies, identification du volume du réservoir souterrain par application des méthodes de traceurs naturels (première application au début des années 1970, par le CENG (à présent CEA), à la demande de SOGREAH, des analyses de carbone 14, tritium, deutérium pour le traçage des eaux souterraines). Après plusieurs années de prospections, études géologiques, géotechniques, hydrogéologiques, et de calculs, un nouveau projet de captage a été préparé. Il comporte une modification du griffon et la mise en place d'un barrage souterrain pour une meilleure gestion inter-saisonnière de la ressource. Le débit minimum d'étiage exploitable a été considérablement augmenté (6 – 8 m^3/s). Des périmètres de protection de la ressource ont été déterminés. Il couvre le massif karstique sur une surface de plus de 20 000 ha.

Pour de nombreuses villes localisées en zone côtières, SOGREAH a été confrontée aux risques d'intrusion saline dans les eaux captées pour l'AEP, par exemple pour les nappes d'Abidjan, d'Aden au Yémen du Sud, à l'Ile de la Réunion, à Madagascar, à Cotonou au Bénin…. Pour certaines de ces études, les hydrogéologues ont utilisé DEDALE 3D, parce qu'il permet la présentation d'une solution complète dans les trois dimensions des aquifères présentant une structure géologique complexe, caractérisée par plusieurs couches elles-mêmes anisotropes, avec la résolution simultanée des écoulements souterrains et des mouvements de sel. La prise en compte de la variation de densité de l'eau avec la teneur en sel permet de représenter correctement la zone de mélange de l'eau douce et de l'eau salée.

Le phénomène de remontée de sel au-dessous d'un puits de pompage (upconing) est correctement reproduit.

Depuis 2010, la nouvelle société ARTELIA, qui regroupe SOGREAH et COTEBA, a été construite sur les valeurs du développement durable. Les 2 co-présidents et principaux acteurs du regroupement ont en effet mis en place une structure transversale particulière fondée sur l'introduction du développement durable dans tous les métiers de la nouvelle société, fédératrice des différentes activités.

Les hydrogéologues, qui ont de longue date intégré le développement durable et la protection de l'environnement dans leur métier voient un confortement de leurs activités à travers cette nouvelle structure.

Paul JARDIN
Bruno CANALETA
Stéphane FOURNY

Vestiges du captage romain de la source de Figeh (alimentation en eau de Damas, Syrie). *J.-C. Roux, 1991*

HYDROGÉOLOGUES TERRITORIAUX

À l'aube du XXIe siècle, force est de constater que l'eau souterraine est encore loin d'être considérée comme un patrimoine commun de la nation. Certes, la notion même de patrimoine pour une ressource fluide, évolutive dans le temps et dans l'espace, est une notion nouvelle qui constitue un élément positif pour la protection de l'environnement, mais il aura fallu attendre 2 000 ans, voire plus, et le pillage de certaines nappes d'eau souterraine, pour en prendre véritablement conscience.

L'hydrogéologie est encore une science récente, mais l'usage des eaux souterraines remonte à la nuit des temps. Avec la connaissance des milieux souterrains et la performance des techniques de prospection, nous avons assisté dans le dernier quart du XXe siècle à une indéniable dégradation de la ressource en eau souterraine tant quantitative que qualitative. Peut-on alors parler de progrès ? Non. Un patrimoine parfois mis à sac en si peu de temps, par méconnaissance du milieu, ignorance ou refus de faire appel à des spécialistes, n'est pas dans une situation de valorisation. Trop souvent, nous avons assisté à une politique d'exploitation intensive et de traitement curatif plutôt qu'à une véritable politique de prévention. Pour de nombreuses ressources nationales en eau souterraine, le constat est plutôt amer.

Le seul véritable progrès semble donc bien être dans cette prise de conscience que l'eau souterraine est un bien commun, un patrimoine qui nécessite une gestion équilibrée, non pas à l'échelle nationale, trop éloignée de l'usager, mais à l'échelle territoriale et locale de bassin. Et pour la mettre en œuvre, des spécialistes professionnels sont et seront nécessaires.

Les administrations et collectivités territoriales qui ont recruté des hydrogéologues ont pris conscience de l'intérêt public que revêtent leurs missions, des missions proches du terrain et des acteurs locaux de la ressource en eau.

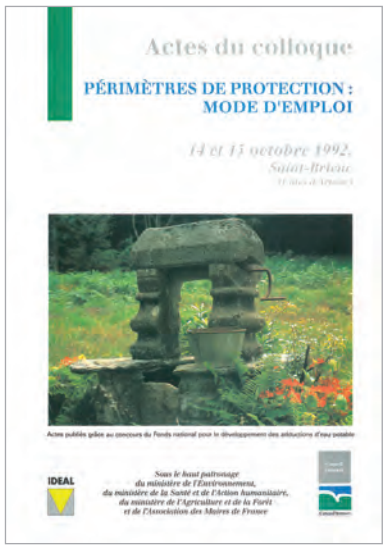
Les hydrogéologues départementaux, qu'ils soient des collectivités territoriales (Conseils Généraux, Communautés de Communes ou autres regroupements de collectivités locales) ou d'administrations décentralisées de l'Etat, sont apparus dans les années 70. Certains d'entre eux étant par ailleurs détachés du BRGM pour exercer des missions précises, près et au profit de collectivités locales. Bien souvent au départ, il s'agissait de missions ponctuelles pour découvrir ou préciser des ressources jusqu'alors non valorisées.

La sécheresse de 1976 a véritablement marqué l'esprit des représentants de l'État et des élus locaux de l'époque, et rétrospectivement, cette année fut vraisemblablement

Claude Roy, Conseil Général de Vendée (2007). *J.-C. Roux*

Bilan de recherches en eau souterraine - Conseil Général de Vendée en 1985. *C.G. Vendée*

Gilles Marjolet, Conseil Général des Côtes-d'Armor (1993). *BRGM*



«Périmètres de protection : mode d'emploi» Conseil Général des Côtes-d'Armor (1992)

La Fontaine des Chartreux à Cahors (Lot). *P. Marchet*

Source de la Goule noire (Massif du Vercors, Isère). *Ph. Crochet*

l'élément déclencheur pour une prise de conscience de la nécessité de valoriser au mieux les ressources locales disponibles. C'est ainsi que dans le Grand Ouest, à partir de 1973, les premiers postes d'hydrogéologues furent confirmés dans les départements de Loire-Atlantique, Sarthe, Mayenne, Côtes-d'Armor, Morbihan ou Vendée. À l'époque, ces rares professionnels de l'hydrogéologie, coupés quelque peu des ministères et des universités, ressentaient la nécessité de se réunir pour échanger sur des difficultés administratives ou techniques propres à leur spécificité d'ingénieur de terrain. Peu à peu, ils ont senti le besoin de créer un réseau de compétences aux quatre coins du territoire national. Et c'est ainsi que, sous l'impulsion d'une petite quinzaine d'hydrogéologues de la Bretagne, des Pays de la Loire et de la Normandie, a vu le jour en 1988 l'Association des Hydrogéologues des Services Publics (AHSP), à l'initiative de Jean-Michel Lutzer (Conseil Général de Mayenne) et de Gilles Marjolet (Conseil Général des Côtes-d'Armor). À l'heure où la décentralisation suscitait la promotion d'un service public attaché à la préservation de la ressource en eau souterraine, l'association permettait de promouvoir le métier d'hydrogéologue à travers la valorisation et la protection des eaux souterraines locales.

La proximité du terrain et du pouvoir décisionnel local a permis à ces jeunes ingénieurs de valoriser toutes les facettes de l'hydrogéologie. Faire connaître les eaux souterraines pour susciter la meilleure gestion reste l'objectif principal des fonctions de l'hydrogéologue qui s'inscrivent dans l'intérêt général. À l'époque où la recherche, la gestion et la protection de la ressource en eau constituent des préoccupations locales majeures (tant sur le plan sanitaire, qu'économique ou politique), les postes d'hydrogéologues départementaux permettent de défendre la responsabilité collective de promotion du patrimoine commun que constitue l'eau souterraine.

Cette responsabilité va bien au-delà de la mise en place de lois, décrets, circulaires ou arrêtés. Elle va, sur le terrain, jusqu'à veiller à la bonne application des textes et le cas échéant, dénoncer fortement les irrégularités observées.

Adhérents ou non à l'Association, les hydrogéologues des collectivités territoriales sont maintenant nombreux et renforcent indéniablement la lisibilité de l'hydrogéologie française dans toutes ses composantes.

Les missions confiées aux hydrogéologues des collectivités territoriales sont nombreuses, variées et bien souvent pragmatiques, ce qui confère au métier une reconnaissance des pouvoirs publics et des usagers de la ressource. Parmi ces missions, citons quelques-unes d'entre elles :

Prospection et mise en évidence de nouvelles ressources

Les besoins en eau ont considérablement augmenté, et les hydrogéologues sont amenés à mettre en œuvre des programmes de recherche pour satisfaire les demandes publiques ou privées. Dans ce cadre, les techniques de prospection géophysique (tant pour les formations de socle que pour les formations sédimentaires) sont souvent

Michel Yvroux, Conseil Général de l'Aude (2003). *J.-C. Roux*

André Tarisse, DDEA du Lot (2010). *J.-C. Roux*

Conseil Général de l'Eure

Les membres de l'AHSP autour de leur président Bruno de Grissac
(Barrage de Verne-la-Môle (Var) (mai 2008). *AHSP*

utilisées, permettant ainsi de vulgariser ces investigations et de développer techniquement les méthodes exploitées. Sur le terrain, ces hydrogéologues sont souvent confrontés aux propos aberrants des sourciers qui sévissent encore malheureusement. Avec pédagogie, ils accompagnent alors les maîtres d'ouvrage dans leurs décisions. Selon le résultat des prospections géophysiques, de nombreux sondages de reconnaissance ont pu être réalisés et suivis par les hydrogéologues. L'assistance technique apportée au moment des travaux de forage permet d'orienter les recherches et de conseiller au mieux sur les équipements et les pompages d'exploitation.

Surveillance et gestion des ressources en eau souterraine

Les hydrogéologues des collectivités territoriales, de par leur présence au sein même des bassins hydrogéologiques, ont su mettre en œuvre des réseaux d'observation, indicateurs de l'état de la ressource. C'est ainsi qu'avec l'augmentation des prélèvements en nappe ont pu être positionnés des piézomètres, tant pour le suivi quantitatif que qualitatif. La bonne connaissance du fonctionnement des systèmes aquifères permet aux services responsables de la Police de l'Eau de mettre en œuvre des protocoles de gestion sur la base des réseaux piézométriques. À ce titre, les hydrogéologues territoriaux sont garants de la gestion cohérente et coordonnée des eaux souterraines.

Planification

La Loi sur l'Eau de 1992 a nécessité, à l'échelle nationale, la mise en place de Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Dans les départements et régions de France, les hydrogéologues sont des acteurs essentiels à la mise en œuvre de ces schémas, de par leur connaissance des aquifères (fonctionnement hydrodynamique, prélèvements et usages opérés des ressources souterraines) et des acteurs locaux. Par ailleurs, ils constituent bien souvent l'intermédiaire privilégié pour la bonne application de la réglementation en vigueur.

Pédagogie

La présence locale d'un hydrogéologue constitue toujours un atout pour la promotion de la discipline et la mise en valeur des eaux souterraines. Présents au moment des travaux de recherche, acteurs dans la gestion de la ressource, promoteurs de l'information et de la sensibilisation, ces experts hydrogéologues permettent, à l'échelle locale, d'être les vecteurs de la communication en faveur des eaux souterraines. Par la presse locale, par l'intermédiaire d'expositions décentralisées, par des interventions-conférences en réunion publique ou dans un cadre pédagogique scolaire, le métier d'hydrogéologue est ainsi valorisé et prend ainsi toute sa place dans l'activité économique locale.

À travers ces quelques exemples, il est possible d'affirmer l'importance du rôle des hydrogéologues territoriaux dans la promotion et le développement de l'hydrogéologie. Leur mission de proximité, au plus près des préoccupations des collectivités de base, revêt indéniablement une mission d'intérêt général.

La plupart des hydrogéologues territoriaux et des services publics sont regroupés au sein de l'association des Hydrogéologues des Services Publics.

En 2011, l'AHSP compte 85 adhérents. Elle regroupe notamment des hydrogéologues des collectivités territoriales (51 membres), des Agences de l'eau (11 membres), des DREAL, des ARS et des DDT.

L'AHSP a organisé à Bordeaux, en octobre 2008, un colloque concernant " Le forage d'eau au XXIe siècle ".

Claude ROY
Conseil Général de Vendée

Colloque de l'AHSP «Le forage d'eau au XXIe siècle» (Bordeaux, 2008). *AHSP*

Visite de l'AHSP sur un site d'aménagement compensatoire de l'autoroute A 19, Loiret (juin 2004). *AHSP*

Bernard Bonneviot, Directeur de l'AELB (1973)

LE RÔLE DES AGENCES DE L'EAU

La loi sur l'eau du 16 décembre 1964 a créé la notion juridique de bassins, rapidement délimités ensuite pour former les 6 grands bassins hydrographiques : Adour-Garonne (AG), Artois-Picardie (AP, Loire-Bretagne (LB), Rhin-Meuse (RM), Rhône-Méditerranée-Corse (RMC), et Seine-Normandie (SN). Le champ d'action de cette loi fondatrice affirme l'unicité de la ressource : cours d'eau, canaux, lacs ou étangs, eaux souterraines, eaux de la mer dans les limites territoriales.

Cette même loi a institué les Comités de bassin, et les Agences de bassin chargées de faciliter les diverses actions d'intérêt commun au bassin.

En 1992, les Agences de bassin deviennent officiellement " Agences de l'eau ", mais dès 1976 J. Vernier, alors directeur d'Artois-Picardie avait déjà ainsi dénommé cette Agence afin d'éviter la confusion dans les esprits avec le " Bassin Minier " du Nord - Pas-de-Calais.

Sous la dénomination initiale d'Agences financières de bassin, ces nouveaux établissements publics, dont les premiers directeurs ont été Jacques Roubinet (AG), Yves Martin (AP), Bernard Bonneviot (LB), Jean-François Saglio (RM), Jean-Louis Lacroix (RMC) et François Valiron (SN), sont chargés de contribuer à l'exécution d'études, de recherches, d'ouvrages et de travaux d'intérêt commun aux bassins. Pour cela, elles disposent du produit de redevances sur la pollution et l'exploitation des ressources en eau, et accordent des subventions et des prêts aux personnes publiques et privées.

Le produit des redevances, affecté pour partie à la connaissance et à la gestion des ressources en eau souterraines, a ainsi donné une très nette impulsion au développement de l'hydrogéologie française, qui s'était surtout illustrée dans les colonies ou à l'étranger.

Dans les débuts, les études et travaux ont le plus souvent été réalisés par les personnels des agences, les premiers hydrogéologues ayant été A. Cadiou, J. Cornet et H. Manéglier (SN), J. Debuisson (AP), S. Ramon (RM), M. Plaud (AG), et un peu plus tard M. Albinet (RMC), P. André puis P. Billault (LB).

Par la suite, la part la plus importante de leur action s'est exercée par le moyen principal imaginé par le législateur : le financement de projets portés par des tiers (collectivités, universités et organismes de recherche…) ou la maîtrise d'ouvrage directe. Ce sont ainsi de nombreuses études et travaux qui ont pu être réalisés grâce à ces financements, permettant d'une part des avancées notables dans la connaissance du territoire, dans la recherche et le

En métropole, les 6 bassins traditionnels des Agences de l'eau ont été ventilés en 9 districts par la Directive-Cadre européenne, en distinguant le Rhin de la Meuse et de l'Escaut, et la Corse.
Quatre autres districts correspondent aux 4 circonscriptions des Offices de l'eau des DOM et au territoire de Mayotte.

Yves Martin, Directeur de l'AEAP (1965). *D. Martin*

François Valiron, Directeur de l'AESN (1972). *A. Cadiou*

développement de nouvelles techniques, et d'autre part de créer un volume d'activité dont l'ingénierie publique et privée en hydrogéologie a bénéficié.

Les Agences de l'eau ont également un rôle incitatif important lorsqu'elles :

- conditionnent certaines de leurs aides à des préalables, comme la réalisation d'études hydrogéologiques, ou l'exigence de conception et de suivi par un bureau d'étude hydrogéologique pour financer des forages agricoles (LB, imité plus tard par AG) ;

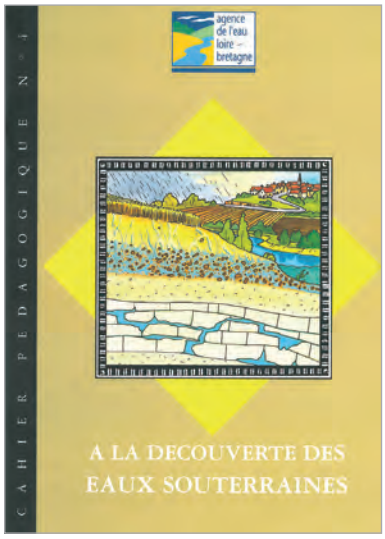
- amènent les maîtres d'ouvrages " traditionnels " à participer à des études ou à des actions à l'échelle de systèmes aquifères dépassant géographiquement leur circonscription, en utilisant la modulation des taux de redevances et d'aides selon les aquifères pour orienter les comportements : redevances majorées pour les prélèvements et aides majorées pour les études et outils favorisant la gestion de ces aquifères (Nappes Intensément Exploitées de Loire Bretagne, nappes du SAGE Nappes profondes en Adour Garonne) ;

- assument une partie des risques inhérents à la recherche d'eau, comme une assurance échec apportée aux maîtres d'ouvrages pour exploiter des aquifères captifs profonds peu connus (en substitution aux aquifères superficiels pollués), ce qui a permis de privilégier l'acquisition de données essentielles (diagraphies et tests) sur les différents aquifères et leurs épontes traversés (AG).

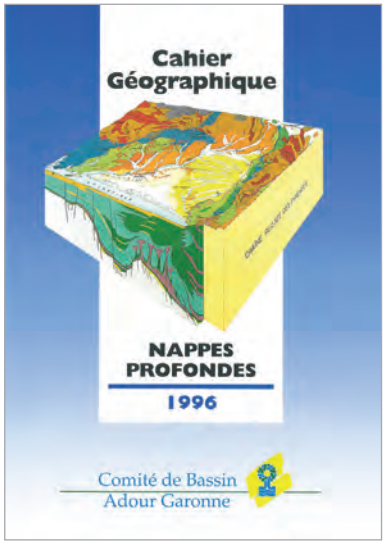
Enfin, un autre volet du rôle des Agences est celui de leur participation aux divers groupes techniques que leur ministère de tutelle a toujours utilisé, sous des formes variables, pour confronter les constats, faire l'analyse des besoins et discuter des stratégies. Ces groupes alimentent ensuite les réflexions des instances de décision, ce qui, au final, peut se traduire dans la réglementation (décrets, circulaires), voire la loi (celles de 1992, de 2006), ou même le niveau européen : la co-construction de la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne de 2000 sur l'eau (DCE) et de ses suites jusqu'à aujourd'hui.

Autocollant de l'AERM (vers 1975)

Autocollant des Agences de l'Eau, dessin de Trez (1975)



A la découverte des eaux souterraines, AELB



«Nappes profondes», *Cahier géographique* du Comité de Bassin Adour-Garonne. *AEAG, 1996*

Connaissance des milieux et des usages

Dès les premières années, les Agences se sont fortement impliquées dans des actions qui se poursuivent encore aujourd'hui, en matière de description et codification des milieux et des usages.

Référentiel hydrogéologique

Après la mise en place à partir de 1968 de la codification hydrographique pour décrire les bassins versants des

cours d'eau, la plupart des Agences de l'eau ont également impulsé ou réalisé elles-mêmes le découpage hydrogéologique de leur territoire, en affinant à des échelles plus détaillées la cartographie initiale publiée au 1/1 000 000 par J. Margat en 1976, puis 1979.

La consolidation de tous ces découpages par le BRGM a abouti au premier référentiel BD RHF version 1 (1997). Les Agences ont de nouveau été très actives dans la conception du projet d'une version 2 (BD LISA) et de sa méthodologie de découpage, puis dans le financement et le suivi de sa réalisation par le BRGM ou la participation, pour certaines agences, au découpage ou à l'animation de la consultation des hydrogéologues locaux (bureaux d'études, services publics). La publication de BD LISA est effective en 2012.

Avec la mise en œuvre de la DCE s'est imposée la délimitation du territoire en " masses d'eau souterraine ". En s'appuyant sur BD RHF V1 et le travail en cours sur BD LISA, les Agences ont été les chevilles ouvrières de l'élaboration du référentiel des masses d'eau souterraine (2002-2004).

Frédéric Ténière-Buchot, Directeur de l'AESN (1992) à G., avec C. Guillemin, (BRGM) et C. Fréjacques (Académie des Sciences). *BRGM*

Connaissance des usages

Les chiffres de volumes prélevés issus des déclarations de redevances reçues par les Agences ont longtemps été la seule source d'information permettant de faire facilement des bilans des prélèvements par milieux et par grands usages en France. L'ambition de les affecter correctement à chaque système aquifère n'a jusqu'à aujourd'hui pas totalement abouti, mais ce sont encore les Agences qui seront le point central de l'alimentation de la future base de données nationale sur les prélèvements dont le chantier a démarré en 2010, s'appuyant sur les nouvelles technologies (SIG, Internet…).

L'un des freins est la codification correcte des points d'eau pour chaque organisme (BRGM, Agences, Santé), et leur localisation. Dans les années 90, les Agences ont fortement contribué, financièrement et techniquement, à l'élaboration d'un fichier commun des captages d'eau potable (ONQES, cf infra), dont le code BSS (code dans la banque du sous-sol du BRGM) était le garant. Ce travail se poursuit encore aujourd'hui avec ADES.

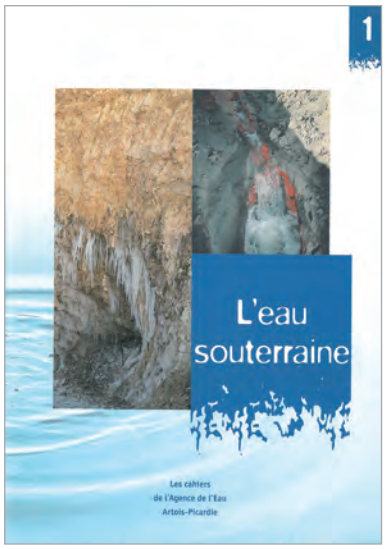
Pour les autres usages de l'eau, les agences contribuent par différentes voies à l'alimentation de la BSS, en conditionnant leurs aides : forages agricoles (LB), d'eau potable (AG)… à l'existence de ce code, ou par les redevances (pas de code = tarif le plus cher, la ressource réellement captée n'étant pas connue).

Réseaux de surveillance de l'état des eaux souterraines

De leurs débuts jusqu'aux années 90, plusieurs Agences ont créé des réseaux de mesure des eaux souterraines, sur des aquifères importants (piézométrie de l'Eocène sud aquitain en AG), ou à l'échelle du bassin : réseau qualité en RM & C, LB, SN (Aquarel) ; réseau piézométrique en AP, LB, RM et RM & C. Certaines l'ont fait sous leur responsabilité directe, d'autres en aidant et parfois en suscitant par un programme de bassin les initiatives départementales ou régionales (LB, AG, RM).
Elles s'assurent du stockage informatique des données mesurées, et de l'exploitation sous forme d'une synthèse (généralement annuelle) de la qualité ou de la piézométrie et de son évolution.

« Qualité des eaux souterraines », Séminaire de l'AESN, Fontainebleau, mars 1997

Tribunes du séminaire «Qualité des eaux souterraines» Fontainebleau. *AESN*



L'eau souterraine, AEAP, 1999

Les enjeux de l'eau souterraine, Revue de l'AEAG, 2010

Surveillance et entretien des captages d'eau potable, AESN, 1989

Dans les années 90, les Agences ont largement contribué, financièrement et techniquement, à un projet de banque nationale de la qualité (ONQES), qui devait s'appuyer sur les données mesurées pour la surveillance des captages d'eau potable, en plus des réseaux existants.

En 1997, sur les recommandations du Conseil Général des Mines (gestion durable des eaux souterraines, " rapport Martin " et avis de février 1996), le Ministère de l'Environnement a demandé aux Agences de l'Eau d'assurer la responsabilité générale et le financement du «réseau national de connaissance des eaux souterraines».
Toutes les Agences, même celles qui n'avaient jusque là pas de réseau de bassin, se sont fortement mobilisées, un poste à plein temps au minimum étant consacré à ce sujet.
La banque nationale ADES opérée par le BRGM a été créée au même moment, prenant avec succès la suite du projet ONQES, jamais vraiment opérationnel.

Les choses ont de nouveau évolué avec le transfert de la responsabilité du suivi quantitatif à l'Etat, avec une coordination ONEMA, BRGM et DREAL. Les agences conservent la responsabilité du suivi de la qualité, et peuvent être également amenées à financer certains points de suivi quantitatif sous maîtrise d'ouvrage de tiers. Elles contribuent à l'animation du réseau de producteurs de leur territoire pour alimenter ADES.

Enfin, la mise en œuvre de la DCE, qui conduit à une modification substantielle des réseaux de suivi quantitatifs et qualitatifs, implique de nouveau fortement les Agences pour la définition des réseaux, la recherche, voire la création de nouveaux points de surveillance.

À ces suivis classiques s'ajoutent ceux des phénomènes originaux tels que l'évolution de la qualité des eaux de mine ennoyée ou la réduction des nitrates et sulfates lors d'un passage de nappe en régime captif (RM).

Synthèses hydrogéologiques

Dans la plupart des bassins, des synthèses hydrogéologiques par territoire ont vu le jour à différentes échelles et sous des formes diverses, faisant le pendant des monographies hydrologiques des grands bassins versants : synthèses hydrogéologiques régionales, consultables à l'époque par minitel, avec quantification de la ressource et de la qualité pour chaque système aquifère ou domaine hydrogéologique (RMC), ensuite imitées en AG avec la synthèse Midi-Pyrénées, en classeur et sur Macintosh (avec navigation par liens hypertexte préfigurant la navigation Internet), ou départementales (AG), atlas hydrogéologiques et synthèses (RM & C, RM,SN), projets SILURES (LB, AG). Les nouvelles technologies informatiques ont contribué à l'amélioration de ces documents

hydrogéologiques de référence, notamment à travers les outils cartographiques SIG et bases de données liées permettant une consultation et un partage de l'information plus aisés, notamment via Internet.

Études

À côté de ces descriptions systématiques par territoire, les Agences se sont lancées, dès les premières années de leur existence, dans des synthèses de certains aquifères à enjeu, et lorsque les connaissances disponibles étaient insuffisantes, dans des études et des travaux, parfois au sein de grands programmes. Elles accompagnent toujours aujourd'hui ces démarches, même si la maîtrise d'ouvrage en est plus fréquemment assurée par des structures locales, collectivités, structures porteuses de SAGE, contrats de nappe… On peut ainsi citer :

- la définition de la géométrie d'aquifères profonds à partir des forages d'exploration et des données géophysiques pétrolières dans le Bassin aquitain (AG),

- des cartographies piézométriques à l'échelle des aquifères dans tous les bassins, avec parfois auparavant la création de piézomètres (récupération de forages pétroliers : AG),

- la caractérisation des ressources et du fonctionnement des grands aquifères,

- la détermination des causes de l'apparition du fer et du manganèse dans les nappes alluviales (RM&C),

- la protection et l'exploitation du karst (AG, RM&C) avec des aspects parfois spécifiques, comme la prévention des engouffrements dans les bétoires pour lutter contre la turbidité, en Normandie (SN),

- de nombreuses études sur le phénomène des remontées de nappes afin d'en comprendre les causes et le fonctionnement, finalement liés à l'arrêt des pompages industriels (SN),

- l'aquifère du Bajocien-Bathonien de la plaine de Caen et du Bessin, de nombreuses études visant à sa compréhension et à sa protection qualitative et qualitative (SN),

- des études sur la caractérisation des fonds géochimiques (LB, AG),

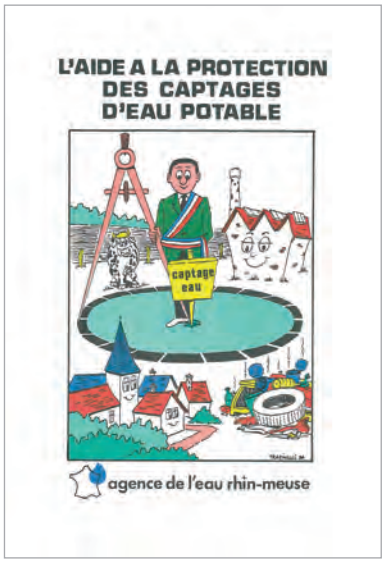
- des thèmes abordés plus récemment, comme le transfert des pesticides, la contamination par les polluants émergents de type résidus médicamenteux, ou encore les relations entres zones humides, cours d'eau et aquifères (RM&C) ; l'évaluation des volumes maximaux prélevables dans les bassins versants et aquifères en déficit quantitatif.

Modélisation

Il est nécessaire de mentionner à part les études comportant des modèles. Tous les modèles hydrodynamiques des grands aquifères de France métropolitaine ont été élaborés avec le soutien technique (au minimum pour les données de prélèvements) et financier des Agences, et souvent elles en ont été les initiatrices, parfois les maîtres d'ouvrage. Il est à noter que les conflits d'usage ou la mise en péril qualitative ou quantitative des aquifères ont souvent été le moteur de la programmation de ces études. On peut ainsi citer :

- les études de la nappe de la craie dans la Haute Lys (faisabilité d'un soutien d'étiage de la rivière en pompant dans la nappe aux sources de la Lys, pour alimenter l'usine de potabilisation d'eau d'Aire-sur-la-Lys) qui ont permis l'évolution des modèles de nappe, les premières études de relation nappe-rivière, les modèles pluie-débit (AP),

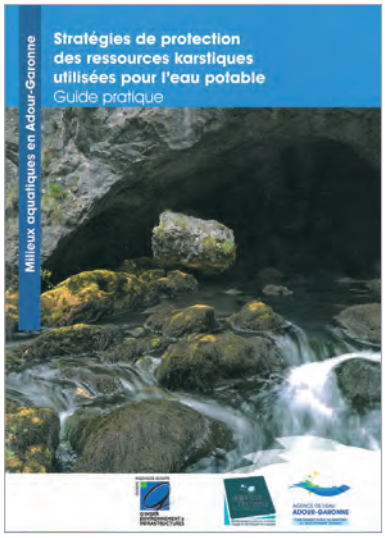
- des études et modèles sur les alluvions de la Seine dans la plaine de la Bassée, avec un intérêt particulier pour les milieux aquatiques et terrestres liés à l'aquifère (SN),



- la modélisation de plusieurs grands aquifères : Beauce : adaptation des prélèvements au fonctionnement de l'aquifère (LB et SN), Cénomanien, Jurassique du Poitou-Charente (LB), nappe d'Alsace et grès du Trias inférieur de Lorraine (RM).

- l'aquifère du Champigny (SN),

- le programme de Recherche PIREN-Seine, qui s'est traduit particulièrement par de la modélisation d'aquifères à grande échelle, couplant trois modèles : de pression azotée (STICS), de transfert de surface (infiltration et ruissellement vers les cours d'eau - NEWSAM) et souterrain vers les eaux souterraines (MODCOU). Le volet eaux souterraines est piloté par un laboratoire de l'Ecole des Mines de Paris (SN),



Protection des ressources en milieu karstique, AEAG/AERM&C, 2011

Laurent Cadihac AERM&C (à G.) et Pierre Marchet AEAG. *J.-C. Roux, 2011*

- la gestion de l'Albien-Néocomien captif, en réserve ultime d'eau potable pour la région parisienne, avec la réalisation d'un modèle hydrodynamique, la protection de la ressource à travers le diagnostic des ouvrages existants ainsi que des règles d'exploitation se superposant au classement en zone de répartition des eaux (SN),

- les grands modèles de nappes captives élaborés dans le Bassin aquitain, depuis le tout premier dans les années 70 (Ecole des Mines de Paris), jusqu'aux différents modèles construits à partir des années 1990 puis 2000 par le BRGM d'une part, l'université de Bordeaux d'autre part (AG),

- de nombreux modèles de nappes alluviales (AG).

Évolution des techniques, des outils et des pratiques

Pour la protection et la mise en valeur des eaux souterraines, mais aussi pour garantir la longévité des investissements auxquels elles avaient contribué, les agences ont fortement participé à l'évolution dans ces domaines, certaines de ces " innovations " étant devenues courantes depuis, voire obligatoires. On peut ainsi citer :

- la recharge artificielle de nappe libre (AG, AP, RM), l'étude et la mise en œuvre d'une recharge de nappes captives et de sub-surface par injection dans des forages (AG),

- essais en vraie grandeur de surexploitation saisonnière de la nappe de la Craie en vue du soutien d'étiage de la Lys (AP),

- des consignes de conception et d'exploitation des forages pour les maîtres d'ouvrage, qui conditionnent leur longévité et la qualité de l'eau extraite : crépines et massif de gravier, cimentation par circulation inverse, démarrage progressif des pompes… (AG),

- le financement des compteurs volumétriques sur les forages d'irrigation pour faciliter la gestion des aquifères (AG, LB, SN, RM&C, RM)).

Et un certain nombre d'études méthodologiques réalisées dans un cadre particulier, " l'inter-Agences " où les 6 agences cofinançaient, l'une d'elles assurant la maîtrise d'ouvrage. Notamment :

- système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines SEQ EAU sout, sur l'impulsion de RM&C,
- guide inter-agences n° 36 " Décontamination des nappes " ; état de l'art,
- charte de qualité des forages d'eau,
- guide technique d'identification des fonds géochimiques,

- logiciel d'exploitation des données de suivi piézométriques PIEZEAU (LB),
- guide pratique pour le contrôle et l'entretien des captages d'eau potable.

Depuis 2006, c'est l'ONEMA qui est chargé de ces études méthodologiques à portée nationale, et les Agences participent avec les autres établissements publics concernés à la définition et au suivi du programme.

Conservation et diffusion des connaissances

À leurs débuts, à l'époque de l'informatique naissante, les agences ont été pionnières avec les banques de bassin, en stockant et mettant gratuitement à disposition l'information collectée (qualité, piézométrie, volumes prélevés…) et en permettant de les utiliser dans les modèles, les synthèses...

L'évolution des techniques et Internet ont modifié le paysage, mais les agences sont toujours impliquées dans les nouvelles banques de bassin (dont elles sont en général opérateur), et de nombreuses banques et sites dédiés aux eaux souterraines : BRAR (RM), les SIGES…

Elles ont également eu depuis l'origine un rôle majeur dans la diffusion des rapports d'études, avec leurs services documentaires très fréquentés par les bureaux d'étude et les étudiants (le portail national documentaire sur l'eau, sur Internet, prend aujourd'hui la suite).

Gestion collective de la ressource

Cette notion est au cœur du " métier " des agences, dont les conseils d'administration ont une composition identique aux comités de bassin, avec des représentants des usagers, des élus et de l'administration.

À des échelles plus locales, elles ont toujours été très impliquées dans des démarches similaires, notamment les contrats de nappe : aquifère du Champigny (SN), nappe d'Alsace (RM), nappe de l'Astien de la Vistrenque (RM&C) de Dijon Sud et de l'Arlier (RM&C), des protocoles de gestion de nappes, ou ce qu'on nomme aujourd'hui les Etablissements Publics Territoriaux de Bassin (EPTB).

La loi de 1992 a créé la notion de SAGE, et les agences sont membres de leurs commissions locales de l'eau, financent l'animation des démarches, les études… Un certain nombre de ces SAGE concernent fortement, voire exclusivement, des problématiques d'eau souterraine : Nappes profondes de Gironde (AG), Pliocène du Roussillon, Astien, Vistrenque, Est lyonnais, Beauce (LB et SN) (RM&C).

Prévention des pollutions d'origine agricole.
AERM, 1987

Prévention des pollutions d'origine agricole : opération FERTI MIEUX.
S. Ramon, 2001

Pollution industrielle : auto-surveillance des nappes.
AERM

Protection des captages

La loi sur l'eau de 1964 a rendu obligatoire les périmètres de protection des nouveaux captages d'eau potable et celle de 1992, également des captages anciens. Dès leurs débuts, les Agences ont donc fortement contribué à leur établissement, et continuent encore aujourd'hui :

- en apportant des aides, à des taux élevés, aux études préalables, aux frais liés à la procédure, aux travaux de mise en conformité,

- en conditionnant le versement de ces aides à l'aboutissement de la procédure,

- en incitant à des démarches groupées, permettant de créer une " masse critique " pouvant faciliter le fait de dédier à cette tâche une personne ou une équipe, ou de passer un marché de prestations,

- en communiquant par de nombreux supports pour faire connaître le sujet par les élus responsables des captages, par les services en charge du conseil, du suivi de la procédure, des travaux…

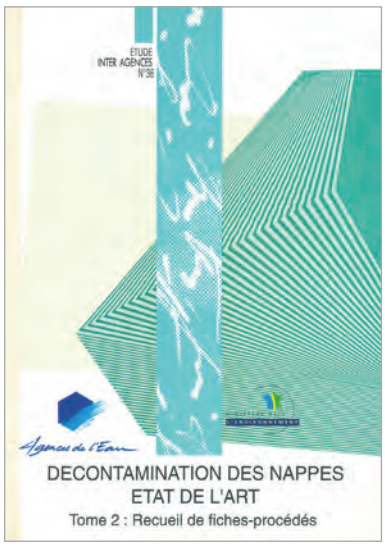
Avec la montée lente et incontrôlable de la pollution diffuse (nitrates et produits phytosanitaires), les agences ont contribué à la prise de conscience de l'inefficacité des périmètres de protection à cet égard, car elles étaient particulièrement concernées en tant que financeurs.

Elles ont été très présentes dans les premières opérations à l'échelle des aires d'alimentation : notamment études BAC en SN dès 1990, agence qui a participé activement à l'élaboration du guide méthodologique de définition des Aires d'Alimentation de Captage (AAC ou Bassin d'Alimentation de Captage) et la cartographie de leur vulnérabilité aux pollutions diffuses, réalisé par le BRGM. Plusieurs captages ont fait l'objet de mesures agricoles aboutissant à la récupération d'une bonne qualité de l'eau captée, notamment à Auxerre (SN) et Metz (RM).

On citera également l'implication d'AG et SN pour les tests de développement de la méthode de cartographie spécifique au karst : PaPRIKa (guide ONEMA-BRGM).

Lutte contre les pollutions de nappes

Des opérations d'ampleur exceptionnelle ont été entreprises, comme la suppression des terrils des mines de potasse d'Alsace (à l'origine de 130 km^2 de nappe inutilisables) par dissolution *in situ* et couverture des 7 millions de tonnes de sel qui s'y trouvaient : opération de près de 40 millions d'euros réalisée de 1989 à 2009 (RM).



Décontamination des nappes, état de l'Art (Etude interagences n° 36, 1994)

Dissolution d'un terril des MDPA par aspersion. *S. Ramon*

En matière de risque présenté par les installations industrielles, les premiers piézomètres d'auto-surveillance de nappe ont été mis en place au début des années 1980, par incitation financière systématique, ou dans le cas de contrats globaux d'économie d'eau industrielle ou d'épuration de rejets. Ces installations d'alerte préventives sont devenues obligatoires dans les années 2000.

Il faut aussi mentionner des opérations de diagnostics et de réhabilitations ou comblement de forages mal réalisés ou dégradés. On citera la cimentation d'une vingtaine de forages en nappe profonde des grès vosgiens devenus source de pollution après corrosion de leurs tubages dans des formations salines sus-jacentes (RM), le diagnostic et l'occultation d'une des nappes captées par 70 forages agricoles mettant deux nappes en communication, et des diagnostics pour près de 50 autres, dans l'attente de boucler le plan de financement des réhabilitations (AG).

L'Albien-Néocomien captif (SN) a également fait l'objet du recensement et analyse de risques de plus de 3 500 forages profonds dans le but de prévoir une réhabilitation, voire une conversion pour certains en piézomètres de contrôle de cette ressource protégée.

On peut enfin ouvrir la porte de l'avenir, en signalant que parfois la pollution agricole a été combattue avec succès, par exemple sur l'ensemble de la plaine d'Alsace, par encadrement technique des acteurs et financement de matériels adaptés (RM), mais qu'il reste beaucoup à faire pour reconquérir la qualité des nappes. Les agences sont de nouveau devant un challenge, avec un objectif de résultat à court terme pour les 500 captages prioritaires " Grenelle ".

Certaines ont pris la maîtrise d'ouvrage des études de délimitation des AAC (Aires d'Alimentation de Captages) et de la cartographie de la vulnérabilité (AG), et toutes sont amenées à contribuer à la définition des programmes d'action, à leur financement, à l'animation et au suivi des programmes.

Depuis 40 ans, les Agences de l'eau ont joué un rôle majeur dans le développement de l'hydrogéologie française mais de nouvelles pages vont s'écrire :

- avec l'amélioration des connaissances et des techniques qui résulteront de cet ambitieux programme : cartographie de la vulnérabilité, compréhension des relations " pression-impact ", techniques de " remédiation "…,

- mais aussi avec de nouveaux outils et supports pédagogiques pour communiquer avec l'ensemble des acteurs de l'aire d'alimentation pour leur faire comprendre les mécanismes et les enjeux.

En 2011, 15 hydrogéologues exerçaient au sein des Agences de l'eau.

Maurice Albinet, Daniel Bernard, Pascal Billault, Laurent Cadilhac, Cécile Garnier, Pierre Marchet, Michel Plaud, Serge Ramon

Les offices de l'eau dans les départements d'outre-mer

La Loi n° 2000-1207 du 13 décembre 2000 d'orientation pour l'outre-mer crée les offices de l'eau dans les départements d'outre-mer (La Réunion, Martinique, Guadeloupe et Guyane). Ce sont des établissements publics locaux à caractère administratif, rattachés au Département.

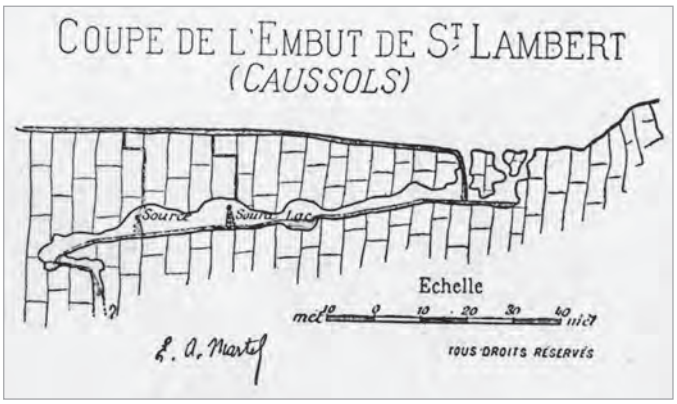
Les missions confiées aux offices de l'eau s'organisent conformément aux règles de l'Union Européenne, s'agissant plus particulièrement de la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE), qui fixe l'objectif central d'aboutir au bon état des masses d'eau continentales et côtières en 2015, selon trois grands axes :

- L'étude et le suivi des ressources en eau, des milieux aquatiques et littoraux et de leurs usages ;
- Le conseil et l'assistance technique aux maîtres d'ouvrage, la formation et l'information dans le domaine de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques ;
- La programmation et le financement d'actions et de travaux.

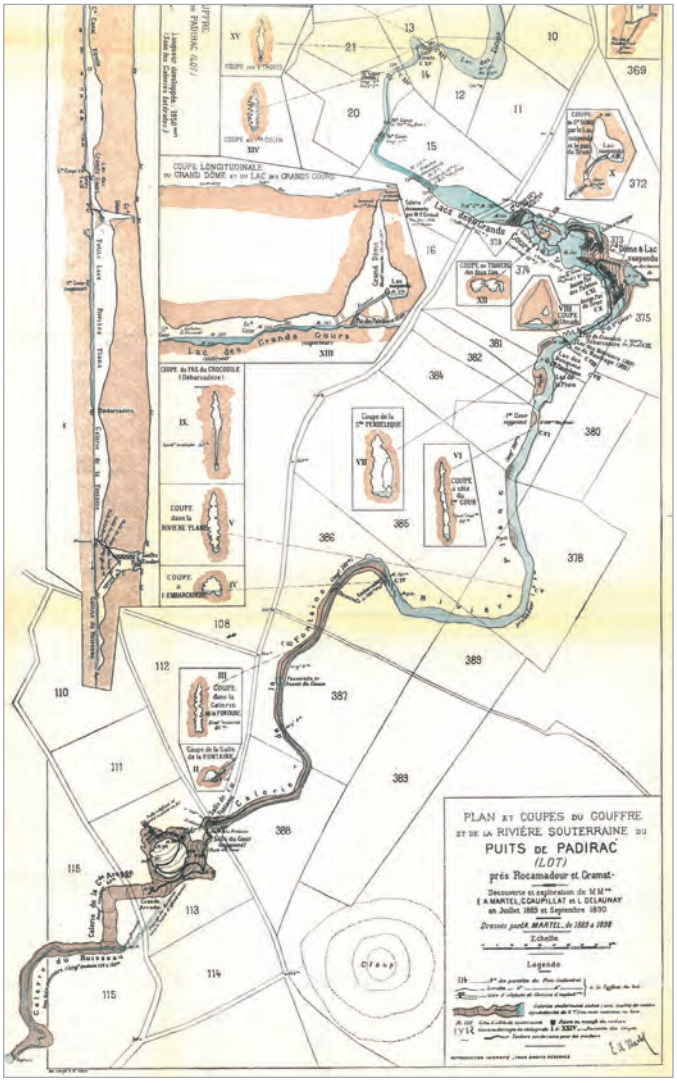
La Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques permet aux offices, au même titre que les agences de l'eau, de percevoir de nouvelles redevances, et d'asseoir un peu plus encore leur rôle de partenaire financier dans le domaine de l'eau. Par ailleurs, elle stipule qu'en outre-mer, l'Office de l'eau doit à certaines communes, et aux établissements publics de coopération intercommunale se substituant éventuellement à celles-ci, une assistance technique pour exercer leurs compétences dans le domaine de l'assainissement, de la protection de la ressource en eau, de la restauration et de l'entretien des milieux aquatiques.

Outre le rattachement au Département, le Comité de bassin représentatif de l'ensemble des acteurs de l'eau définit les orientations politiques dans le domaine de l'eau au travers du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et confie aux offices de l'eau, la programmation et le financement d'actions et de travaux, en adéquation avec l'application et le recouvrement des redevances d'usage de l'eau.

Julien BONNIER

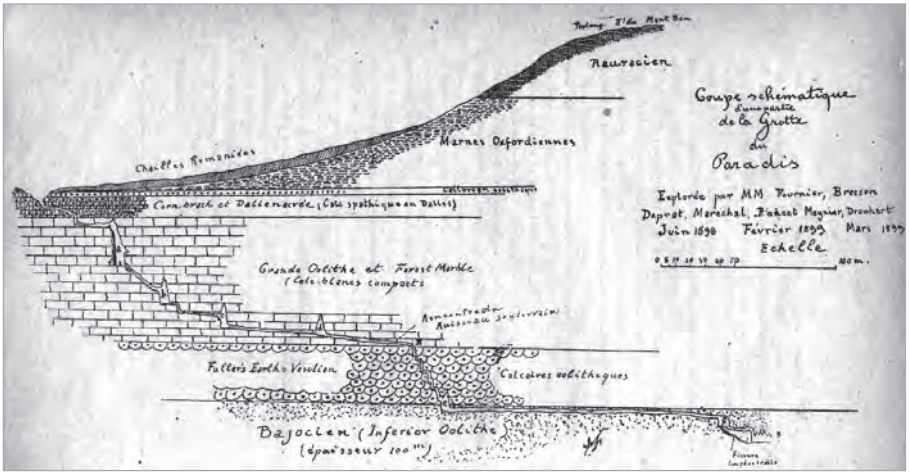


Coupe de l'Embut de Saint-Lambert (Caussols - Alpes-Maritimes) par E.A. Martel



Plan et coupes du gouffre et du puits de Padirac (Lot) relevés par E.A. Martel de 1889 à 1893

La Source du Lison (Doubs). *J.-C. Roux*



Coupe schématique de la Grotte du Paradis (Trépot -Doubs) par E. Fournier

Portraits d'hydrogéologues français notoires du XXe siècle

Édouard-Alfred MARTEL et Eugène FOURNIER précurseurs de l'hydrologie karstique

Édouard-Alfred Martel (1859-1938)

E.-A. Martel, né à Pontoise le 1er juillet 1859, est considéré comme le père de la spéléologie. Il fait la connaissance du monde souterrain lors de vacances passées avec ses parents. En 1866, il visite la grotte de Gargas dans les Pyrénées. Il consacre ses loisirs et vacances à voyager à travers la France et à l'étranger en s'intéressant aux cavités souterraines, et en 1883, il commence à s'intéresser aux plateaux des Causses tout en poursuivant ses études. Il est licencié en droit et avocat en 1886.

Les 27 et 28 juin 1888, il entreprend sa première grande expédition sous terre. Il part de la perte du ruisseau du Bonheur en suivant le cours de la rivière souterraine qui chemine dans les galeries souterraines pour arriver, en aval, à la source de Bramabiau (Gard). Le trajet souterain s'assimile à celui d'un cours d'eau de surface qui se suit de bout en bout en franchissant sept cascades successives. La simplicité apparente de ce réseau a conduit à la " théorie de la rivière souterraine " avec une perte, une circulation souterraine qui débouche sur une source, sans présence de nappe aquifère dans les calcaires. Cette vision réductrice du karst persista longtemps en France. La même année, il explore la grotte de Dargilan en bordure des gorges de la Jonte en Lozère.

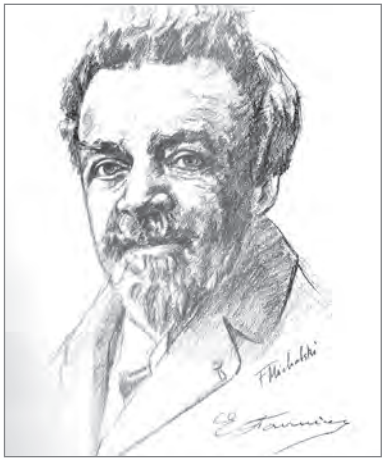
De 1888 à 1893, il poursuit ses explorations. Ce ne sont pas moins de 230 cavités qui sont répertoriées, dont le gouffre de Padirac, près de Rocamadour.

En 1895, il parcourt l'Irlande et la Grande-Bretagne et cette même année, il fonde la Société de Spéléologie et un bulletin périodique *Spelunca*.

Au cours des années suivantes il poursuit ses explorations dans les Causses, qui sont son domaine d'étude privilégié, mais il visite les autres régions calcaires françaises (Jura, Savoie, Provence, Pyrénées, mais aussi l'Europe (Autriche, Belgique, Bosnie, Dalmatie,… et passe quelques jours dans la " Mammoth Cave " dans le Kentucky.

Il publie régulièrement les résultats de ses campagnes d'exploration ainsi que des ouvrages de références dont " *Les Cévennes* " en 1890, " *Les Abîmes* " en 1894, " *La Spéléologie au XXe siècle* " en 1905, ou encore les deux beaux volumes " *La France ignorée* " (1928-1930).

Il meurt le 3 juin 1938 à Montbrison (Loire).



Eugène Fournier (1871-1941)

E. Fournier est né en 1871 à Saint-Brieuc. Licencié ès Sciences en 1894, il est collaborateur au service de la carte géologique de France et chargé du levé de la feuille au 1/80 000 de Cahors. Sa première publication a trait à " Quelques cavernes des environs de Marseille ", qu'il avait fouillées d'un point de vue préhistorique. Suivront des notes sur la structure des environs de Marseille. En

1895, il effectue un voyage au Caucase et en revient avec la matière pour préparer une thèse qu'il soutient peu après. Il est nommé chargé de cours à Besançon en 1896. Il occupera ensuite la chaire de Géologie Minéralogie, et sera Doyen de la faculté des Sciences. Il prendra sa retraite en 1935 et restera à Besançon jusqu'à sa mort. Dès son arrivée à Besançon, il part explorer les cavités franc-comtoises en compagnie du professeur de botanique Magnin. Avec ses élèves et des amateurs, il poursuivra régulièrement ses explorations systématiques dans le Jura au cours d'une vingtaine de campagnes, s'échelonnant de 1896 à la fin de sa vie, entrecoupées d'expéditions dans les Causses et les Pyrénées en compagnie de Martel. Fournier, géologue et hydrogéologue, comme le seront ses successeurs bisontins, s'aperçut vite que le débit des sources était bien supérieur à celui des pertes. Ce qui l'amène à distinguer " les résurgences ", débouchés à l'air libre des rivières souterraines qui se perdent à l'amont et " les exurgences " alimentées par des infiltrations diffuses sur l'ensemble des massifs calcaires. Cette distinction met en évidence *la double alimentation diffuse et concentrée* des aquifères karstiques.

On lui doit l'étude systématique des phénomènes karstiques et des circulations souterraines dans les calcaires publiés dans une série d'ouvrages maintenant rarissimes dont " *Les Gouffres* ", " *Les Grottes* ", " *Les eaux souterraines* ".

Maladies, épidémies et première loi sur l'eau

Les premières explorations souterraines vont avoir un impact très important sur la protection des eaux souterraines. Fournier et Martel en sont les initiateurs. À Besançon, de grandes épidémies de typhoïdes se succèdent à un rythme soutenu, presque tous les ans, entre 1842 et 1903. On incrimine la source d'Arcier. Cette source captée à l'époque romaine sort, en amont de la ville, dans la vallée du Doubs, au pied du premier plateau et alimente la ville par un aqueduc long d'une dizaine de kilomètres. On injecte du sel puis de la fluorescéine dans le ruisseau qui se perd à Nancray, un village du plateau situé au Sud-Est de Besançon. Le sel et le colorant se retrouvent à la source d'Arcier. D'autres colorations sont effectuées par Jeannot, responsable du Service des eaux de la ville de Besançon, elles montrent des communications entre les pertes de ruisseaux du plateau et la source karstique d'Arcier. Fournier soutient avec force l'idée d'une contamination par les villages du plateau.

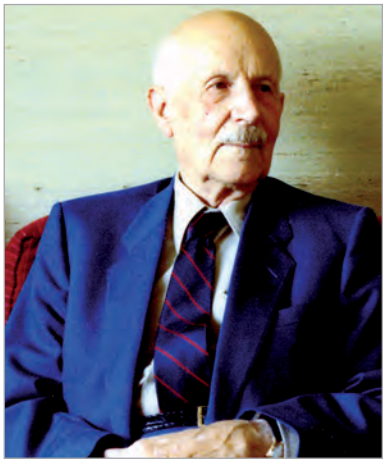
Or, à cette époque, le percement du tunnel de la voie ferrée entre Morre et Saône permet, en 1889, d'amener les eaux des sources d'Aglans (au Sud de Besançon) dans la ville. Ces sources sont issues d'un grand impluvium forestier établi sur substratum marno-calcaire de l'Oxfordien. On s'aperçoit alors que les épidémies de typhoïde n'affectent pas les habitants alimentés par la source d'Aglans. Une polémique s'installe alors au prétexte qu'en basses eaux, l'eau d'Arcier est limpide et sans bactéries mais Fournier soutient que la contamination ne s'effectue pas dans les canalisations, mais en raison des rejets de bêtes crevées et autres immondices par les villageois des sept villages du bassin d'alimentation de la source d'Arcier. Fournier interpelle les pouvoirs publics pour faire abandonner les sources " vauclusiennes " pour l'alimentation des villes.

L'implication de Martel contre la pollution des gouffres résulte d'une sévère intoxication hydrique. En effet, le 14 juillet 1891, il est fortement intoxiqué après avoir bu de l'eau à la source de Graudenc, près de Cahors, située à 250 mètres au Sud à vol d'oiseau du gouffre de Laberrie, où se trouvait un cadavre de veau en décomposition. Ceci l'avait incité, en 1897, à réaliser une coloration pour démontrer la communication entre un gouffre situé sous des écuries du village de la Sauve et la source d'eau potable du village - " les habitants buvaient l'eau de leurs propres égouts " - cela expliquait les fréquentes épidémies de typhoïde et de choléra.

L'action de Fournier et Martel est couronnée de succès car, à la loi sur la protection de la santé publique du 15 février 1902, est ajouté l'article 28 " *Quiconque, par négligence ou incurie, dégradera des ouvrages publics ou communaux destinés à recevoir ou à conduire des eaux d'alimentation ; quiconque, par négligence ou incurie, laissera introduire des matières excrémentielles, ou toute autre matière susceptible de nuire à la salubrité, dans l'eau des sources, des fontaines, des puits, citernes, conduites, aqueducs, réservoirs d'eau servant à l'alimentation publique, sera puni des peines portées aux articles 479 et 480 du Code pénal. Est interdit, sous les mêmes peines, l'abandon de cadavres d'animaux, de débris de boucherie, fumier, matières fécales et, en général, de résidus animaux putrescibles dans les failles, gouffres, bétoires ou excavations de toute nature autres que les fosses nécessaires au fonctionnement d'établissements classés. Tout acte volontaire de même nature sera puni des peines portées à l'article 257 du Code pénal.* "

Pierre CHAUVE

Henri SCHOELLER 1899 –1988



La géologie fut une réelle passion pour Henri Schoeller tout au long de sa vie. Enfant, il veut connaître le passé de la terre, cherche des fossiles, étudie la stratigraphie des environs de Paris. Ses études universitaires renforcent cette passion. Henri Schoeller travaille alors sous la direction du Professeur Émile HAUG. Ses premières publications ont trait à la stratigraphie et à la tectonique du Bassin parisien, les suivantes, prépondérantes, concernent les Alpes françaises.

En 1929, Henri Schoeller soutient brillamment une thèse de Doctorat ès Sciences sur " La nappe de l'Embrunais au Nord de l'Isère ". Le mémoire, publié dans le Bulletin des services de la carte géologique de la France fait d'Henri Schoeller, un géologue reconnu et apprécié. Le Professeur Émile Haug avait prévu une place d'Assistant pour son élève, mais sa mort subite bouleverse les projets de carrière universitaire d'Henri Schoeller qui doit s'orienter vers une autre vie professionnelle. Ce contretemps fut décisif dans l'orientation scientifique d'Henri Schoeller et l'amène à devenir un hydrogéologue de renommée internationale.

Après un séjour d'un an à l'Université de Göttingen, où le Professeur Ambronn enseignait une géophysique moderne, Henri Schoeller, engagé par la Société Géophysique des Recherches Minières, est chargé de recherches géologiques en Tunisie. Pour résoudre les problèmes rencontrés dans l'établissement de l'inventaire des ressources hydrauliques en Tunisie, Henri Schoeller conçoit de nouvelles méthodes hydrogéologiques dont l'intérêt est reconnu par les spécialistes.

En 1937, Henri Schoeller est nommé Chef de Travaux de Géologie à la Faculté des Sciences de Bordeaux. En 1942, il quitte Bordeaux afin d'être à Alger avant le débarquement des Forces Alliées en Afrique du Nord. Au QG interallié à Alger, il établit des cartes des différents points d'eau, celles de viabilité des terrains en Tunisie. Ensuite, en tant qu'hydrogéologue de l'armée américaine, il mène des études pour la construction ou l'aménagement de champs d'aviation en Italie, en Yougoslavie et en France. Il revient à Bordeaux le 4 octobre 1944. Désormais Henri Schoeller poursuivra toute sa carrière universitaire à la Faculté des Sciences de Bordeaux. Il y sera Maître de Conférences puis Professeur. En 1969, il devient Professeur honoraire.

Extrait de la préface de « Les eaux souterraines »

Les seules connaissances géologiques sont insuffisantes. Le géologue pour devenir hydrogéologue, a besoin de connaissances mathématiques, de physique, de chimie. Sinon, il ne peut ni expliquer les phénomènes, ni diriger efficacement les recherches, ni trouver des remèdes à l'épuisement possible des eaux souterraines. Par contre, l'ingénieur, lui, mathématicien et physicien, ne peut faire d'hydrogéologie sans une connaissance intelligente de la géologie.
Cet ouvrage a été écrit dans l'intention d'aider les uns et les autres et peut-être de susciter des vocations.

Henri Schoeller

H. Shoeller avec ses élèves du DEA1968 (allemands, argentins, belges, français, iraniens, soudanais). *J.P. Vachez*

Grâce à son enthousiasme, à sa vaste culture scientifique, Henri Schoeller a su susciter de nombreuses vocations parmi ses étudiants. Ses cours traitent de différents domaines de la géologie " classique " : évolution au cours des ères géologiques, paléontologie… Une partie de son enseignement est également destinée aux étudiants désireux de se présenter au concours d'entrée à l'École Nationale du Pétrole : des cours théoriques sont complétés par des stages sur le terrain. D'ailleurs, Henri Schoeller enseigna pendant plus de 20 ans l'hydrogéologie et la géochimie des eaux souterraines à l'École Nationale du Pétrole. En 1956, il crée un enseignement spécialisé d'hydrogéologie à la Faculté des Sciences de Bordeaux. Dans son enseignement théorique et pratique, il introduit des notions quantitatives par un appel constant aux sciences exactes.

1958 est marquée par la création du " Centre d'Hydrogéologie ", dirigé par Henri Schoeller. Ce centre connaît

Mme Racaud-Schoeller et M. Dean Lewis devant la plaque commémorative d'Henri Schoeller (30 mai 2013)

Henri

SCHOELLER

1899 - 1988

Géologue

Le Professeur Henri Schoeller créa à la faculté des sciences de Bordeaux en 1958 le centre d'hydrogéologie, qu'il dirigea jusqu'en 1969. Le 30 mai 2013, pour le 25ème anniversaire de sa disparition, le Comité Français d'Hydrogéologie et l'Université de Bordeaux lui ont rendu hommage pour sa contribution au rayonnement international de l'hydrogéologie française.

Citation sur la plaque commémorative

d'emblée un vif succès. À l'équipe permanente d'enseignants et chercheurs, s'adjoignent, pour des périodes plus ou moins longues, des étudiants, des ingénieurs français et étrangers venant d'Allemagne, Belgique, Grèce, Tunisie, Turquie, URSS… De 1958 à 1969, 80 thèses importantes de 3e cycle, d'Ingénieur ou de Doctorat d'État, y furent soutenues. Aussi le Centre d'Hydrogéologie jouit-il en France et à l'Étranger, d'une réputation exceptionnelle.

Malgré ses lourdes charges d'enseignement, Henri Schoeller a eu lui-même une grande activité de chercheur poursuivie jusqu'à la fin de sa vie. Parmi des nombreuses publications, la majorité traite d'hydrogéologie et de géochimie, mais d'autres témoignent de l'intérêt qu'Henri Schoeller a toujours gardé pour la géologie " traditionnelle ". Il est l'auteur d'ouvrages importants, novateurs, remarquables par la rigueur, l'esprit synthétique : " La température des eaux souterraines " en 1949, " La géochimie des eaux souterraines " en 1955, " Les eaux souterraines " en 1962.

H. Schoeller a été le pionnier en France des travaux sur les carbonates. En 1962, il devient le spécialiste incontournable pour la « crise de Lascaux ». Dans les années 70, il est nommé Président de la Commission Scientifique de la grotte de Niaux.

Géologue exceptionnel, d'une culture très vaste en bien des domaines, Henri Schoeller, tout en étant conscient de l'importance des applications de l'hydrogéologie, a toujours donné, dans ses recherches et ses enseignements, la priorité aux aspects fondamentaux de cette science.

Exigeant avec lui-même et avec ses élèves, Henri Schoeller était un " patron " profondément humain. L'organisation, par ses collègues et collaborateurs de l'Université de Bordeaux, du premier Congrès National d'Hydrogéologie, intitulé " Journées H. Schoeller " en 1969, montre l'estime que tous avaient pour ce savant.

Henri Schoeller est lauréat de l'Institut et de la Société Géologique de France, Chevalier de l'Ordre National du Mérite, Officier du Nicham Iftikar, Emblem of Civilian Service des Etats-Unis, membre de l'AIH, de l'AISH. La Société Allemande de Géologie lui décerne en 1979, la médaille Léopold Buch.

Le 30 mai 2013, à l'occasion du 25e anniversaire de sa disparition, le Comité Français d'Hydrogéologie et l'Université de Bordeaux lui ont rendu hommage en inaugurant une plaque commémorative, en présence de M. Dean Lewis, Président de l'Université Bordeaux I et de Mme J. Racaud-Schoeller, sa fille.

Madame Jeannette RACAUD-SCHOELLER
Pierre POUCHAN

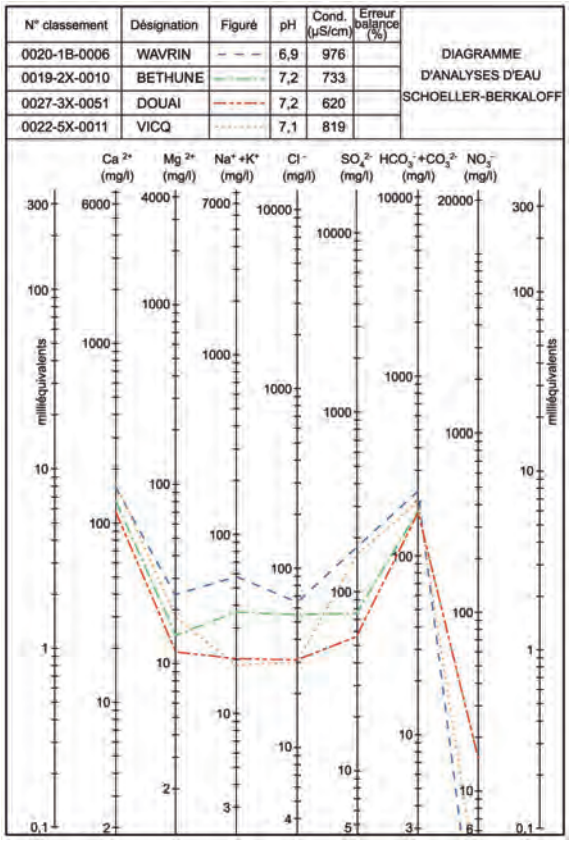


Diagramme Schoeller-Berkaloff

H. Shoeller, à l'occasion de son jubilé, avril 1969.
A G., un invité étranger et à Dr., L. Praviel (Univ. Bordeaux), P. Pouchan (Univ. Bordeaux) et M. Aigrot (Univ. Bordeaux)

H. Shoeller à la grotte de Niaux(1979). *M.Bakalowicz*

Puits dans l'oasis de Biskra (Algérie). *Ph. Maget, 1965*

Oasis de Gabès (Tunisie). *Ph. Maget, 1981*

Oasis du Rteb (Maroc). *J.-C. Roux, 2012*

Jean ARCHAMBAULT 1911-1994

Enraciné dans son pays natal le Val de Loire, jardin de la France, non loin de l'abbaye romane de Saint-Benoît-sur-Loire, Jean Archambault, à la fois scientifique et naturaliste véritable, fut un remarquable précurseur de cette science naissante en France à l'époque, devenue l'hydrogéologie.

Diplômé en 1932 de l'Ecole du Pétrole de Strasbourg, il entre en 1934, à 22 ans, au Service des Mines de la France d'Outre-Mer, pour pratiquer la géologie de terrain en Côte-d'Ivoire ; en 1936, il cherche du pétrole à Madagascar, et au printemps 1937, il poursuit sa carrière en Tunisie, au Syndicat de Recherches Pétrolières.

Sous la houlette de Marcel Gosselin, il rejoint en 1940, au sein de la Direction des Travaux Publics de Tunisie, la brillante équipe d'ingénieurs civils, de géologues et d'hydrauliciens précurseurs dont faisaient partie Eugène Berkaloff et Henri Schoeller.

Rapidement chargé de responsabilités au sein de cette équipe, il est nommé en 1945, Chef du Service Géologique de Tunisie, poste auquel il appellera Gilbert Castany, à son départ en 1947, tout en publiant " *Hydrogéologie tunisienne* ", première synthèse sur ce pays. C'est au sein de ces divers services géologiques d'Afrique du Nord, en Tunisie, puis au Maroc, et en Algérie, que furent posés par " l'Ecole Française d'Afrique du Nord " les tout premiers fondements, en France, des fabuleux développements que connaît de nos jours l'hydrogéologie.

De retour en métropole en 1947, pionnier visionnaire, inspiré et courageux, il s'installe seul, comme Ingénieur-conseil dans le pavillon familial de Neuilly, en créant le premier bureau d'études privé français spécialisé en hydrogéologie. Redoutant que le terme d' " hydrogéologie ", peu usité à l'époque, ne soit mal compris, il appela son bureau " BURGÉAP ", pour " Bureau de Géologie Appliquée et d'Hydrologie Souterraine ".

Ce défricheur s'appliquera, dès lors, à implanter en France les méthodes de l'hydrogéologie moderne, à la mise au point desquelles il avait apporté une contribution essentielle pendant sa période tunisienne. À l'issue de la guerre, il se consacre à deux tâches principales :

- En France, dans le cadre de la Reconstruction, il participe à l'alimentation en eau des villes (Le Havre, Toulon, Evreux, littoral méditerranéen...), et au développement des infrastructures : aérodromes (Belfort, Évreux, Bordeaux, Nîmes, Bastia…). Dans le cadre de son activité débordante, les glissements de terrain (Vésubie, Carnoules, Sainte-Adresse…), les eaux thermales (Dax, Saint-Galmier…), tous les problèmes d'hydrogéologie pratique sont abordés et résolus par lui : un avis pertinent est donné à Jean Goguel sur le choix de la Craie pour percer le tunnel sous la Manche, un autre sur le débit d'exhaure prévisible de la basilique souterraine de Lourdes...

- En Afrique de l'Ouest, à la demande de Pierre Merlin, qui vient de lancer le Service de l'Hydraulique de l'A.O.F., il se consacre à l'identification des grandes unités aquifères, prélude à leur mise en valeur et à leur développement, (Mali, Guinée, Côte-d'Ivoire, Dahomey, Mauritanie, Togo…). S'appuyant sur la cartographie géologique menée parallèlement par le BRGGM, ce travail fondamental servira de base solide au formidable développement que connaîtra l'hydraulique villageoise au cours des années 60 à 90.

Exerçant seul, d'abord, toute son expérience acquise dans les zones semi-arides, il s'adjoint, dès 1954, un premier collaborateur, Jacques Lemoine, qui lui succèdera en 1968 à la tête du BURGÉAP, suivi en 1956 par Lucien Bourguet, puis par une cohorte de jeunes géologues qu'il forma à sa rigueur de praticien, faisant de chacun d'eux un véritable disciple, attaché avant tout, comme lui, à la précision des observations de terrain, à la pertinence des raisonnements, et à la clarté de leur exposé.

Dès 1960, il publie sous le titre : " *Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale* ", une synthèse de ses travaux et de ceux de ses collaborateurs. Le premier, il y pressent et affirme notamment, le rôle de l'évaporation dans la formation des fameuses " nappes en creux " (sans exutoire apparent), si fréquentes en Afrique : son hypothèse hardie, peu suivie au début par les universitaires, fut finalement démontrée vingt-sept ans plus tard, par des travaux fondés sur les méthodes isotopiques.

Plus de 20 ans avant l'avènement des modèles mathématiques, son esprit naturaliste, son acuité intellectuelle, et sa parfaite appréhension des ordres de grandeur, notamment des phénomènes de recharge des aquifères, lui permirent de réaliser, pour chacun des problèmes qui lui étaient posés, de véritables " modèles conceptuels " qu'il s'attachait, sans jargon, à rendre accessibles à tous.

Jean Archambault ne fut pas seulement un précurseur, un promoteur, et un maître de l'hydrogéologie moderne ; il inculqua à ses collaborateurs et disciples cet esprit de rigueur, et de service qui est la raison d'être de l'ingénieur-conseil. Il ne discourait pas sur l'éthique, elle était le fondement de sa pratique : mettre d'aplomb le problème posé, dégager la solution la plus simple et la moins coûteuse, la présenter dans un langage de clarté, tels étaient ses objectifs.

Ses rapports, qui vont droit à l'essentiel, apparaissent aujourd'hui, compte tenu des moyens de l'époque, comme des modèles de pertinence, de concision et de limpidité, et ses synthèses, telles que **"** *Hydrogéologie tunisienne* " ou " *Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale* **",** demeurent des ouvrages de référence. Par son œuvre importante, poursuivie avec foi, et prolongée par ses nombreux disciples, Jean Archambault a marqué largement l'hydrogéologie appliquée en France au XXe siècle.

Le développement, dans tous les domaines des sciences de l'environnement, du Bureau d'Etudes BURGÉAP qu'il fonda en 1947 (70 agents en 1997 lors de son cinquantenaire, 350 personnes en 2009), est le témoignage le plus marquant du rôle joué, dans le rayonnement de l'hydrogéologie en France, en Afrique et, dans le Monde, par cet homme exceptionnel.

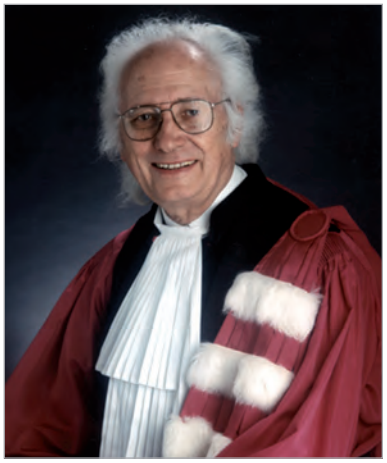
Scientifique éminent, humaniste véritable, homme de foi, Jean Archambault était aussi un homme de cœur, proche des autres : ses collaborateurs, devenus ses disciples, auront eu, avec la discrète complicité de son épouse, le sentiment de faire partie de sa nombreuse famille.

Depuis l'année 2000, un prix J. Archambault doté par le Cabinet C. Archambault et BURGÉAP, est décerné annuellement par le CFH à un hydrogéologue en début de carrière dont les travaux personnels sont particulièrement remarquables.

Jacques LEMOINE †
Lucien BOURGUET

Remise du premier Prix Archambault à Sylvie Traverse (Avignon, nov. 2000)
De G. à Dr. : C. Archambault, S. Traverse, L. Bourguet et J.-C. Roux. *J.-J. Risler*

Jacques AVIAS 1918-2003



Né avant que ne s'achève un conflit qui a si gravement affecté l'Europe, Jacques Avias eut à subir, à l'âge où tout se décide, les bouleversements engendrés par un deuxième conflit, mondial celui-là : il dût alors, par deux fois, interrompre le déroulement de ses études, d'abord en 1939 pour participer à la guerre alors qu'il préparait le concours d'entrée à l'École Normale Supérieure ; en 1943 ensuite, pour échapper aux réquisitions du Service du Travail Obligatoire en Allemagne alors qu'il venait d'intégrer le Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Lyon.

La libération de la France lui ayant permis de reprendre ses études, il est reçu brillamment à l'Agrégation, mais il n'occupera que quelques mois un poste de professeur au Lycée d'Alger, faisant alors le choix de la Géologie de terrain pour poursuivre sa carrière professionnelle. C'est ainsi qu'il part en 1946 pour une mission de lever en Nouvelle-Calédonie qui va s'étaler sur près de trois ans et qui sera suivie d'un détachement au Muséum d'Histoire Naturelle à Paris pour lui permettre d'exploiter les données recueillies en vue de la préparation d'une thèse qu'il soutiendra à Nancy en 1952.

Il a en effet été recruté, dès 1950, comme assistant à la Faculté des Sciences de cette ville où il va enseigner, tant à la Faculté qu'à l'École Nationale Supérieure de Géologie, jusqu'en 1956 : c'est durant cette période, au cours de laquelle il va effectuer de nombreuses expertises au titre de collaborateur au Service des eaux souterraines, qu'il va s'impliquer de plus en plus dans un enseignement appliqué à l'hydrogéologie.

Mais c'est à Montpellier où il accède alors à un poste de Maître de conférences - avant d'être promu moins de trois ans plus tard Professeur titulaire de la chaire de Géologie, détenue jusqu'alors par Georges Denizot - qu'il va consacrer durant trente ans (de 1956 à 1985) toute son

Médaille de J. Avias (1986) offerte par ses anciens élèves, à l'occasion de sa retraite, après 44 ans au service de l'enseignement supérieur et de la recherche, en témoignage de reconnaissance et de sympathie

J. Avias entouré d'un groupe d'étudiants et d'hydrogéologues du CFH (Montpellier, sept. 1994). *A. Caudron*

J. Avias à la source du Lez (sept. 1994). *J.-C. Roux*

énergie pour le développement de cette discipline " à part entière ". Il y a à cela plusieurs raisons : la région de Montpellier est la région de France la plus exposée aux risques de sécheresse ; elle est la plus diversifiée et la plus complexe dans la constitution de son sous-sol ; elle a toujours connu une concentration exceptionnelle d'enseignants, d'étudiants et de chercheurs. Dès lors, les voies de son action se trouvent tracées qui vont s'exercer dans ces trois domaines si complémentaires : l'eau, ses réservoirs, la formation de spécialistes.

Elles seront conduites en diverses étapes dont les principales ont été :

- 1957 : création d'un Centre d'Études et de Recherches Hydrogéologiques (et qui sera suivie peu après par la création du CERGH).

- 1958 : création d'un 3e cycle d'enseignement de spécialité en " Géologie structurale appliquée " avec option " Hydrogéologie et géologie appliquée aux travaux publics " (10 étudiants en 1958, 424 au total entre 1958 et 1985) ; il fait appel pour cet enseignement aux meilleurs spécialistes publics ou privés de leurs disciplines respectives.

- 1958 encore : création en association avec la société " Le Nickel " d'une fondation (le CERGA) pour permettre de mobiliser d'importants moyens financiers pour aider enseignants, chercheurs et étudiants de son laboratoire.

- 1959 : nommé à la Commission de l'Eau du Commissariat au Plan, il participe à la rédaction du rapport qui sera à la base de la Loi sur l'eau promulguée en 1964. Il obtient la création et l'agrément d'un laboratoire d'analyse d'eau qui réalisera en moins de 30 ans plus de 50 000 analyses complètes. Mais il restera tout au long de sa vie très affecté que la création, qu'il avait obtenue cette même année du CNRS, d'un centre montpelliérain d'études et de recherches sur les eaux souterraines (CERES) n'ait jamais pu être concrétisée…

- 1969 : il obtient la création d'une filière des sciences et techniques de l'eau (Maîtrise et Ingéniorat) avec plusieurs options : hydrogéologie, hydrologie mathématique, pollution et traitement des eaux, hydrobiologie et mariculture.

- 1979 : il est nommé Directeur de l'Unité d'Enseignement et de Recherche " Ressources Naturelles et Aménagement Régional " qui regroupe 42 laboratoires ; il dirige en outre une équipe de recherche associée créée par le CNRS (ERA 211) sur l'hydrogéologie des roches fissurées et des terrains karstiques ; il anime enfin un " Groupe de recherche sur la télédétection " qu'il a créé

J. Avias au colloque «Avenir des eaux souterraines» (Paris, avril 1992) «Il faut donner le pouvoir aux hydrogéologues !»

J. Avias avec B. Blavoux (à Dr.) au «Colloque Castany» (Paris, nov. 1993)

Remise du Prix Castany (Paris, nov. 1997)

Anciens élèves et membres du CFH aux Journées en hommage au professeur Avias (Montpellier, mai 2004). *M. Bakalowicz*

et dont il va développer l'enseignement et les applications au domaine de l'eau.

- 1981 : il crée, en association, un nouveau DEA, complémentaire de celui d'hydrogéologie, et intitulé " Sciences de l'Eau et Aménagement " comportant quatre options : " eaux souterraines ", " eaux superficielles ", " chimie-bactériologie-traitement des eaux ", " hydrologie agricole ".

Le bilan de ces trente années doit encore être complété par ces quelques chiffres :

- 800 géologues professionnels formés par Jacques Avias, et plus de 200 thèses dirigées par lui dont près des deux tiers en hydrogéologie ;

- 250 publications et plusieurs centaines de rapports et d'expertises, dont le plus grand nombre relatif à l'eau, et diverses participations à des enseignements spécialisés en ce domaine et notamment, hors de France (Tucson, Guilin, Moscou).

Il faut enfin compléter ce bilan par un rappel de quelques-unes des principales actions menées par Jacques Avias en dehors de ses tâches d'enseignant :

- sa participation très assidue aux travaux de l'AIH - dont il fut vice-président - et tout spécialement de la commission de l'hydrogéologie du karst ;

- son rôle déterminant dans la conduite de certains projets à fortes retombées économiques, tel que le captage de la source karstique du Lez pour l'alimentation en eau potable de la ville de Montpellier, la plus belle réalisation de ce type à ce jour dans le monde (l'usine des eaux du Lez porte désormais son nom depuis 2004).

- et l'accroissement des possibilités de captage des sources Perrier dans le Gard ayant permis un développement spectaculaire des exportations.

Retiré en son pays natal de l'Ardèche, il va être à l'origine de la création, en 1989, d'une Académie des Sciences, Lettres et Arts, ce département étant l'un des seuls à ne pas avoir d'Académie. Il va y consacrer beaucoup de son énergie en même temps qu'il développe avec la cité thermale de Vals-les-Bains, un projet " d'Aquascope " dont il pensait qu'il devrait être à l'échelle du " Futuroscope ". Peut-on encore espérer le voir réalisé ?

Il continue également à y promouvoir l'utilisation des eaux souterraines, " bataillant " contre un grand projet de captage d'eau de surface qu'il juge inadapté, alors que dans la vallée de l'Ardèche, le captage de la source de Vogüé, en aval d'Aubenas, aurait permis d'alimenter en eau potable une importante population.

Au total, Jacques Avias est de ceux qui n'ont jamais cessé d'agir mais dont les actions, pour ce qui le concerne, ont toujours été déterminées indépendamment de toute idéologie et de toute pression avec le seul souci de reposer sur la " Vérité " au sens scientifique du terme, et sans jamais se départir d'humanité et de générosité…

Merci, Monsieur le Professeur.

Henri PALOC

Inauguration du totem du professeur Avias à l'usine des eaux du Lez, par la ville de Montpellier et le CFH, en présence de son fils et de sa fille (à l'extrême droite). *M. Bakalowicz, mai 2004*

Les Dix Conditions de la Maîtrise des Eaux Souterraines

1. La détermination de l'**extension** et des **limites** des **systèmes aquifères unitaires**.
2. La détermination de leur **géométrie** et de leur **structure géologique**, nature des roches en jeu (lithologie) extensions, limites, déformations souples (plis) et cassantes (failles et fractures) des différentes couches ou masses de roches existantes dans le système aquifère.
3. La détermination des **caractéristiques hydrauliques** : - porosité et capacité d'emmagasinement de l'eau ; - possibilités et vitesse de circulation de l'eau (perméabilité), à travers les différentes roches et unités du système.
4. La détermination du **fonctionnement hydrodynamique** du système aquifère et en particulier : de sa ou ses zones d'alimentation (par les pluies, par les cours d'eau, etc.) ; des zones de circulation majeures en nappes libres et en nappes captives (zones et chenaux de perméabilité - drains - conduits et rivières souterraines : - influence de la température et de la gazéification notamment pour les eaux thermominérales (cycles hydrothermaux).
5. La détermination **quantitative (débits)** de **la ressource en eau utilisable**. I. Naturelle (ex. : sources non aménagées). II. Artificielle (sources ou points d'eau aménagés pour augmenter le débit de sortie (par exemple par abaissement du seuil d'exurgence, par pompage ou émulsionnage) par puits, par galeries drainantes (ex. Foggaras), par forages, et son évolution avec les saisons et avec l'intensité des prélèvements.
6. La détermination **qualitative** de la ressource en eau : - **caractéristiques physiques** (température, résistivité, limpidité, radioactivité) : - **caractéristiques chimiques** (teneur en ions majeurs (cations : calcium, magnésium, sodium, etc. et anions : carbonates, sulfates, etc.) et mineurs ; **caractéristiques géochimiques** (éléments en traces) et leur évolution éventuelle en fonction des saisons ou de l'intensité des débits prélevés ; - **caractères organoleptiques** (goût) ; - **caractéristiques médicales**, notamment dans le cas des eaux thermominérales ou gazeuses.
7. La détermination des **possibilités d'optimisation de l'exploitation de la ressource** pour l'adapter aux besoins (en **eau potable**, **eaux dites " de table " ou " de source "** et **eaux minérales gazeuses ou non**, en **eau agricole** ou **industrielle**, en eau pour la **navigation** ou pour les **loisirs**) avec étude des possibilités éventuelles de recharge artificielle de l'aquifère à partir d'eaux extérieures.
8. Cette dernière détermination étant facilitée par la **modélisation physique mathématique ou virtuelle** du système aquifère permettant de simuler à faible coût et de façon presque instantanée tous les **scénarios de recharge et d'exploitation** et donc d'optimiser la prévision et la gestion du système.
9. La détermination de **la vulnérabilité à la pollution du système aquifère et des périmètres de protection** : immédiats, rapprochés (au sens hydraulique du terme) et éloignés, nécessaires. Cette détermination nécessite également la détermination de l'**âge** et de **la vitesse de circulation des eaux** (utilisant les **mesures isotopiques**).
10. Des **observations et une surveillance prolongée**.

Les déterminations précédentes ne peuvent en effet se faire en quelques mois et nécessitent l'observation du comportement du système précédent pendant au moins un cycle annuel et ***de préférence durant plusieurs cycles annuels*** *pour pouvoir tenir compte des variations interannuelles, notamment de l'alimentation par les précipitations du système.* ***Toute étude hydrogéologique doit être programmée à court terme et à long terme*** *et une surveillance du système exploité est à prévoir tant que durera l'exploitation et même au-delà.*

L'ensemble de ces déterminations nécessite des ***spécialistes expérimentés que sont les HYDROGÉOLOGUES*** *travaillant en liaison avec des* ***géologues spécialisés*** *(stratigraphes, pétrographes, tectoniciens, sédimentologues, etc.) et des* ***géophysiciens****, des spécialistes de* ***photographies aériennes*** *et de* ***télédétection****, et dans certains cas avec des " radiesthésistes ", des entreprises de génie civil (pour les* ***travaux de reconnaissance, d'essais hydrauliques*** *(essais de pompage, d'injection, etc.) et enfin de* ***captage*** *et de* ***protection****, ce, sans compter les utilisateurs de l'eau (y compris exploitants et médecins spécialisés des eaux thermominérales).*

Vu les valeurs de l'eau et le coût des aménagements hydrauliques, les études hydrogéologiques sont très largement rentables *et leur négligence peut coûter extrêmement cher à la collectivité (financièrement : ressources inexploitées, car mésestimées ou investissements inutiles parce que ressources surestimées) et sanitairement (ex. : pollutions non décelées).*

J.-V. AVIAS 1997

Gilbert CASTANY 1920 – 1993

Franc-comtois d'origine et de formation universitaire, G. Castany a commencé sa carrière en 1945 comme géologue en Tunisie. Deux ans après, il prenait la Direction du Service Géologique de Tunisie qu'il dirigea jusqu'à son départ en 1956.

Pendant l'Occupation, il avait participé aux délimitations des terroirs d' " appellation contrôlée " vinicoles… notamment dans le Beaujolais.

Après la guerre, Chef du Service géologique à la Direction des Travaux publics de Tunisie, ses travaux portèrent principalement sur l'Atlas oriental où il réalisa plusieurs cartes géologiques à 1/50 000, puis présenta une thèse d'État en 1951. Puis il s'intéressa aux formations du Quaternaire marin.

La publication de la carte géologique de Tunisie à 1/50 000 en 1953 marquera son orientation vers les grands ensembles géologiques tels que le territoire Tunisie – Sicile et la Méditerranée occidentale.

C'est en Tunisie que G. Castany débuta progressivement sa carrière d'hydrogéologue, car le Service géologique étant consulté pour l'alimentation en eau des agglomérations urbanisées et rurales et des petits périmètres irrigués, il mit en application les études géologiques à la prospection des eaux souterraines pour développer les recherches par l'utilisation des techniques géophysiques dont il fut un précurseur.

En 1950, il mit en évidence la notion de seuil hydraulique souterrain et publia en 1951 son " Étude sur la surface libre des nappes par les cartes en courbes isopiézométriques, écoulement, alimentation et seuils hydrauliques " qui marque déjà les premiers pas de l'hydrogéologie moderne.

Enfin, en 1952, il publia " Les grands problèmes d'hydrogéologie en Tunisie ".

De retour en France en 1956, G. Castany est engagé au BRGM en qualité d'Ingénieur en chef et se voit confier la Direction du Département Géologie qui comprenait 48 personnes. Cinq ans après, en 1961, "victime de son succès", le département atteignait un effectif de 236 personnes, et il fut scindé en plusieurs unités plus petites et plus spécialisées, et G. Castany est nommé adjoint au Directeur Scientifique, puis quelques années plus tard, Directeur Scientifique.

En 1968, avec la création du Service Géologique national à Orléans dirigé par Claude Guillemin, il est nommé Directeur adjoint, et à partir de 1972 jusqu'à sa retraite, il devient conseiller permanent du BRGM pouvant ainsi se consacrer entièrement à l'hydrogéologie, science en plein développement dans laquelle il ne cessa jamais de jouer un rôle majeur.

En effet, en plus de ses fonctions hiérarchiques et scientifiques au BRGM, G. Castany a enseigné l'hydrogéologie à partir de 1958 avec la création du 3e Cycle de Géodynamique externe à l'Université de Paris-Sorbonne, puis dans de nombreux établissements d'enseignement français, tels que l'École Nationale du Génie Rural, et étrangers.

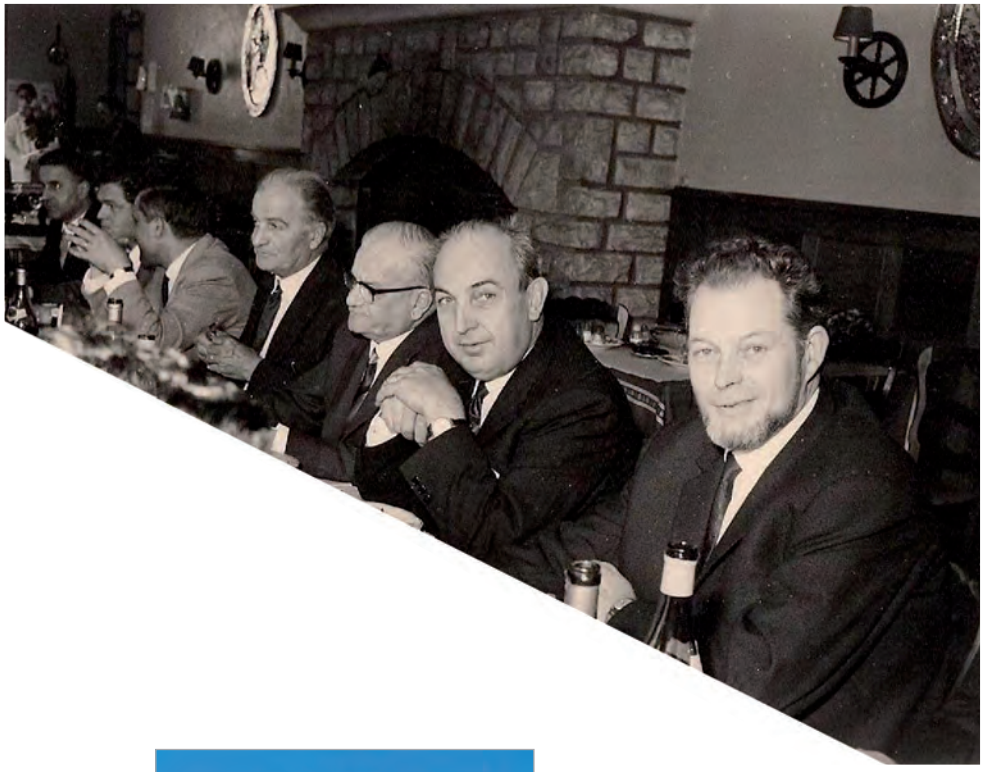
En 1963, avec la publication de son ouvrage " Traité pratique des eaux souterraines ", traduit en plusieurs langues, il acquiert une notoriété mondiale.

Durant cette carrière parallèle, il enseigna à plus de 600 étudiants et dirigea de très nombreuses thèses, mémoires et rapports, ne ménageant ni son temps ni sa peine.

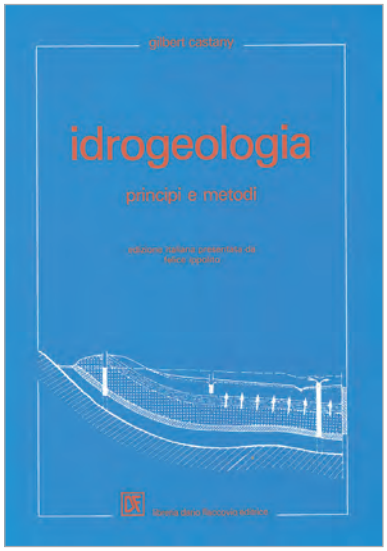
G. Castany fut également le cofondateur de l'Association Internationale des Hydrogéologues (AIH) en 1956, puis

Gilbert Castany au colloque «Hydrogéologie de la Craie (Rouen, mai 1978). *BRGM*

G. Castany et Marcel Guillaume (à G.).
Travaux du canal de la Durance.
J.-C. Roux, 1963



G. Castany, l'Isle-sur-Sorgue (Vaucluse) (1966) avec O. Horon (BRGM) à Dr. et C. Gouvernet (Univ. Marseille) à G.



Edition italienne de *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*

son Président international de 1980 à 1984, ce qui lui permit de créer un vaste réseau scientifique.

En 1973, il créait le Comité Français d'Hydrogéologie (CFH) dont il fut le Président jusqu'à sa mort.

Gilbert Castany, homme scientifique de grande valeur, courageux et tenace, accessible et affable, fut un des principaux créateurs de l'hydrogéologie du XXe siècle.

De renommée internationale, il contribua à la fois au rayonnement de l'hydrogéologie française et à la notoriété du BRGM dans le monde.

Jean-Claude ROUX

G. Castany (2e à G.) au colloque AIH de Palerme (mai 1973). *J.-C. Roux*

G. Castany (2e à G.) au Congrès AIH de Vilnius (1979). A Dr. : J. Margat, L. Dubertret et J. Khoury

G. Castany (à G.) au laboratoire de Moulis (1986) avec A. Mangin (au centre) et J. Mania (à Dr.). *M.Bakalowicz*

Le " Prix Castany "

Depuis 1996, un " Prix Castany " est décerné chaque année par le Comité Français d'Hydrogéologie. Ce prix honorifique est attribué à un hydrogéologue, français, senior, chercheur ou praticien, universitaire ou du secteur public ou privé, dont l'œuvre, les travaux et l'action ont particulièrement marqué l'hydrogéologie française, et contribué au développement et à la diffusion des connaissances de cette discipline.
Depuis sa création, les lauréats ont été successivement : J. Ricour (1996), J. Avias (1997), C. Mégnien (1998), P. Pouchan (1999), H. Moussu (2000), A. Mangin (2001), N. Crampon (2002), L. Bourguet (2003), P. Chauve (2004), J.-J. Risler (2005), M. Lepiller † (2007), J.-J. Collin (2008), B. Blavoux (2009), S. Ramon (2010), J.-C. Roux (2011), M. Bakalowicz (2012).

Colloque du CFH "L'Hydrogéologie au XXIe siècle" en hommage à G. Castany (Paris, nov. 1993) De G. à Dr. : M. Detay (Suez), J.-C. Roux (Secrétaire du CFH), J. Margat (Président du CFH), S. Ramon (AERM) et Y. Lemoine (CPGF - Horizon). *BRGM*

Source phréatique du Ried du centre de la Plaine d'Alsace,
Herbsheim (Bas-Rhin). *M. Sauter*

Louis SIMLER 1924 – 2000

Né le 25 août 1924 à Mont-sur-Meurthe (54), dans une famille alsacienne d'origine suisse, Louis Simler est licencié ès Sciences à l'issue de ses études à Nancy.

De 1949 à 1960, il est ingénieur à la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) et est responsable des activités de prospection hydrogéologique, pétrolière et minière en Allemagne, intervenant aussi en Alsace.

Il est alors chargé, en 1961, par le Professeur Georges Millot, directeur de l'Institut de Géologie de l'Université de Strasbourg, de prendre la direction du Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine (SCGAL). Ce service avait succédé en 1918 au " Geologisches Landesamt Elsass – Lothringen " créé en Allemagne en 1872, et qui était chargé du lever de la carte géologique et des études du sous-sol en Alsace et en Moselle. Ce service a alors été rattaché à l'Institut de Géologie de l'Université de Strasbourg.

La carrière de Louis Simler est intimement liée à l'histoire du SCGAL auquel il a redonné vie. Dès lors, le Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine prend un nouvel essor.

Outre sa qualité de " géologue officiel " (l'ancêtre de ce que sont aujourd'hui les hydrogéologues agréés), le SCGAL intervient dans tous les domaines du conseil en géologie et en hydrogéologie, en Alsace et dans le département de la Moselle. Il est partie prenante de la Commission Interservices pour l'Étude de la Nappe Phréatique de la Plaine d'Alsace (CIENPPA).

À partir de 1967, Louis Simler met en place l'un des premiers laboratoires de modèles, avec son équipe constituée de jeunes ingénieurs. Ce sont d'abord des modèles sur " papier conducteur ", puis des modèles analogiques électriques (" modèles RC "), basés sur l'analogie de la loi d'Ohm en électricité et de la loi de Darcy en hydrogéologie, et enfin les modèles qui font appel à l'ordinateur du centre de calcul du CNRS. Le plus gros modèle analogique, construit en 1973, pour simuler l'aquifère autour de travaux du barrage d'Iffezheim sur le Rhin, ne comporte pas moins de 120 000 résistances. En totalité, près d'une centaine de modèles différents seront mis en œuvre.

Mais l'Alsace et la Moselle semblent constituer, pour Louis Simler, un territoire beaucoup trop exigu. Dès 1967, le SCGAL intervient également à l'étranger, au Pérou, au Brésil, en Iran et en Jordanie. Au Pérou, sous l'impulsion d'Augusto Agirre Morales qui voue à Louis Simler une admiration sans bornes, un Service à l'image du SCGAL se constitue au sein du Ministère de l'Agriculture, avec son laboratoire de modèles analogiques et mathématiques.

En 1970, un accord est signé entre l'Université et le BRGM. Cette intégration sera complète en 1973.

Le 14 décembre 1979, Louis Simler obtient le grade de Docteur ès Sciences Naturelles, avec une thèse soutenue conjointement avec Albert Duprat et Jacques Valentin à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, intitulée " La nappe phréatique de la plaine du Rhin en Alsace ". Il est alors Maître-assistant.

De G. à Dr. : L. Simler, A. Cornero (Univ. de Lima) et le professeur G. Millot (soutenance de thèse, Univ. de Strabourg, 1974). *P. Vançon*

Louis Simler était vice-président du groupe de travail de la nappe phréatique rhénane du Conseil de l'Europe, rapporteur de l' " International Hydrology Program " de l'UNESCO, collaborateur du Réseau européen pour la gestion des ressources en eau, membre de la section Sciences de la Terre du CNRS, membre de la Commission Internationale pour la protection du Rhin, et membre de la Commission Interservices pour l'Étude de la Nappe Phréatique de la Plaine d'Alsace.

Louis Simler était titulaire du Mérite Agricole, du Mérite National et du Mérite de la République Fédérale d'Allemagne.

Louis Simler nous a quittés le 19 avril 2000.

Jean-Jacques RISLER
avec la collaboration de Madame Dominique SIMLER
Jean-Pierre VANÇON et Gérard GRANDAROVSKI

Captage de la source d'Armentières (Yonne). *SAGEP/Abron*

Claude MÉGNIEN 1933 – 2003

Cl. Mégnien à Villequiers, 76 (1966). A Dr. : P. Sangnier ;
à G. : P. Bassompierre, O. Horon et L. Lheureux (BRGM). *J.-C. Roux*

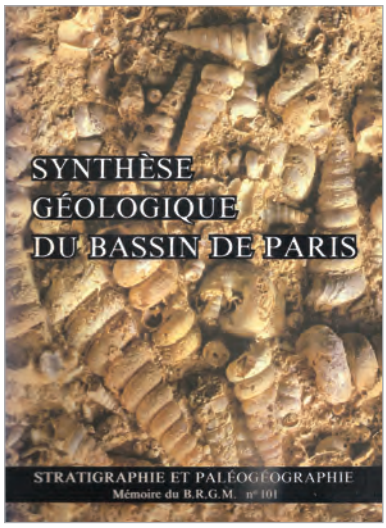
Claude Mégnien suivit des études universitaires à la Sorbonne où il obtint une Licence ès Sciences de Géologie, sous l'enseignement d'éminents géologues de l'époque, dont Pierre Pruvost, puis il fit partie de la première promotion du Laboratoire de Géologie dynamique de Louis Glangeaud, option " Hydrogéologie " et présenta en 1960 une thèse de 3e Cycle " Observations hydrogéologiques dans le Sud-Est du Bassin de Paris " sous la Direction de Gilbert Castany.

En 1953, il rentrait au BRGM et fut chargé du Laboratoire de Sédimentologie.

En 1963, il fut chargé de la création du Service Géologique Régional Bassin de Paris (Île-de-France, Centre, Champagne) basé à Brie-Comte-Robert (77), qu'il dirigea jusqu'en 1977.

Durant cette période il donna, notamment, un essor considérable à l'hydrogéologie de cette région et, parmi les nombreux travaux qu'il initia et dirigea, citons particulièrement : la reconnaissance et la mise en valeur de la nappe alluviale de la Seine en amont de Montereau, la première synthèse hydrogéologique de la nappe de Beauce, sa contribution à l'ouvrage de synthèse sur les eaux souterraines du bassin de la Seine et des cours d'eau normands, et l'Atlas des nappes aquifères de la Région parisienne. Enfin, en 1976, il obtenait le grade de Docteur ès Sciences en soutenant une thèse d'État : " Hydrogéologie du Centre du Bassin de Paris ".

Atlas des nappes aquifères de la région parisienne



Nommé en 1977 à la Direction du Service géologique national à Orléans, il assura successivement : la fonction de Sous-Directeur (1977-1980) supervisant les activités des départements des Éditions, de la Documentation de la Banque des données du Sous-Sol, de la Géologie, de la Géophysique et des Laboratoires ; de membre du Directoire (1981) ; de Président du Conseil Scientifique (1982).

De 1984 à 1987, il fut détaché au Secrétariat d'État à la Prévention des Risques Majeurs, comme Directeur adjoint, puis Conseiller Scientifique, notamment auprès d'Haroun Tazieff.

Enfin, de 1989 à 1992, il fut adjoint au directeur du Service géologique national.

Remise du Prix Castany à Cl. Mégnien (Strasbourg, nov. 1998). *J.-C. Roux*

Malgré ses nombreuses responsabilités hiérarchiques et administratives, Claude Mégnien resta toujours un scientifique de haut niveau. Il coordonna l'ouvrage collectif de référence " Synthèse géologique du Bassin de Paris " publié en 1980 à l'occasion du XXVIe Congrès Géologique International à Paris. De 1982 à 1992, il dirigea le programme " Géologie profonde de la France " avec Hubert Curien, coordonnant les travaux de forage et d'analyses, la synthèse et la publication des résultats. Il fut Président du programme international de Corrélation géologique, et de 1996-1998, bien qu'en retraite, il initia et dirigea un programme de reconnaissance stratigraphique dans la Craie de la région de Provins par forages profonds carottés (Craie 700) dont les résultats furent présentés dans un colloque à l'Académie des Sciences.

Claude Mégnien s'intéressa aussi aux actions de communication et de promotion de la géologie, notamment en créant la revue " Géochronique " en 1982, dont il fut le rédacteur en chef pendant plus de 20 ans, jusqu'à sa mort.

Il était membre de la Société Géologique de France, de l'Union Française des Géologues et du Comité Français d'Hydrogéologie (Association Internationale des Hydrogéologues) et de l'AGBP (Association des Géologues du Bassin de Paris).

Il fut également Chef de travaux à l'École du Génie Rural et chargé de cours à l'Université Pierre et Marie Curie.

Meneur d'hommes, il savait persuader et communiquer son dynamisme à ses collaborateurs, dans la bonne humeur mais aussi avec rigueur. Infatigable, Claude Mégnien ne ménageait pas ses efforts pour atteindre les objectifs qu'il s'était fixés. Il avait la passion d'entreprendre et de réussir. Il est toujours resté un homme de terrain, rappelant souvent que l'acquisition des données était primordiale et qu'aucune modélisation ne pouvait s'y substituer.

Claude Mégnien était lauréat du Prix de la Société Géologique de France, du Prix Gosselet et titulaire du Mérite agricole.

Par sa compétence scientifique incontestée, son dynamisme, sa puissance de travail, et son sens des relations humaines, Claude Mégnien fut un grand promoteur de la Géologie de la France, de l'Hydrogéologie du Bassin de Paris et des nombreuses activités du BRGM auquel il consacra toute sa carrière et toute son énergie.

Jean-Claude ROUX

Colloque CFH en hommage à Cl. Mégnien (Paris, nov. 2004)

C. Beaumont (ancien DG du BRGM) à G. et H. Curien (ancien ministre de la Recherche) au Colloque Cl. Mégnien. *J.-C. Roux*

Jean-Charles FONTES 1936 – 1994

L'histoire de Jean-Charles Fontes fait partie de l'histoire de la géochimie et de l'hydrologie isotopique. La variété des problèmes et sujets qu'il a abordés, thématiques, géographiques, sédimentologiques, hydrologiques et climatiques tant dans les conditions actuelles que dans le passé et tout spécialement le Quaternaire récent, déborde de beaucoup le seul domaine de l'hydrogéologie. Son œuvre pluridisciplinaire est celle d'un naturaliste au service de la compréhension de la nature dans toute sa complexité. Elle a néanmoins toute sa place dans l'histoire de l'hydrogéologie française car les travaux de J.-C. Fontes ont installé et consacré la géochimie isotopique comme un outil incontournable pour l'identification et la compréhension du fonctionnement des systèmes aquifères.

Jean-Charles Fontes, élève de l'École Normale Supérieure de Saint-Cloud a débuté sa carrière d'enseignant chercheur en 1961 comme jeune Assistant au Laboratoire de Géologie Dynamique du Professeur Louis Glangeaud, à la Sorbonne. Il est tout de suite détaché au Laboratoire de Géologie Nucléaire de l'Université de Pise avec, comme mission, d'apprendre les techniques de géochimie isotopique dont son patron, un des premiers en Europe à comprendre leur grand potentiel, avait décidé d'en équiper les laboratoires qu'il dirigeait. Les deux années de Pise sont décisives pour l'orientation de J.-C. Fontes car la géochimie des isotopes stables devient le centre de ses intérêts scientifiques pour le reste de sa vie.
Ses premières recherches concernent la composition isotopique et l'origine des eaux et gaz des sources thermales du Massif Central français ainsi que la détermination des facteurs de fractionnement de l'oxygène dans l'eau de cristallisation du gypse qui sera le point de départ de ses études du gypse du Bassin Parisien et d'autres sites par la suite.
À son retour d'Italie et après son service militaire dans la Marine, J.-C. Fontes est promu en 1968, Maître Assistant au Laboratoire de Géologie Dynamique, d'abord à l'Université de Paris à la Sorbonne, puis à l'Université Pierre et Marie Curie à Jussieu où la Faculté des Sciences est transférée en 1969.

Il participe avec René Létolle à la constitution d'un laboratoire de géochimie isotopique dont les isotopes stables, le carbone 14, puis le tritium, installé au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les-Bains, constituent les principaux outils.

Au sein d'une école d'hydrologie et de géochimie isotopique française qui commence à se délinéer, les intérêts de J.-C. Fontes se précisent et c'est l'application des techniques isotopiques en hydrologie et hydrogéologie qui va désormais constituer le champ principal de ses recherches et de son enseignement. Ces activités lui valent d'obtenir le Doctorat ès Sciences Naturelles de l'Université de Paris 6 avec sa thèse " Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : quelques aspects ".

Le CRG de Thonon

Durant la décennie 70, J.-C. Fontes a renforcé sa collaboration avec l'ORSTOM, ce qui lui permet de visiter de nombreux pays et d'acquérir une grande expérience des problèmes d'eau dans les pays en voie de développement. Ces recherches se développent surtout dans les zones arides où les techniques isotopiques sont particulièrement puissantes et utiles, car celles permettent, par exemple, de reconnaître les eaux rechargées dans des conditions différentes des conditions actuelles, les eaux fossiles dont l'exploitation engendre le risque d'épuisement.

En ces mêmes années, J.-C. Fontes devient une autorité reconnue dans le domaine nouveau de la limnologie isotopique. La liste des lacs étudiés s'ouvre avec le Léman et continue avec les lacs de la Saoura au Sahara, le lac Tchad, le Titicaca et les autres lacs du haut plateau bolivien, le lac Assal à Djibouti, des lacs du Tibet chinois et d'autres encore.

La buvette de la Source Versoie à Thonon-les-Bains (Haute-Savoie) vers 1900

J.-C. Fontes est nommé Professeur à l'Université d'Orsay Paris Sud en 1979. Il se consacre à la création d'un nouveau Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopiques. Il décide d'inclure parmi les activités de son équipe les recherches de paléohydrologie et paléoclimatologie dont les prémices peuvent être retrouvés dans les études des lacs et des ressources en eau de la zone aride. Leur intérêt réside non seulement dans la reconstitution des variations climatiques passées pour lesquelles il lance avec F. Gasse, le programme " Paléohydrologie d'Afrique ", mais aussi dans la prévision des conséquences des changements de climat annoncés pour le siècle qui vient. Pour ces études, la datation des eaux et des matériaux sédimentaires s'avère cruciale.

Outre ses recherches sur la datation des eaux par les radioéléments (carbone 14 et chlore 36), on lui doit d'avoir été parmi les promoteurs de l'établissement en France d'un système de détermination du carbone 14 par spectrométrie de masse couplée avec un accélérateur Tandem qui a permis d'analyser des échantillons de moins d'un mg de carbone au centre du CNRS à Gif-sur-Yvette, dès 1986.

Quand en octobre 1993, Jean-Charles Fontes fut appelé à prendre la direction de la section d'hydrologie isotopique de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique de Vienne, il était un scientifique de haute formation théorique et d'une grande expérience, allant de la géochimie à l'hydrogéologie, des systèmes de datation des eaux souterraines à la paléoclimatologie.

Hélas, en février 1994, quatre mois seulement après sa nomination, son destin devait s'achever près de Bamako au Mali au retour d'une mission de terrain quand la voiture qui le transportait sortait de route. Il était dans la plénitude de sa carrière de chercheur et on attendait encore beaucoup de lui. Ses très nombreuses publications qui témoignent de sa créativité ont été et resteront une référence pour ses élèves, ses collaborateurs et la communauté scientifique.

Bernard BLAVOUX
Avec la collaboration de Roberto GONFIANTINI

Jalons chronologiques et bibliographies

Jalons chronologiques dans l'histoire de l'hydrogéologie française

1569 - Jacques Besson publie " *L'art et science de trouver les eaux et les fontaines cachées sous terre, autrement que par les moyens vulgaires des agriculteurs et architectes* ", Gibier, à Orléans.

1580 - Bernard Palissy publie le " *Discours admirable de la nature des eaux et fontaines* ", à Paris.

1655 - Le Père Jean François, jésuite, publie " *La Science des eaux* ", à Rennes.

1674 - Pierre Perrault dresse le premier bilan d'un bassin hydrographique (haute-Seine) et publie " *De l'origine des fontaines* ", à Paris.

1686 - Le physicien Edme Mariotte calcule le bilan du bassin de la Seine à Paris " *Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides* ".

1706 - Le Comte de Marsili examine les sources littorales des calanques de Marseille, dont celle de Port-Miou. Il refait aussi l'expérience, déjà réalisée par P. Perrault, prouvant que l'eau salée ne se dessale pas par filtration, pour contrer la théorie des tenants de l'origine marine des sources…

1751 - Dans la " *Grande Encyclopédie* " dirigée par Denis Diderot et d'Alembert, un copieux article est consacré par Desmarest à " Fontaine ", sur l'origine des sources et leurs particularités.

1802 - Jean-Baptiste Lamarck crée le mot " *Hydrogéologie* " en publiant l'ouvrage sous ce titre, à Paris.

1821 - F. Garnier publie le premier traité sur l'art des forages et des puits artésiens. Ouvrage primé par la Société française pour la promotion de l'industrie nationale.

1829 - Héricart de Thury publie le premier traité sur l'explication des bassins " artésiens " et l'art des " puits forés " : " *Considérations géologiques et physiques sur la cause du jaillissement des eaux des puits forés ou fontaines artificielles* ".

1830 - Premier forage artésien à Tours (à l'aquifère du Cénomanien).

1833 - Lancement des travaux du " Puits de Grenelle " à Paris, projeté et décidé par François Arago, Maire de Paris.

1834 - François Arago publie, dans l'Annuaire 1835 du Bureau des Longitudes, l'article " *Sur les puits forés connus sous le nom de puits artésiens, de fontaines artésiennes ou de fontaines jaillissantes* ".

1840 - Premier puits artésien au Calcaire carbonifère près de Lille.

1841 - Jaillissement du Puits de Grenelle à Paris, qui a atteint la nappe des Sables verts albiens à 548 m de profondeur.

1846 - Eugène Belgrand publie la première étude sur les conditions hydrogéologiques du haut bassin de la Seine, en vue des projets d'adduction d'eau potable à Paris. " *Études hydrologiques dans les granites et les terrains jurassiques formant la zone supérieure du Bassin de la Seine* ", Paris.

1856 - L'Abbé Jean-Baptiste Paramelle, " hydroscope " réputé, publie " *L'art de découvrir les sources* ".

1856 - Henry Darcy publie le mémoire sur " *Les fontaines publiques de la ville de Dijon* " dans lequel il formule la loi à laquelle son nom sera attaché.

1857 - Jules Dupuit introduit le terme " Loi de Darcy " et publie le " *Mémoire sur le mouvement de l'eau à travers les terrains perméables* " à l'Académie des Sciences.

1857 - J. Dumas publie " *La science des fontaines* " (éd. Lacroix, Paris), véritable premier manuel d'hydrogéologie.

1861-62 - Achille Delesse dresse les premières cartes hydrogéologiques avec représentation des courbes piézométriques à l'échelle du 1/25 000 : ville de Paris et Département de la Seine (dites " *cartes hydrologiques* ").

1867 - Premier captage des sources de la Vanne pour l'alimentation de Paris en eau potable.

1870 - Début de la plus ancienne chronique de niveau piézométrique connue en France : Raffinerie de sucre de Toury (Eure-et-Loir), nappe libre du Calcaire de Beauce.

1872 - Eugène Belgrand publie la monographie complète du bassin de la Seine : " *La Seine. Études hydrologiques* ", Paris.

1884 - Premier forage artésien à l'aquifère des " Sables inférieurs éocènes ", à Portets (Gironde).

1886-88 - Jules Gosselet expose les premières " *Leçons sur les nappes aquifères du Nord de la France* ", à l'Université de Lille (Publ. Annales Soc. géol. du Nord).

1887 - Auguste Daubrée crée le mot savant " *phréatique* " pour qualifier la première nappe souterraine accessible par les puits, dans son ouvrage " *Les eaux souterraines à l'époque actuelle* " (Paris).

1890 - E. Fournier réalise les premiers traçages par coloration de circulations karstiques dans le Jura.

1894 - Édouard Alfred Martel inaugure l'hydrogéologie du karst et la spéléologie par son ouvrage " *Les abîmes, les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie* " (Paris).

1901 - Félix Marboutin démontre par traçage l'existence de la circulation karstique sous-fluviale dans le Val d'Orléans avec liaison entre les pertes de la Loire et la source du Loiret.

1901 - Un accident instructif : l'incendie de l'usine d'absinthe Pernod, à Pontarlier, démontre la liaison entre les pertes du Doubs et la source de la Loue, dans le Jura.

1902 - Une loi prescrit la création de périmètres de protection des captages de source pour l'alimentation en eau potable, suivant l'expertise de " Géologues officiels ".

1903 - Premiers essais de prospection électrique des eaux souterraines par F. Dienert.

1904 - Joseph Boussinesq publie " *Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources* ", qui fondent la théorie générale des écoulements en milieu poreux et introduisent les notions de surface libre et de non-stationnarité du mouvement.

1905 - Edmond Maillet publie " *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale* ".

1906 - Jules Gosselet publie " *Étude de la nappe du Calcaire carbonifère, Roubaix – Tourcoing* ".

1909 - Édouard Imbeaux présente à la Société Géologique de France (séance du 6 décembre 1909) une première vue d'ensemble sur les eaux souterraines de la France.

1921 - Édouard Alfred Martel publie son " *Nouveau traité des eaux souterraines* ".

1923 - Première thèse de doctorat sur un sujet hydrogéologique : " *Étude sur les eaux souterraines de la région de Cambrai, département du Nord* " par L. Dollé (Université de Lille).

1924 - Extension réglementaire des périmètres de protection à tous les types de captage d'eau souterraine pour alimentation en eau potable.

1930 - Édouard Imbeaux publie " *Essai d'hydrogéologie* ".

1930 - Création du premier certificat d'étude supérieure d'hydrogéologie par L. Dollé à la Faculté de Lille " *Hydrogéologie, hygiène de l'eau et du sol* ".

1930 - Création du Bureau d'inventaire des ressources hydrauliques (BIRH) en Tunisie.

1931 - Norbert Casteret découvre l'origine transfrontalière de la source de la Garonne, par traçage des pertes au Forau-des-Aigualluts, sur le versant espagnol des Pyrénées.

1931 - Création du Comité d'études des eaux souterraines (CEES) au Maroc présidé par le docteur Russo qui va lancer les premières études hydrogéologiques régionales dans ce pays.

1932 - F. Dienert consacre une grande partie de " *Hydrologie agricole* " à l'origine et circulation des eaux souterraines, aux sources et aux nappes, à la détermination des périmètres d'alimentation par traçage.

1933 - Première réalisation d'une carte de la surface piézométrique de la nappe de la craie en Picardie (Nord-Ouest de la Somme) par Antoine Bonte.

1934 - Première carte hydrogéologique publiée au Maroc par l'Institut scientifique chérifien : feuille Tafilalt à 1/200 000, établie par Ph. Russo.

1935 - Décret-loi du 8 août " *Sur la protection des eaux souterraines* ", en région parisienne, étendu plus tard à d'autres départements (1958-1985).

1936 - E. Lefranc invente un nouveau procédé d'estimation de la perméabilité par essai ponctuel en puits ou forage (Publication *in* " *Génie civil* ", CIX, 15, Paris).

1940 - La Section d'Hydrologie scientifique du Comité national français de Géodésie et Géophysique (CNFGG) publie le manuel d' " *Instructions hydrologiques* " qui comprend une large partie consacrée aux " Instructions pour l'observation des eaux souterraines ".

1941 - Création du BRGG ; Déclaration obligatoire des travaux souterrains supérieurs à 10 mètres de profondeur (Titre VIII du Code minier, art. 131 et 133).

1942 - Création du Service d'Études Scientifiques (SES) à la Direction de la Colonisation et de l'Hydraulique en Algérie.

1946 - Création du Centre d'Études Hydrogéologiques (CEH) dans le Service Géologique du Maroc.

1946 - La première promotion de l'École nationale supérieure de Géologie appliquée et de prospection minière à Nancy comprend plusieurs ingénieurs-géologues qui se spécialiseront en hydrogéologie (Ed. Bolelli, P. Taltasse…).

1947 - Jean Archambault publie " *Hydrogéologie tunisienne* " (Direction des travaux publics de Tunisie).

1947 - Création du BURGÉAP (Bureau d'études de Géologie appliquée) par Jean Archambault.

1951 - Réalisation d'un ensemble d'ouvrages de recharge artificielle (250 forages ou fosses) de l'aquifère alluvial de la vallée du Rhône, pour compenser l'influence du canal de fuite de Donzère-Mondragon (Cie Nationale du Rhône).

1952 - Au XIXe Congrès géologique international, à Alger, des hydrogéologues français, conduits par G. Castany et G. Drouhin, proposent la création de l'Association internationale des hydrogéologues (AIH), qui sera officialisée au congrès géologique suivant, à Mexico en 1956.

1954 - Réalisation d'ouvrages de recharge artificielle (fosses) de l'aquifère alluvial de Basse-Durance (Provence) pour prévenir les effets à craindre du changement de régime des irrigations.

1955 - Pierre Lafitte et Jean Ricour affirment au Congrès du centenaire de la Société de l'Industrie minérale (juin 1955) que " *La recherche minérale la plus importante de la France métropolitaine est l'eau* " et soulignent le " rôle de l'hydrogéologue ". (Publication dans la Revue de l'Industrie minérale, janvier 1956).

1955 - Henri Schoeller publie son cours à l'IFP " *Hydrogéologie* ".

1955 - Création de SOGREAH (Société Grenobloise d'Applications Hydrauliques, issue du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique).

1956 - Création du " Comité national de l'eau ".

1956 - Lancement par le BRGGM du premier " Inventaire régional des Ressources Hydrauliques " dans le Nord – Pas-de-Calais (IRH/NPC), étendus ensuite à toutes les régions françaises (" Evaluation des Ressources hydrauliques ") dans le cadre des Services géologiques régionaux.

1956 - Première expérience de régularisation par pompage d'une source d'aquifère karstique (Aïn Bou-Merzoug, Constantine, Algérie) réalisé par Guy Durozoy.

1956 - Premier forage profond artésien à l'aquifère du Continental intercalaire saharien, à Zelfana, en Algérie.

1956 - Création de l'AIH au Congrès géologique international de Mexico.

1957 - Première réalisation d'un stockage de gaz en aquifère profond à Lussagnet, en Aquitaine (SNPA).

1957 - Premier congrès de l'AIH, à Paris.
Au cours de cette réunion, le professeur R. Barbier (Université de Grenoble) propose un schéma de classification des sujets d'études et de recherches en Hydrogéologie.

1958 - Extension du Décret-Loi de 1935 aux aquifères du Calcaire carbonifère et de la Craie du Nord - Pas-de-Calais.

1958 - Création des enseignements de 3e cycle d'hydrogéologie (DEA) aux universités de Bordeaux, Montpellier et Paris.

1958 - Fondation à Montpellier, par Jacques Avias, du Centre d'Études et de Recherches en Hydrogéologie (CERH) et de l'association privée Centre d'Études et de Recherche en Géologie Appliquée (CERGA), re-dénommée peu après Centre d'Études et de Recherches géologiques et hydrogéologiques (CERGH).

1959 - Extension du Décret-Loi de 1935 aux aquifères de la Gironde. En 1960, le décret sera également étendu au département de la Guadeloupe ; en 1961 à celui de la Réunion ; en 1973 aux départements des Bouches-du-Rhône, du Calvados, des Pyrénées-Orientales, de la Seine-Maritime, du Territoire de Belfort ; en 1981, aux départements la Moselle et des Vosges, et enfin, en 1985, à celui d'Indre-et-Loire.

1959 - Réalisation de l'aménagement de recharge artificielle de la nappe alluviale de Croissy-sur-Seine (alluvions et craie) dans la vallée de la Seine, dans d'anciennes sablières (Soc. Lyonnaise des eaux).

1959 - Création du BRGM par fusion du BRGGM et des bureaux miniers des territoires français d'Outre-Mer.

1960 - Jean Archambault élabore la première synthèse sur " *Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale* " (Rapport du CIEH, Ouagadougou / Berger-Levrault, Nancy).

1960 - Lancement des activités hydrogéologiques du Service géologique d'Alsace et de Lorraine, à Strasbourg.

1960 - Robert Ambroggi et Jean Margat présentent une " *Légende générale des cartes hydrogéologiques du Maroc* ", à vocation internationale, à l'Assemblée générale de l'Association internationale d'Hydrologie scientifique (AIHS), Commission des eaux souterraines, Helsinki.

1960 - Première thèse de doctorat de 3e cycle (DEA) d'hydrogéologie soutenue à l'Université de Bordeaux " *Étude de la nappe des sables inférieurs d'Aquitaine* " par Maurice Albinet.

1960 - Première étude d'un aquifère par modèle analogique (cuve rhéoélectrique), nappe de la craie de l'Ostrevent (Nord), par Géopétrole, pour le BRGM.

1961 - Premières thèses de doctorat de 3e cycle (DEA) d'hydrogéologie soutenues à l'Université de Montpellier, par J.-P. Delmas, A. Djellouli et Henri Paloc.

1961 - Première thèse de 3e cycle d'hydrogéologie soutenue à l'Université de Paris (Laboratoire de Géodynamique) " *Observations hydrogéologiques dans le Sud-Est du Bassin de Paris* " par Claude Mégnien.

1961 - Premier forage géothermique à Paris, pour la Maison de la Radio.

1961 - Le Prix Henri Milon de la Société hydrotechnique de France est décerné pour la première fois à un ouvrage d'hydrogéologie " *Mémoire explicatif de la carte hydrogéologique de la plaine de Tafilalt* ", Maroc, par Jean Margat.

1962 - Publication de " *Les eaux souterraines* " de Henri Schoeller (Ed. Masson).

1962-63 - Première étude hydrogéologique " linéaire " appliquée à un projet d'autoroute (Vienne – Valence), par le BURGEAP pour le Laboratoire des Ponts et Chaussées (Rap. par J. Archambault & L. Bourguet).

1963 - Création des Services Géologiques Régionaux du BRGM.

1963 - Publication du " *Traité pratique des eaux souterraines* " de Gilbert Castany (Ed. Dunod).

1963 - Première étude hydrogéologique de l'aquifère profond du continental intercalaire saharien par le BURGÉAP, pour la Direction des carburants.

1963 - Première étude par modèle analogique de la nappe du Continental intercalaire saharien, par GÉOPETROLE, pour l'OMVSS.

1963 - Lancement du périodique trimestriel " *Chronique d'hydrogéologie* ", devenu " *Hydrogéologie* ", paru jusqu'en 2000 (Ed. BRGM).

1963 - Établissement de la 1re carte hydrogéologique régulière à 1/50 000, feuille Douai (BRGM).

1964 - Création du Département d'Hydrogéologie au BRGM.

1964 - Première application d'analyse isotopique (H_3) à la datation d'eau souterraine : aquifère des eaux minérales d'Evian, par B. Blavoux.

1964 - Établissement d'une " *Carte des nappes d'eau souterraine de la France* " à 1/1 000 000, par le BRGM (J. Margat) pour le Commissariat général du Plan et la DATAR (SPEPE).

1964 - La loi sur l'eau prescrit l'établissement des périmètres de protection pour tout nouveau captage AEP. Elle institue aussi le régime de déclaration des prélèvements d'eau souterraine (article 40) et instaure les Agences financières de bassin.

1964 à 1978 - Contributions françaises à l'élaboration de la Carte hydrogéologique internationale de l'Europe à 1/1 500 000 réalisée par l'AIH et l'UNESCO (Feuilles B4 London, B5 Paris-Sud, C4 Berlin et C5 Berne) et aux Notices explicatives parues de 1974 à 1978.

1965 - L'UNESCO lance la Décennie Hydrologique Internationale (relayée en France par la DGRST) qui sera suivie par le Programme Hydrologique International (PHI). L'hydrogéologie est reconnue comme partie intégrante des Sciences de l'eau.

1965 - Équipement du bassin de l'Hallue, en Picardie, retenu par la DGRST, dans le cadre de la Décennie Hydrologique Internationale, comme premier " bassin représentatif " (expérimental) de recherche axé sur les eaux souterraines (aquifère de la Craie) en France. (Ph. De la Quérière, J.-C. Roux).

1965-66 - Premier modèle mathématique d'un grand aquifère régional : nappe des Sables verts du Bassin de Paris, par la Direction des carburants.

1965 - Création de " GÉOHYDRAULIQUE ".

1965 - Création de l'Union Française des Géologues.

1965 - Le prix Henri Milon de la Société Hydrotechnique de France est décerné à J.-C. Roux pour sa thèse de 3e cycle " *Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de la Somme* ".

1966 - Délimitation, par décret, des 6 circonscriptions de bassin ; des missions techniques de l'eau sont chargées de préparer la création des Comités de bassin (1967), et des Agences Financières de Bassin (1968).

1966 - Première application des mesures d'O_{18} à la détermination de l'altitude moyenne de l'aire d'alimentation d'une source (bassin d'Evian) par B. Blavoux.

1966-68 - Action concertée DGRST " Fontaine de Vaucluse ". En 1967, première exploration du gouffre par le " Télénaute " à – 160 m.

1967 - Création par Yves Emsellem du Laboratoire d'Hydrogéologie mathématique à l'École nationale supérieure des Mines de Paris, à Fontainebleau.

1967 - Parution de la *Carte hydrogéologique du Bassin de Paris* à 1/500 000 dressée par Maurice Albinet et *al.* (éd. BRGM).

1968 - Le prix Henri Milon de la Société hydrotechnique de France est décerné à B. Blavoux pour sa thèse de 3e cycle " *Les sources minérales d'Evian* ".

1968 - Les recherches de Georges Vachaud sur la zone non saturée (Thèse, Université de Grenoble) ouvrent une voie nouvelle sur la compréhension, la mesure *in situ* et la modélisation de l'infiltration.

1969 - Congrès national d'hydrogéologie, Journées Henri Schoeller, Mars-Avril, Bordeaux (Publ. Mémoires du BRGM n° 76).

1969 - Première exploration du conduit karstique noyé de Port-Miou (Marseille), par la COMEX.

1970 - Première tentative d'estimation des prélèvements d'eau souterraine en France (Agences de bassin).

1970 - Réalisation de l' " *Atlas des eaux souterraines de la France* " (Cartes par région administrative à 1/1 000 000) pour la DATAR / SPEPE), par le BRGM.

1970 - Première datation au C_{14} de l'eau d'un aquifère profond en France (Nappe des Sables verts albiens du Bassin de Paris), thèse d'Y. Vuillaume, 1971.

1971 - Création du premier ministère de l'Environnement en France.

1971-73 - Réalisation de l'aménagement de recharge artificielle de l'aquifère de la Craie à Houlle et Moule, pour l'alimentation en eau de Dunkerque (Lyonnaise des eaux).

1972 - Construction du barrage " souterrain " dans le conduit karstique de Port-Miou (Marseille) par SOLÉTANCHE-Entreprise.
Un second barrage le complétera en 1976.

1973 - Premier " choc pétrolier ".

1973 - Création du Comité Français d'Hydrogéologie (Association loi 1901) dans le cadre de l'AIH, par G. Castany, dont il sera le président jusqu'à son décès, en 1993.

1973 - Création des premiers postes d'hydrogéologues départementaux en Vendée, puis en Côte d'Armor.

1974 - Xe Congrès de l'AIH à Montpellier.

1974 - Introduction de la notion de Système aquifère karstique par A. Mangin.

1976 - Premier inventaire des systèmes aquifères du territoire français (BRGM).

1976 - Forte sécheresse en France.

1976 - Lancement des grands programmes de forages géothermiques dans le Bassin parisien et le Bassin aquitain.

1976 - Loi relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

1977 - Colloque national " *Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine* ", Orléans, novembre 1977.

1977 - Gilbert Castany et Jean Margat publient le " *Dictionnaire français d'hydrogéologie* ", éd. BRGM.

1977 - Lancement de " *Situation hydrologique et prévisions de basses eaux* ", publication interministérielle quadrimestrielle, (éd. BRGM).

1977 - Colloque national " *Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France* ". Nice, BRGM.

1977 - Décret d'application de la loi relative à la Protection de la nature de 1976, imposant les " *Études d'impact sur l'environnement* ", des travaux et projets d'aménagement.

1978 - Première expérience de soutien d'étiage d'un cours d'eau par pompage dans l'aquifère qu'il draine (Vallée de la Lys et aquifère de la craie, en Artois).

1979 - Première application des isotopes stables (O_{18}…) à l'estimation de l'alimentation des aquifères, par B. Blavoux *et al.*, dans le Jura et en Provence.

1979 - Création de l'ANDRA au sein du CEA qui deviendra un EPIC indépendant en 1981.

1980 - Publication de " *L'eau souterraine en France* " par Jacques Bodelle et Jean Margat (Ed. Masson, Paris).

1980 - Publication de la " *Carte hydrogéologique de la France. Systèmes aquifères* " à 1/1 500 000, dressée par Jean Margat (Ed. BRGM).

1980 - G. Castany est élu Président de l'AIH jusqu'en 1984.

1980 - Mise en évidence du phénomène de dénitrification naturelle de l'eau souterraine, dans les nappes captives du Nord de la France (Emmerin, 59).

1980 - Obligation d'étude hydrogéologique préalable à l'installation de décharge de déchets urbains et industriels.

1981 - Publication de " *Hydrogéologie quantitative* " par Ghislain de Marsily (Éd. Masson, Paris).

1982 - Création de l'ANRED.

1982 - Opération " Source du Lez ", première " gestion active " d'aquifère (Hérault / ville de Montpellier ; conception Jacques Avias).

1984 - Création du CORPEN par les Ministères chargés de l'Agriculture et de l'Environnement.

1985 - Exploration du gouffre de la Fontaine de Vaucluse à la profondeur-record de – 308 m (- 224 m sous le niveau de la mer), par Modexa.

1985 - Constitution d'un Observatoire de la qualité des eaux souterraines, " ONQUES ", géré par le BRGM.

1986 - Réalisation par ARLAB de la contribution pour la France de l'" *Atlas of Groundwater Resources of the European Community* " (cartes à 1/500 000 sur 4 sujets), coord. J. Fried, (éd. Th. Schäfer, Hannover).

1987 - Lancement de l'opération " Roches chaudes et sèches " à finalité géothermique, à Soultz-sous-Forêts en Alsace.

1987 - Première application des mesures de radon à la prospection des zones fracturées en aquifères de socle (Méthode mise au point au BRGM par T. Pointet et P. Leblanc, dans le Massif Armoricain).

1988 - Colloque international sur la Sécurité des stockages de déchets radioactifs et industriels toxiques (AIH, Orléans).

1990 - Colloque national " *L'eau souterraine, un patrimoine à gérer en commun* ", Paris.

1991 - Publication par l'Académie des Sciences du rapport " *Pollution des eaux souterraines en France* ", rapport n° 29.

1992 - Deuxième Loi sur l'eau, instituant les SAGEs et les SDAGEs et rendant obligatoires les périmètres de protection pour tout captage quelle que soit leur date d'exécution, et instituant le concept de " nappe d'accompagnement " des cours d'eau.

1992 - Création d'une " Direction de l'eau " au Ministère chargé de l'Environnement.

1992 - Création du Centre de l'Aube de stockage de déchets radioactifs de faible activité par l'ANDRA, en Champagne.

1993 - Colloque en hommage à Gilbert Castany, " *L'hydrogéologie au XXIe siècle* ", Comité français d'Hydrogéologie - AIH, Paris, 24 nov.

1993 - Promulgation de la première " Directive Nitrates " ; définition des zones vulnérables.

1995 - Création de l'IFEN (Institut Français de l'Environnement).

1995 - Création du Prix d'Hydrogéologie " Gilbert Castany " par le Comité Français d'Hydrogéologie (Association Internationale des Hydrogéologues) pour honorer les hydrogéologues seniors français, enseignants ou praticiens, dont l'œuvre et l'action consacrées à l'hydrogéologie ont été particulièrement remarquables. Le premier sera attribué en 1996 à Jean Ricour.

1995-2002 - Élaboration du 1er Référentiel hydrogéologique de la France, BD-RHF, V1.

1995-96 - Groupe de travail et Rapport du Conseil général des Mines sur la Gestion durable des eaux souterraines. Rapporteur : Yves Martin.

1996 - Mise en service de la première centrale électrique alimentée par énergie géothermique " haute température " à Bouillante (Guadeloupe).

1996 - Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique, Colloque national Montpellier, BRGM.

1998 - Constitution du Groupe français d'hydrogéologie isotopique (H2i), dans le cadre du CFH, présidé par Bernard Blavoux. Création d'une base de données ad hoc.

1999 - Protocole entre la Direction de l'eau et les Agences de l'eau fixant des densités de points de mesure, des fréquences de surveillance et des paramètres mesurés pour le réseau national des eaux souterraines (" Réseau patrimonial "). Il préfigure les réseaux de la DCE.

2000 - Directive Cadre Européenne sur la Gestion des eaux (DCE).

2001 - Publication du rapport du Commissariat Général du Plan " La Politique de préservation des ressources en eau destinée à la consommation humaine, rapport d'évaluation " (F. Villey-Desmerets, D. Ballay, D. Tricard, C. Henry de Villeneuve, qui pointe les limites et insuffisances des périmètres de protection contre les pollutions diffuses et préfigure la loi sur l'eau de 2006.

2001 - Inondation de la vallée de la Somme sous l'influence de la remontée exceptionnelle, puis du débordement de la nappe de la Craie.

2002 - Mise en place et organisation d'un réseau piézométrique et d'un réseau " qualité " des eaux souterraines au plan national.

2003 - Création de la base " *ADES* " (Accès aux données des eaux souterraines ", mise à la disposition du public, gérée par le BRGM,.

2004 - Plan National Santé Environnement qui prévoit de protéger 80 % des captages en 2008 et 100 % en 2010.

2004 - Journées à la mémoire de Jacques Avias, " *Un combat pour l'hydrogéologie du XXIe siècle* ", CFH/AIH, Montpellier, 13-15 mai.

2004 - Détermination et cartographie des " masses d'eau souterraine " de la France, en application des directives européennes (BRGM/MEDD/ Agences de l'eau).

2005 – 2006 - Élaboration par Jean Margat d'un ouvrage de synthèse sur " *Les eaux souterraines dans le monde* ", coédité en 2008 par l'UNESCO et le BRGM.

2006 - Troisième loi sur l'eau.

2006 - Création de l'ONEMA.

2006 - Parution d' " *Aquifères et eaux souterraines en France* " (collectif sous la direction de Jean-Claude Roux, éd. AIH/BRGM).

2006 - Colloque " *Gestion des grands aquifères* " et " *150e anniversaire de la Loi de Darcy* " - " 50e anniversaire de l'AIH ", CFH/AIH – Dijon, 30-31 mai, 1er juin.

2007-08 - Une nouvelle carte hydrogéologique de l'Afrique, à 1/10 000 000 est dressée au BRGM par Jean-Jacques Seguin (Carte distribuée en 2009).

2008 - " Grenelle de l'Environnement " ; Sélection de 507 captages d'eau destinée à la consommation humaine, menacés par les pollutions diffuses, sur l'ensemble du territoire français pour lesquels le bassin d'alimentation (AAC) fera l'objet d'une protection prioritaire et renforcée.

2008 - Le prix international d'Hydrologie (AIHS - OMM - UNESCO) est décerné à Jean Margat le 10 juin à l'occasion de la réunion du PHI à l'UNESCO. C'est la première fois depuis sa création que le prix est attribué à un hydrogéologue et la deuxième à un français.

2012 - Référentiel Hydrogéologique Français – Version 2 BD LISA (Banque de Données des LImites de Systèmes Aquifères).

Sources d'Yport : réapparition d'un traçage à la fluorescéine réalisé dans le bassin d'alimentation. *IDDEA, 2012*

Contributions à l'histoire de l'hydrogéologie française

Adams U. von, Gert M. (1987) – *Der Wassersucher Abbé Paramelle (1790-1875) – Hexer oder Heiliger ?* (Le chercheur d'eau Abbé Paramelle (1790-1875) – Sorcier ou saint ?). (Brunnenbau, Bau von Wasserwerken, Rohrleitungsbau, n° 4, avril, 38e année, pp. 149-158).

Ambroggi R., Margat J. (1961) – Les recherches hydrogéologiques au Maroc. Le Centre des études hydrogéologiques (1946-1960). (Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc, 153, 55 p., Rabat).

Atkinson G. et al. (1998) - Eugène Belgrand (1810-1878) : Civil Engineer, Geologist and Pioneer Hydrologist. (The Newcomen Society for the study of the history of Engineering and Technology, Transac, Vol. 69, n° 1, 1997-98).

Castany G. (1950) – L'œuvre hydrogéologique française en Tunisie. (Cahiers Charles de Foucauld, vol. 18).

Castany G., Margat J., Roux J.-C. (1986) – Origine, évolution et applications de l'hydrogéologie. (Géologues, 76-77, p. 19-26, Paris).

Castany G. (1991) - Origine et évolution des concepts des eaux souterraines (Com. Fr. d'Hist. de la Géologie, 3e série - TV 1991).

Chapoutier P. (1960) – L'hydraulique souterraine dans son cadre historique. (Soc. hydrol. de France, 6es journées de l'Hydraulique, Nancy, juin, T. 1, pp. XXXII – XL, La Houille Blanche).

Freeze A. (1994) – Henry Darcy and the Fountains of Dijon. (Ground Water, Vol. 32, n° 1, Jan.-Feb., USA).

Gohau G. (1990) – Les sciences de la Terre aux XVIIe et XVIIIe siècles. Naissance de la géologie. (éd. Albin Michel. Coll. L'évolution de l'humanité, Paris).

Margat J. (1974) – Progrès récents des techniques de l'hydrogéologie. (Annales des Mines, Mars, pp . 73-80, Paris).

Margat J. (1986) – Hydrogéologie : passé, présent et avenir (Ingénieurs-géologues, n° 47-48, Av., 40e anniv. ENSG, Nov. 1985, p. 59-61, Nancy).

Margat J. (2001) – Histoire de l'hydrogéologie. (Colloque international OH_2 – Origines et histoire de l'hydrologie, Dijon, 9-11 mai, 8 p.).

Margat J. (2003) – Le grand siècle de l'hydrogéologie. (Géochronique, 88, Décembre, pp. 36-37, Paris).

Margat J. (2007) – L'hydrogéologie. (Géochronique, 101, " De la Géologie aux Géosciences ", pp. 45-46, Paris).

Margat J., Pennequin D., Roux J.-C. (2012) - French history of hydrogeology (in " *History of hydrogeology* "), N. Holden and J. Mather editors).

Revol F. (1948) – Quelques pas sur les pas de nos ancêtres cherchant à découvrir le secret des fontaines (La Houille Blanche, n° 5, Sept.-Oct., Grenoble).

Simmons C.T. (2008) – Henry Darcy (1803-1858) : immortalised by his scientific legacy (Hydrogeology Journal, V. 16, n° 6, sept., pp. 3-16, Springer).

Thibaux L. (1956) – Le fleuve souterrain sous-marin de Port-Miou. Historique. (Revue municipale de Marseille, 31, pp. 17-32).

Tixeront J. (1956) – Note sur les rôles respectifs de Darcy et Paramelle dans la fondation de l'hydrologie moderne. (Assoc. intern. Hydrol. Scient., Symposia Darcy, Dijon, Sept., Publ. AIHS n° 41, T. 11, pp. 7-9).

Principales publications qui ont jalonné et reflété l'évolution de l'hydrogéologie française

Abbot M.-B., Cunge J. *et al.* (1982) – *Engineering application of computations hydraulics. Hommage to Alexandre Preisman*. (Pittman publishing ltd editor).

Albinet M. *et al.* (1967) – *Carte hydrogéologique du Bassin de Paris*. Éch. 1/500 000. (éd. BRGM).

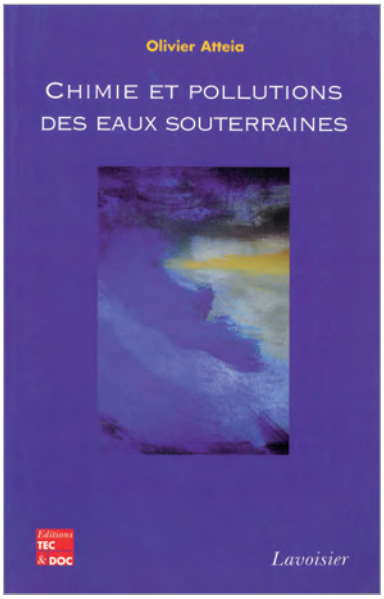
Albinet M. *et al.* (1970) – *Carte de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine de la France*. Éch. 1/1 000 000 (éd. BRGM).

Albronn G. (1966) – *Un nouvel outil d'étude des aménagements hydrauliques : Le modèle mathématique.* (Bulletin de l'Association Professionnelle des Ingénieurs des Ponts et Chaussées et des Mines).

Aquilina L., Labasque T., Pauwells H., Ayraud V. (2008) – *La datation des eaux souterraines par analyse des CFC : un outil de gestion durable de la ressource en eau.* (Tech. Sci. Et Meth. N° 1).

Arago F. (1834) – *Sur les puits forés connus sous le nom de puits artésiens, de fontaines artésiennes ou de fontaines jaillissantes.* (Annuaire 1835 du Bureau des Longitudes, Paris).

Astier J.-L. (1971) – *Géophysique appliquée à l'hydrogéologie.* (Paris, Masson).

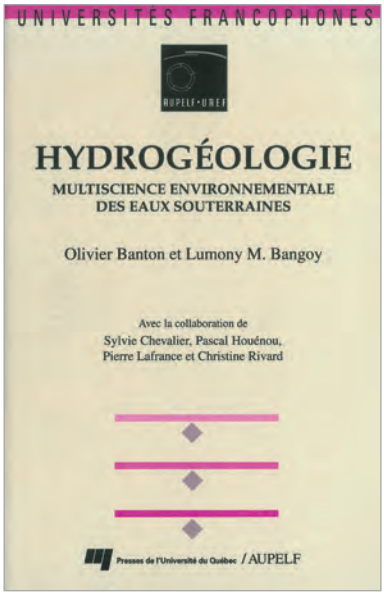


Chime et pollutions des eaux souterraines, O. Atteïa

Atteïa O. (2005) – *Chimie et pollution des eaux souterraines.* (éd. Tec. & Doc-Lavoisier).

Avias J. (1964) – *Sur la méthodologie en hydrogéologie karstique.* (Mém. CERH, 1, Montpellier).

Back W., Létolle R. (1983) – *Geochemistry of groundwater.* (Dev. Water Science (Elsevier) ; 16 ; 369 p.).



Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines, O. Banton et L.M. Bangoy

Banton O. et Bangoy L.-M. (1997) – *Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines.* (Presses Université du Québec / AUPELF).

Barbier J. (2011) – *Dis-moi, petite source.* (éd. Persée).

Barrière P., Bonneton M., Jardin P., Lavedan G. et Moullard P.-Y. (1985) – *Forages présentant de forts risques de rabattements en pompage. Étude par modèle mathématique (DEDALE 3D). Protocole d'essai de pompage.* (Mémories of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists, Cambridge).

Bazin F. (1961) – *L'utilisation des modèles pour les études de nappes souterraines.* (A.I.H., Réunion de Rome, Mém. IV, Rome).

Bazin F., de Larminat R., Huber R. (1975) – *Utilisation de modèle mathématique pour apprécier la recharge annuelle ou inter-annuelle des aquifères : l'exemple des plaines de Thessalie (Grèce).* (Congrès International de l'Association Française pour l'étude des irrigations et du drainage, Moscou).

Belgrand E. (1846) – *Études hydrologiques dans les granites et les terrains jurassiques formant la zone supérieure du bassin de la Seine*. Paris.

Belgrand E. (1872) – *La Seine. Études hydrologiques*. Paris.

Besson J. (1569) – *L'art et Science de trouver les eaux et les fontaines cachées sous terre, autrement que par les moyens vulgaires des agriculteurs et architectes* (Gibier, Orléans).

Billault P., Doucet N., Boisson M. (2005) – *Programme d'étude et de modélisation de la nappe des sables du Cénomanien,* (Vol. 42, n° 3, p. 53-56. Bulletin de l'Association des Géologues du Bassin de Paris).

Bize J., Bourguet L., Lemoine J. (1972) – *L'alimentation artificielle des nappes souterraines.* (Paris, Masson).

Blavoux B., Glangeaud L. *et al.* (1964) – *Hydrodynamique et teneur en tritium des eaux du bassin d'Evian (France).* (C.R. Ac. Sc., t. 259, 9 déc., Paris).

Les eaux souterraines en France - Les enjeux des geosciences

Blum A., Chery L., Margat J., Roux J.-C. *et al.* (2009) – *Les eaux souterraines en France.* (éd. BRGM – CFH – ONEMA. Coll. Les enjeux des géosciences).

Blum A., Chery L., Margat J., Roux J.-C. *et al.* (2012) – *Groundwaters in France* (BRGM - CFH - ONEMA éd., Géosciences issues Collection).

Bodelle J., Margat J. (1980) – *L'eau souterraine en France*. (éd. Masson).

Boisson M., Huré A. (2004) – *Modélisation de l'atténuation naturelle dans le cadre d'un site pollué (solvants chlorés) afin d'évaluer des solutions de gestion du site*. (Journée technique APESA, " L'atténuation naturelle des polluants dans les sols ", Pau, 19 octobre 2004).

Boisson M., David E. *et al.* (1995) – *Stockage de déchets à vie longue en formation géologique profonde : Limitation des circulations par barrière hydraulique perméable.* (SHF, Paris, " Connaissance et valorisation des nappes profondes ", pp. 163-170).

Boisson M. *et al.* (1996) – *Le système ISMAP : un système intégré d'aide à la gestion des pollutions diffuses d'origine agricole.* (ESRA'96, " L'eau souterraine en région agricole ", Poitiers (poster)).

Bonnet M. (1982) – *Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie*. (BRGM doc. n° 34).

BRGM (1970) – *Atlas des eaux souterraines de la France.* (éd. BRGM/DATAR).

BRGM (1977) – *Création du bulletin hydrologique de prévision des basses eaux.*

Boussinesq J. (1904) – *Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources.* (J. Math., pures appl. Fr., (5), 10, n° 1).

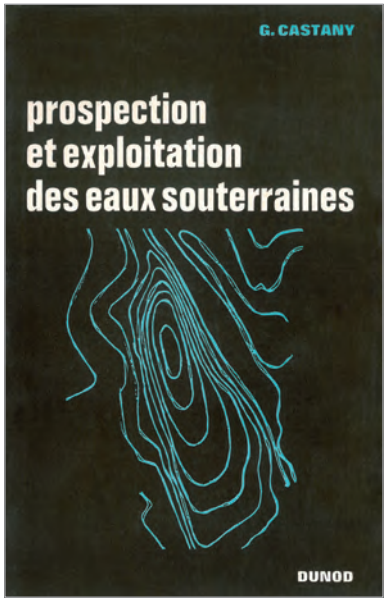
BURGÉAP (1989 à nos jours) – *Protection dynamique du champ captant de Crépieux-Charmy pour l'alimentation en eau de la communauté urbaine de Lyon. Mise au point d'un système de riposte pour la sécurité de l'agglomération lyonnaise (Système Rosalye) par création d'une barrière hydraulique et la mise en place d'un outil d'aide à la décision en ligne en cas de pollution du Rhône* (Rapports inédits).

BURGÉAP, ISSEP, IFP (1999) – *Étude hydraulique et hydrogéochimique du Bassin Minier Charbonnier du Nord – Pas-de-Calais. Rapport de synthèse aux Charbonnages de France, Service Patrimoine Nord – Pas-de-Calais. Département Environnement et arrêt des exploitations*. Rapport RAS 119 E/097400 (Rapport inédit).

L'eau souterraine en France , J. Bodelle et J. Margat

Castany G. (1963) – *Traité pratique des eaux souterraines.* (éd. Dunod).

Castany G. (1968) – *Prospection et exploitation des eaux souterraines.* (Paris, Dunod).



Prospection et exploitation des eaux souterraines, G. Castany

Castany G., Margat J. (1977) – *Dictionnaire français d'hydrogéologie.* (éd. BRGM).

Castany G. (1982) – *Principes et méthodes de l'hydrogéologie.* (éd. Dunod).

Chalon P.-F. (1913) – *Les eaux souterraines. Recherches, captage et purification.* (Béranger, Paris).

Chapellier D. (1987) – *Diagraphies appliquées à l'hydrogéologie.* (Tec. & Doc-Lavoisier, Paris).

Chauve P. (2005) – *Des grottes et des sources.* (éd. Belin, pour la Science).

Chery L., Thouin C. (coord.) (2005) – *Guide technique : Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthodologie de caractérisation des états de référence des aquifères français.* (éd. BRGM, coll. Scientif. et techn.).

Collectif (1974-1978) – *Contributions à la Carte hydrogéologique internationale de l'Europe à 1/1 500 000* (AIH/UNESCO) pour les parties françaises des feuilles B4 (London), B5 (Paris-Sud), C4 (Berlin) et C5 (Berne), ainsi qu'aux Notices explicatives.

Collectif (2010) – *Vers une gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers - Guide méthodologique* (Agence Française de Développement).

Collin J.-J. (2004) – *Les eaux souterraines ; Connaissance et gestion.* (éd. BRGM/Hermann).

Crampon N., Roux J.-C. (1994) – *Hydrogeology of North-West of Europe* (chap. Nord de la France et Bassin de Paris). (A.I.H, Oxford University Press).

Crampon N., Roux J.-C., Bracq P. (1993) – *Hydrogéologie de la Craie de la France.* (Revue Hydrogéologie n° 2, 1993, éd. BRGM).

Darcy H. (1856) – *Les fontaines publiques de la ville de Dijon.* (Paris).

Daubrée A. (1887) – *Les eaux souterraines à l'époque actuelle.* (Paris).

Daum J., Durand F. (1995) – *Méthodes d'évaluation de l'impact des prélèvements réalisés dans les nappes d'accompagnement sur les eaux superficielles associées* (Rap. BRGM RR-38586-FR).

Daum J.-R., Martelat A. (1997) – *Guide sur la gestion et la protection des captages d'eau potable dans les nappes alluviales.* (Documents techniques FNDAE n° 9).

Dausse (1842) – *De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau.* (Annales des Ponts et Chaussées, Mars-Avril, Paris).

De Gelis E. (1956) – *Éléments d'hydraulique souterraine.* (N. mém. Serv. Géol. Maroc, n° 136, Rabat).

De La Hire (1703) – *Remarques sur l'eau de pluie et l'origine des fontaines avec quelques particularités sur la construction des citernes.* (Mem. Roy. Sci., Paris, 56-59).

Delesse A. (1861) – *Carte géologique et hydrologique de la Ville de Paris.* (1 Br. in-8°, extr. du B.S.G.F., (2), t. XIX, p. 12 à 41, 4 novembre 1861, Bibl. Ramon).

Les eaux souterraines, J.-J. Collin

Delesse A. (1862) – *Carte hydrologique du département de la Seine, avec légende.* Échelle 1/25 000. (Paris).

Delarozière Bouillin O. (1965) – *Carte des eaux souterraines de la France.* Éch. 1/1 000 000 (éd. BRGM).

De Marsily G. (1981) – *Hydrogéologie quantitative.* (éd. Masson).

Desmarest (1751) – Article " Fontaine " de l'*Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* dirigée par Diderot et d'Alembert.

Detay M. (1993) – *Le forage d'eau*. (éd. Masson, Paris).

Detay M. (1997) – *La gestion active des aquifères.* (éd. Masson).

Dewandel B., Perrin J., Ahmed S., Aulong S., Hrkal Z., Lachassagne P., Samad M., Massuel S. (2010) – " Development of a tool for managing groundwater resources in semi-arid hard rock regions. Application to a rural watershed in South India ". *Hydrological Processes*, 24, 2784-2797 (2010).

Dienert F. (1912) – *Eaux douces et eaux minérales* (Lib. Polytechnique Ch. Béranger, Paris).

Dienert F. (1932) – *Hydrologie agricole et alimentation en eau des exploitations rurales*. (Baillère, Paris).

Dörflinger N. *et al.* (2009) – *Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa* (Rap. BRGM RP-57527 - FR).

Dörflinger N. *et al.* (2010) – *Guide méthodologique. Les outils de l'hydrogéologie karstique.* (Rapport BRGM RP-58237 - FR ; inédit).

Dumas J. (1857) – *La science des fontaines.* (Lacroix, Paris).

Dupuit J. (1848-1863) – *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables.* (Paris, 1re éd. 1848, 2e éd. 1863).

Erhard-Cassegrain A., J. Margat (1986) – *Introduction à l'économie générale de l'eau.* (Masson, Paris).

Fontes J.-Ch., Leiolle R., Olive Ph., Blavoux B. (1967) – Oxygène 18 et tritium dans le bassin d'Evian (in *Isotopes in Hydrology*, I.A.E.A., Vienne).

Fontes J.-Ch. (1983) – Dating of Groundwater, in Guidebook on Nuclear Techniques in *Hydrology* (IAEA Technical Reports Series, n° 91, Vienne).

Fournet J. (1858) – *Hydrographie souterraine.* (Acad. Sc. Belles Lettres et Arts, Lyon).

Fournier E. (1900) – *Les réseaux hydrographiques du Doubs et de la Loue.* (Annales de géographie, t. IX, n° 45, p. 219-228 ; in-8°, 10 p., Paris, Colin).

Fournier E. (1902) – *Les sources, résurgences et nappes aquifères du Jura franc-comtois.* (Bull. Serv. Carte géol. Fr., t. XIII, n° 89, p. 423-487).

Fournier E. (1926) – *Les eaux souterraines*.

Freissinet C., de Bruyn B, Vauclin M. (LTHE) (2001) – *Utilisation couplée de l'analyse spatiale et de l'arithmétique floue - Évaluation de la vulnérabilité d'un bassin-versant aux produits phytosanitaires. Gestion Spatiale des Risques*, (Traité IGAT, Série Aménagement et Gestion du Territoire, 288 pages, Édition Hermès).

Freissinet C. (2003) – *Eurolakes : Integrated water resource management for important deep European lakes and their catchment areas. Application to the Lac du Bourget* (Savoy, France). (5e Symposium International de l'Eau, Cannes).

Guide pratique de pompages d'essai, B. Genetier

Genetier B. (1997) – *La pratique des pompages d'essai en hydrogéologie.* (Manuels et Méthodes n° 9, éd. BRGM).

Gibert J. et *al.* Eds (1974) – *Groundwater Ecology.* (Academic Press, San Diego, Cal.).

Gilli E., Mangan C., Mudry J. (2004) – *Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications*. (Coll. Présup., Dunod éd., Paris).

Gilli E., Mangan C., Mudry J. (2012) – *Hydrogeology. Objectives, methods and applications*. (CRC Press, Taylor & Francis Group, New York).

Gosselet J. (1886-1888) – *Leçons sur les nappes aquifères du Nord de la France.* (Ann. Soc. géol. Nord).

Guillemin C., Roux J.-C. (1992) – *Pollution des eaux souterraines en France ; rapport n° 29 de l'Académie des Sciences.* (éd. BRGM. Manuels et Méthodes, n° 23).

Héricart de Thury (1829) – *Considérations géologiques et physiques sur la cause du jaillissement des eaux des puits forés ou fontaines artificielles.* (Paris).

IFARE (1997) – *Ausgewählte Themen / Thèmes choisis* (éd. IFARE).

IFARE (1998) – *La recherche aujourd'hui pour mieux agir demain* (éd. IFARE).

IFARE (2001) – *La recherche pour comprendre et agir* (éd. IFARE).

INSEE (1986) – *Les comptes du patrimoine naturel, chap. 5. Le compte des eaux continentales,* J. Margat (pp. 285-414). (Collections de l'INSEE, 137-138).

Imbeaux E. (1930) – *Essai d'hydrogéologie.* (Paris).

Jardin P., Canaletta B., Le Bideau L. (2007) – *Exploitation de l'énergie géothermique basse température des nappes par doublet de forages et pompe à chaleur.* (XIVe journées techniques du CFH, Comité Français d'Hydrogéologie, Association Internationale des Hydrogéologues, AIH, Lyon).

Jaudin F. (1988) – *Eaux souterraines et pompes à chaleur. Guide pour l'utilisation de l'eau souterraine à des fins thermiques.* (Manuels et Méthodes, n° 17, éd. BRGM, Orléans).

Lachassagne P., Wyns R., Dewandel B. (2011) - " The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to uniloading, but to weathering processes ". *Terra Nova*, 23, 145-161.

Lafitte P., Ricour J. (1956) – *La recherche minérale la plus importante de la France métropolitaine : l'eau. Rôle de l'hydrogéologue.* (Revue de l'Industrie minérale, numéro spécial IR, janvier 1956).

Lallemand-Barrès A. (1980) – *Carte des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines.* (éd. BRGM. 2e éd. en 1994 (Lallemand-Barrès A., Leteur M., et Roux J.-C.).

Lallemand-Barrès A., Roux J.-C. (1989) – *Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine.* (Éd. BRGM, Manuels et Méthodes n° 19, réédité en 1998, Manuels et Méthodes n° 33).

Lallemand-Barrès A. (1995) – T*echniques de dépollution des eaux souterraines.* (éd. BRGM, Manuels et Méthodes n° 27).

Lamarck J.-B. (1802) – *Hydrogéologie*. (Paris).

Lamblin J.-M., Traverse S. (Charbonnages de France, BURGÉAP, 1999-2000) – *Modélisation hydrodynamique, hydrogéologique et hydrochimique du bassin minier du Nord - Pas-de-Calais. Prévision de l'incidence de l'arrêt des exhaures sur les régimes des eaux superficielles et souterraines ainsi que sur les mouvements de terrain et les risques d'explosion liés au gaz* (rapport inédit).

Landreau A., Lemoine B. (1977) – *Carte des qualités chimiques des eaux souterraines en France.* (éd. BRGM).

Le Bideau L., Dudoignon P., Mas A., Pay T. (2000) – *Mécanisme de dénitrification naturelle dans la région de St-Pierre-sur-Dives : rôle de la structure oolithique de l'aquifère calcaire.* (Colloque International ESRA'2000, Eaux Souterraines en Région Agricole, Poitiers).

Lemoine P., Humery R., Soyer R. (1939) – L*es forages profonds du bassin de Paris. La nappe artésienne des Sables verts.* (Mém. Museum nat. Hist. Nat., n° 11, Paris).

Mager H. (1912) – *Hydrologie souterraine. Les moyens de découvrir les eaux souterraines et de les utiliser.* (Ed. Dunod et Pinat, Paris).

Marboutin F. (1902) – É*tudes hydrologiques. Mission Val d'Orléans. Campagne d'été 1901.* (Comm. Scient. Observatoire municipal de Montsouris, Paris).

Margat J. (1968) – *Principes d'établissement d'une nomenclature des eaux souterraines. Contribution à la mise en mémoire des informations hydrogéologiques* (Rap. BRGM 68-SGL-040-HYD).

AQUIFÈRES ET EAUX SOUTERRAINES EN FRANCE

En 1995, l'Assemblée Générale du Comité Français d'Hydrogéologie, en Avignon, a adopté le projet de réalisation d'un ouvrage de synthèse des connaissances sur les aquifères et les eaux souterraines de la France.

Cet ouvrage de référence a été élaboré entre 1998 et 2005, et rédigé principalement par 80 spécialistes de l'hydrogéologie de la France, avec la collaboration de nombreux autres hydrogéologues, issus de l'Université, d'organismes publics, de collectivités locales ou du privé.

Il décrit en douze grands chapitres les aquifères et les eaux souterraines des grands bassins sédimentaires, des chaînes alpines et pyrénéennes, et des massifs anciens. Cinq autres chapitres généraux traitent des principaux types d'aquifères, de leurs caractéristiques géologiques, hydrodynamiques et hydrogéochimiques, de la gestion et l'exploitation des eaux souterraines, des eaux minérales et thermales, des ressources géothermiques et des stockages de gaz naturel en aquifère.

Édité en deux tomes, cet ouvrage, abondamment illustré, qui comprend un millier de pages, représente un travail unique et d'une richesse exceptionnelle, une véritable encyclopédie sur les eaux souterraines en France. Pour son importance et sa qualité scientifique, il a obtenu le parrainage exceptionnel de l'Académie des Sciences.

L'ouvrage a été présenté à l'Institut, le 22 mars 2006, " Journée mondiale de l'eau " en présence de Jean Dercourt, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, et Philippe Vesseron, Président du BRGM et de nombreux collaborateurs à l'ouvrage.

Éd. BRGM/CFH, 2006

Présentation de l'ouvrage à l'Académie des Sciences
(Paris, 22 mars 2006)

De g. à dr. : J. Dercourt (Secrétaire perpétuel), J.-C. Roux (Président du CFH) et J. Margat (CFH). *F. Roux-Daudé*

De g. à dr. : J.-C. Roux, J. Dercourt, et Ph. Vesseron (Président du BRGM). *F. Roux-Daudé*

Margat J. (1968) – *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de sa cartographie* (Rap. BRGM 68-SGL-198-HYD).

Margat J. (1973) – *Utilisation des eaux souterraines.* Encyclopédie de La Pléiade, " Géologie. 2 ". (NRF, Paris).

Margat J. (1980) – *Carte hydrogéologique de la France. Systèmes aquifères à 1/1 500 000.* (éd. BRGM).

Margat J., Pennequin D., Roux J.-C. (2012) – History of French Hydrogeology, in *History of Hydrogeology*. (International to Hydrogeology, vol. 28, pp. 59-99, N. Howden and J. Mather, editors).

Mariotte E. (1686) – *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides*.

Martel E.-A. (1894) – *Les abîmes, les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie*. (Paris).

Martel E.-A. (1921) – *Nouveau traité des eaux souterraines*. (Paris).

Martel E.-A. (1925) – *Gouffre et rivière souterraine de Padirac (Lot).* (Lib. Delagrave, Paris).

Martin J.-C., Roux J.-C. (1999) – *Pollutions routières et autoroutières. Manuels et Méthodes n° 36.* (éd. BRGM,).

Matheron G. (1967) – *Éléments pour une théorie des milieux poreux.* (éd. Masson, Paris).

Mégnien Cl. et *al.* (1967) – *Possibilités aquifères des alluvions du Val de Seine entre Nogent-sur-Seine et Montereau. Résumé des recherches effectuées en 1965.* (BRGM, résumé inédit)..

Mégnien Cl., Diffre P., Rampon G. et *al.* (1970) – *Atlas des nappes aquifères de la région parisienne*. (BRGM).

Meyer R. (1955-1956) - *Étude de quelques écoulements non permanents à surface libre dans les nappes d'eau souterraines.* (La Houille Blanche N° 1, 1955, N° 5, 1955 et N° 1, 1956).

Moret L. (1946) – *Les sources thermominérales*. (Paris).

Muet P., Vier E. (2010) - *Stratégies de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable. Guide pratique.* (Éd. Agence de l'eau Adour - Garonne).

Palissy B. (1580) – *Discours admirable de la nature des eaux et fontaines.* (Martin Le Jeune, Paris).

Paloc H. (1967) – *Carte hydrogéologique de la région karstique Nord-montpelliéraine*. (Mém. BRGM n° 50).

Paramelle J.-B. Abbé (1856) (réédition en 1926) – *L'art de découvrir les sources.* (Paris).

Pennequin D., Suzanne P. et D'Arras D. (1991) – *Sophos, modèle de gestion optimale de la nappe de Croissy* (XXe journée de l'hydraulique. SHF, 29-31 janvier. Sophia-Antipolis, question III, rapport n° 3).

Perrault P. (1674) – *De l'origine des fontaines*. (Paris).

Plote H. (1986) – *Sondage de reconnaissance hydrogéologique. Méthode du marteau fond de trou.* (Manuels et Méthodes n° 12, éd. BRGM, Orléans).

Pointet T., Amaraoui N., Golaz C., Mardhel V., Pennequin D., Pinault J.-L. (2003) – *La contribution des eaux souterraines aux crues de la Somme : observations, hypothèses, modélisation.* (La Houille Blanche n° 6, 2003).

Poiseuille J. (1844) – *Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petit diamètre.* (Ac. Sc., Mémoires Savants étrangers, 9, Paris).

Pomerol Ch., Ricour J. (1992) – *Terroirs et Thermalisme en France.* (éd. BRGM).

Porchet M. (1923) – *Étude sur l'écoulement souterrain des eaux.*

Porchet M. (1930) – *Étude des eaux souterraines de la Crau.*

Quevauviller P. (2010) – *Protection des eaux souterraines. Législation européenne et avancées techniques.* (Éd. Lavoisier).

Risler J.-J. (1973) – *Carte des eaux minérales et thermales en France*. (éd. BRGM – rééditée en 1994 et 2005, Vigouroux H.).

Roche P.-A., Bravard J.-P., Descamps H., , Billen G., Pennequin D., Vindamian E., Wasson J.-G. (2004) – *Les enjeux de recherche liés à la Directive-Cadre européenne sur l'Eau.* (Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, CRAS, 2004, pp. 1-25).

Roux J.-C. *et al.* (2006) – *Aquifères et eaux souterraines en France.* (Éd. Comité Français d'Hydrogéologie/ BRGM, Orléans).

Russo Ph. (1932) – *Cours d'hydrogéologie.* (École d'hydrologie méditerranéenne, Comité d'études des eaux souterraines, Rabat).

Sanjuan B., Traineau H. (2008) – *Development of the Bouillante geothermal field* (International Geothermal Association - IGA NEWS, quaterly n° 73, juil.-sept. 2008).

Sauty J.-P. (1968) – *Étude sur modèle mathématique des nappes souterraines.* (Centro de estudios hidrograficos de Madrid).

Sauvage de Saint-Marc G., Kravtchenco J., Borelli M. (1955) – *Singularités des écoulements plans et permanents des nappes souterraines*. (La Houille Blanche N° 1, 1955).

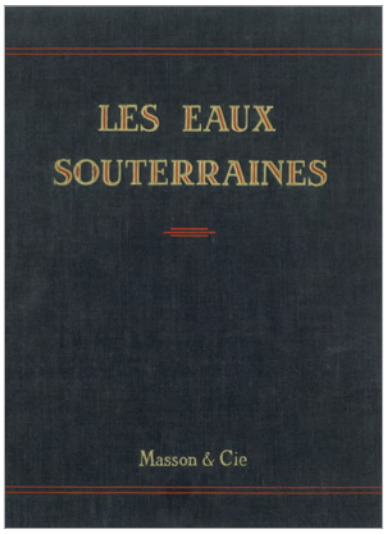
Schneebeli G. (1966) – *Hydraulique souterraine*. (Paris, Eyrolles).

Schoeller H. (1949) – *La température des eaux souterraines.* (Trav. Lab. Géol. Fac. Sc. Univ. Bordeaux, I, n° 1).

Schoeller H. (1955) – *Hydrogéologie*. (Paris, Ec. Nat. sup. pétrole, 1949, éd. Technip).

Schoeller H. (1955) – *Géochimie des eaux souterraines. Applications aux eaux des gisements de pétrole*. (Rev. Inst. Fr. Pétrole).

Schoeller H. (1959) – *Hydrologie des régions arides. Progrès récents.* (Paris, UNESCO).



Les eaux souterraines, H. Schoeller

Schoeller H. (1962) – *Les eaux souterraines*. (éd. Masson, Paris).

Schoeller H. (1973) – *Hydrogéologie*. Encyclopédie de La Pléiade, " Géologie. 2 ". (NRF, Paris).

Soulé J.-C. (1975) – *Carte hydrogéologique des Causses du Quercy.* (Éd. BRGM).

Soulé J.-C., Astruc et R. Vernet (1976) – *Hydrogéologie du département du Lot et des Causses du Quercy. Carte à 1/100 000* (Éd. BRGM/Quercy-Recherche).

Struckmeier W. & Margat J. (1995) – *Hydrogeological Maps. A guide and a standard Legend*. (International Contributions to Hydrogeology. Vol. 17, International Association of Hydrogeologists, verlag Heinz Heise, Hannover).

Tixeront J. (1950) – *Les eaux souterraines.* (L'équipement de la Tunisie, Direction des travaux publics, Tunis).

Usseglio-Polatera J.-M., Jardin P. *et al.* (1991) – *DEDALE : un système de modélisation pour la gestion des aquifères côtiers.* (XXIes Journées de l'hydraulique, Soc. hydrot. de France, Sophia Antipolis.

Vigouroux P. (2005) – *Guide qualité pour les ressources en eau minérale et thermale*. (éd. BRGM, Collection scientifique et technique).

Vigouroux R., Devernay L., Lenhardt F., Boisson M. *et al.* (2012) – *Quantitative impact assessment of an open-pit mine in south New-Caledonia, in a tropical climate and " pseudo-karstic " context*. 3rd International Feflow User Conference - Berlin.

Zaoui J. (1963) – *Calcul des débits des puits incomplets*. (La Houille Blanche, N° 5, 1963).

Zaoui J. (1965) – *Le problème de l'alimentation artificielle des nappes : puits d'injection, intervention des modèles mathématiques.* (La Houille Blanche, N° 3, 1965).

Zaoui J. (1967) – *Emploi des modèles mathématiques pour l'étude des bassins d'eaux souterraines* (Chott Chergui). (8e congrès de l'Association Internationale des Hydrogéologues, Istambul 11-15 septembre 1967).

Principales thèses en hydrogéologie (Thèses d'État ou d'Université, et habilitations à diriger des recherches)

Bakalowicz M. (1979) – *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification.* Thèse Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).

Blavoux B. (1978) – *Étude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée.* Thèse Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).

Baran N. (1996) – *Transit de l'isoproturon et de l'atrazine dans un système hydrologique karstique de la craie (Gâtinais - France) – De la station pédologique expérimentale à l'échelle du système.* Thèse Doct. Université d'Orléans.

Bonnet M. (1978) – *Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie.* Thèse doct. Ét. Université Nancy, BRGM, Doc. 34, publ. 1982, Orléans.

Bourg O. (2006) – *Caractérisation et modélisation des propriétés de transport des milieux hétérogènes.* HDR, Université de Rennes.

Collin J.-J. (1976) – *Les eaux souterraines de la plaine Saône-Doubs : gisement, hydrodynamique, hydrochimie, pollution, gestion et sauvegarde.* Thèse doct. Ét., Université de Lyon.

Combarnous M.-A. (1970 – *Convection naturelle et convection mixte en milieu poreux.* Thèse de Doctorat en Sciences Physiques de l'Université de Paris, éditée par Technip.

De Dreuzy J.-R. (2008) – *Modélisation des écoulements et du transport dans les milieux fortement hétérogènes et fracturés.* HDR, Université de Rennes.

Drogue C. (1969) – *Contribution à la connaissance quantitative des systèmes hydrogéologiques karstiques péri-méditerranéens.* Thèse doct. État, Univ. Montpellier.

Faillat J.-P. (1986) – *Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie.* Thèse Sciences, Montpellier, 536 p.

Fontes J.-Ch. (1976) – *Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : quelques aspects.* Thèse Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).

Fried J.-J. (1972) – *Études théoriques et méthodologiques de la dispersion en milieu poreux naturel.* Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Bordeaux.

Gaillard G. (1996) – *Méthode de traceurs pour la détermination des paramètres de transfert des substances en solution dans l'eau des aquifères.* Thèse Doctorat Université de Grenoble.

Guttierez A. (1994) – *Évaluation des ressources en eau souterraine de l'île de Malte*. Thèse doct. Université Paris 6.

Huneau F. (2000) – F*onctionnement hydrogéologique et archives paléo-climatiques d'un aquifère profond méditerranéen, étude géochimique et isotopique du bassin miocène de Valréas (Sud-Est de la France)*. Thèse Université d'Avignon.

Ledoux E. (1980) – *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique*. Thèse doct. ing. Univ. Paris VI, Éc. Nat. Sup. Mines Paris, Déc.

Louis C. (1976) – *Introduction à l'hydraulique des roches.* Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Paris.

Mangin A. (1975) – *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques.* Thèse Doct. État, Dijon.

Mania J. (1978) – *Gestion des systèmes aquifères. Application au Nord de la France.* Thèse de Doctorat-ès-Sciences, Université des Sciences et Techniques de Lille (1977). Mémoire n° XV, Soc. géol. Nord.

Marsily G. de (1978) – *De l'identification des systèmes hydrogéologiques.* Thèse d'État, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).

Mégnien Cl. (1979) – *Hydrogéologie du centre du Bassin de Paris.* Thèse d'État. Mémoire BRGM n° 98.

Mudry J. (1987) – *Aspects du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique du karst.* Thèse Doctorat d'État, Université de Franche-Comté, Besançon.

Olive Ph. (1970) – *Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère Nord par la méthode du tritium.* Thèse Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).

Pouchan P. (1990) – *Paléohydrogéologie et géothermalisme. Exemples de l'Aquitaine et de l'Afar.* Univ. Bordeaux 3.

Roques H. (1964) – *Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique - eau - carbonate.* Thèse Doctorat d'État.

Sauty J.-P. (1977) – *Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage.* Thèse de Docteur ingénieur, Université de Grenoble.

Simler L, Duprat A., Valentin J. (1979) – *La nappe phréatique de la plaine du Rhin en Alsace.* Thèse Ét. Univ. Louis Pasteur, Strasbourg et Doc. Cons. Europe, Groupe trav. Nappe phréatique rhénane.

Travi Y. (1988) – *Hydrogéochimie et hydrologie isotopique des aquifères fluorés du bassin du Sénégal. Origine et conditions de transport du fluor dans les eaux souterraines.* Thèse Doctorat d'État, Université de Paris Sud - Orsay.

Turc L. (1953) – *Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement.* Paris, thèse, Ann. Agron. Fr., 1954-1955.

Vachaud G. (1968) – *Contribution à l'étude des problèmes d'écoulement en milieux poreux non saturés.* Thèse de Doctorat d'État, Université de Grenoble.

Vouvé J. (1975) – *Études en hydrogéologie et paléohydrogéologie karstique*. Thèse de Doctorat d'État - Université de Bordeaux.

Lac souterrain de la grotte de Fuilla (Pyrénées Orientales). *Ph. Crochet*

Contributions françaises à l'hydrogéologie mondiale

Albinet M., Castany G. (1972) – *Évaluation rapide et cartographie des ressources en eau souterraine d'une grande région (application au Venezuela – Carte à 1/2 000 000).* (Bull. BRGM, III, 2 : 3-26, Orléans).

Ambroggi R. (1966) – *Water under the Sahara*. (Scientific American, vol. 214, n° 5).

Ambroggi R. & Margat J. (1960) – *Légende générale des cartes hydrogéologiques du Maroc / General list of conventional signs on hydrogeological maps of Moroco.* (Ed. Service géologique du Maroc, Rabat et Assoc. Int. Hydrol. Sc., publ. N° 50).

Archambault J. (1947) – *Hydrogéologie tunisienne*. (Annales des mines et de la géologie, n° 1, Direction des travaux publics, Tunis).

Archambault J. (1960) – *Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale. (*Publ. CIEH, Ouagadougou).

Banton O. (1985) – *Étude hydrogéologique d'un complexe alluvial en pays volcanique, sous climat tropical. Site du Grand-Étang – Île de La Réunion*. (Thèse de doctorat, Université de Montpellier, France, 237 p.).

Barthelemy Y. et *al.* (2006) – *Modelling of the Saq aquifer système (Saudi Arabia).*
(Aquifer Systems Management : Darcy's Legacy in a world of impending water shortage. IAH, Dijon Symposium, Taylor & Francis, 2007).

Bazin F., de Larminat R., Huber R. (1975) – *Utilisation de modèle mathématique pour apprécier la recharge annuelle ou inter-annuelle des aquifères : l'exemple des plaines de Thessalie (Grèce).* (Congrès International de l'Association Française pour l'étude des irrigations et du drainage, Moscou).

Bennani M., Larry J., Nrhira N., Bize J. (1991) – Une première au Maghreb : traitement des eaux usées urbaines par lagunage aérobie, station d'épuration de Ben Sergao.

Béraud J.-F. (1985-1986) – *Drainage et alimentation en eau de la mine de Taïba : synthèse des reconnaissances hydrogéologiques.*

Bourguet L., Camero J., Fahy J.-C., Vailleux Y. (1981) – *Méthodologie de la recherche hydrogéologique en zone de socle cristallin.*

BRGM, Services géologiques européens (1980) – *Catalogue européen des formations géologiques susceptibles de recevoir des déchets radioactifs.*

BRGM (1969-2010) – *Reconnaissances et mise en valeur du site géothermique de Bouillante* (Guadeloupe), pour production d'énergie électrique.

BRGM (1986) – *Atlas hydrogéologique de La Réunion.* (Éd. BRGM).

BRGM, GÉOHYDRAULIQUE (1986) – *Carte de potentialité des ressources en eau souterraine de l'Afrique occidentale et centrale à 1/5 000 000, 20 pays.* (CCE/CIEH).

BRGM (2007) – *Hydrogeological Map of the Sultanate of Oman, à 1/1 000 000.* (Minist. of Region. Municip. and water Resources).

BURGÉAP (1962) – *Mozambique : hydrogéologie du Sud du SAVE.* (Série de geologia y minas, memorias et communicacoes, boletin n° 30).

BURGÉAP (1982) – *Essais de débit simplifiés sur puits, application à l'évaluation du débit d'exploitation des ouvrages dans les régions à substratum cristallin.*

BURGÉAP, Compagnie générale de Géophysique – méditerranéenne géoélectrique (1984) – *Utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus.* (CIEH, série hydrogéologie).

Castany G. (1952) – *Les grands problèmes de l'hydrogéologie en Tunisie.*

Collectif, Robaux A. coord. (1952) – *Hydrogéologie du Maroc.* Monographies régionales du XIXe Congrès géologique international, n° 4, 3e série (Alger) et Notes et mém. du Service géologique du Maroc, n° 97, Rabat.

Combe M. (1976) – *Carte des systèmes aquifères du Maroc au 1/1 000 000, et Notice explicative.* (Publ. Direction de l'Hydraulique, Minist. Travaux Publics, Rabat, 43 p.).

Cornet A. (1952) – *Essais sur l'hydrogéologie du Grand Erg Occidental et des régions limitrophes*. (Trav. de l'Institut de Recherches Sahariennes, VIII, Alger).

Cornet A. (1953) – *Hydrogéologie des régions arides et subarides. (*Fasc. VIII des C.R. de la 19e Session du Congrès Géologique International, Alger).

Cornet A. (1964) – *Introduction à l'hydrogéologie saharienne.* (Rev. de Géogr. Phys. et de Géol. dyn. (2). Vol. VI, fasc. 1, Paris).

Dépagne J., Moussu H. et *al.* (1965) – *Carte hydrogéologique de la République du Sénégal à 1/500 000*. (Minist. Energie et hydraulique / BRGM, Dakar).

Durozoy G. (1957) – *Régularisation par pompage d'une source importante issue de massifs calcaires ((Aïn Bou-Merzoug près de Constantine, Algérie) équivalent à la création d'un barrage de retenue d'une capacité théorique de dix millions de m³.* (C.P. XXe Congr. Géol. intern. Sect. IV, p. 285-298, Mexico).

Eberschweiler C., Fontes J.-C. & Coudray J. (1987) – *Hydrogéologie de l'île Mayotte (Archipel des Comores).* (XXe Congrès de l'AIH, Rome).

GÉOHYDRAULIQUE (1978) – *Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest.* (Rapport CIEH, 300 p.).

Gosselin M., Schoeller H. (1939) – *Notice générale de la Carte hydrogéologique de la Tunisie au 50 000e* (Tunis).

Greigert J. (1979) – *Atlas des eaux souterraines du Niger. Cartes à 1/500 000 / 1 5 000 000.* (Minist. Mines et Hydraulique, Niamey, BRGM).

Guiraud R. (1988) – *L'hydrogéologie de l'Afrique. (Journal of African Earth Sciences*, vol. 7, n° 3, Pergamon Press).Guiraud R. et *coll.* (1990) – *Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristallophyllien, et du sédimentaire ancien de l'Afrique de l'Ouest.* (Ministère Coopération et Développement, Paris, 144 p., 2e édition revue et corrigée).

Gutierrez A. (1994) – *Évaluation des ressources en eau souterraine de l'île de Malte.* (Thèse doct. Univ. Paris VI, Paris, 326 p. + annexes).

Lemoine J., Vailleux Y., Bourguet L. (1978) – *L'équipement des villages en puits et forages en fonction des conditions hydrogéologiques dans les états A.C.P. d'Afrique : types d'ouvrages et de matériels, conditions d'emploi, études et reconnaissances préalables*. (Commission des Communautés européennes, Direction générale du Développement).

Lemoine J., Vailleux Y. (1988) – *L'expérience sahélienne de l'hydraulique villageoise : la nécessaire intégration des points d'eau dans la vie des collectivités rurales.* (Eau et développement n° 8).

Margat J. (1960) – *Carte hydrogéologique du bassin de Meknès-Fès à 1/100 000*. (Éd. Serv. Géol. Maroc, Rabat).

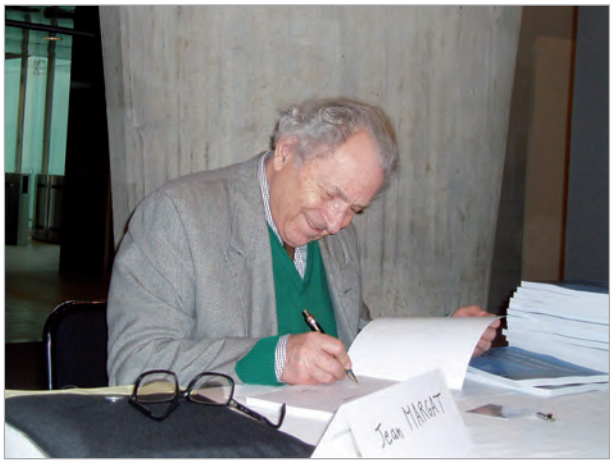
Margat J. (1961) – *Évaluation des ressources en eau souterraine en zone aride. Nappes phréatiques du Maroc pré-saharien.* (Colloque d'Athènes de l'A.I.H. " Eaux souterraines dans les zones arides ", T. I, pp. 167-171, Gentbrugge).

Margat J. (1961) – *Les eaux salées au Maroc. Hydrogéologie et hydrochimie*. (Notes Mém. Serv. Géol. Maroc).

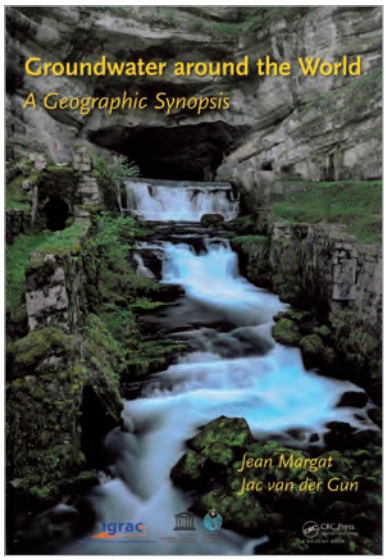
Margat J. (1962) – *Mémoire explicatif de la carte hydrogéologique de la plaine du Tafilalt et carte à 1/50 000* (2 feuilles). (Notes et mémoires du Service géologique du Maroc n° 150bis, Rabat).

Margat J. (1985) – *Groundwater conservation and protection in developed countries*. (Mém. 18e Congr. IAH, Cambridge).

Les eaux souterraines dans le monde , J. Margat



J. Margat dédicace son ouvrage, *Les eaux souterraines dans le monde* (Paris, UNESCO, 14 nov. 2008)



Groundwater around the World, J. Margat et J. van der Gun, 2013

Margat J. (1987) – Carte des ressources en eau souterraine de l'Afrique, à 1/20 000 000. (Publ. " Les eaux souterraines de l'Afrique septentrionale et occidentale ". UN/Ressources nat. Série Eau n° 18, New York).

Margat J. (1990) – Carte hydrogéologique de la République d'Haïti à 1/250 000. (UNDPO, New York).

Margat J. (1991) – *Les eaux souterraines dans le monde. Similitudes et différences*. (Soc. Hydrot. Fr., Journées Hydraul., Sophia-Antipolis, conférence n° 1).

Margat J., Plan Bleu (1998) – *Les eaux souterraines dans le bassin méditerranéen. Ressources et utilisations.* BRGM, Orléans, 110 p. (documents du BRGM, n° 282).

Margat J. (2006) – *Great aquifer systems of the world. (*Aquifer Systems Management : Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage. IAH, Dijon Symposium, Taylor & Francis, 2007).

Margat J. (2008) – *Les eaux souterraines dans le monde.* (Publ. UNESCO/PHI, BRGM).

Margat J. et van der Gun J. (2013) – *Groundwater around the World*. (Ed. Balkema).

Monition L. et Nerat de Lesguise M. (1980) – *Carte hydrogéologique et notice explicative de la région de Casablanca, au 1/50 000.* (Notes et mém. Serv. Géolog. Maroc, n° 131, Rabat).

Moullard L. (1967) – *Carte hydrogéologique du Liban, à 1/200 000*. (UNDP/ New York).

Mouton J. (1980) – *L'exploitation des eaux souterraines en Italie*. (Communic. 26e Congr. Géol. intern. Sect. 15, Paris).

Mouton J., Mangano F. (1982) – *Studio sulle risorse in acque sotteranee dell'Italia.* (CCA, EUR 79 44 IT, Bruxelles – Luxembourg. Publ. Th. Schäfer, GmbH Hannover, 193 p. + annexes).

Pallas Ph. (1980) – Water resources of the Socialist People's Libian Arab Jamahiriya, in *The Geology of Libya*, II, part. 4, Hydrogeology. (2e Sympos. Geol. Libya, Tripoli, September 1978. Ed. Al Fateh Univ. Tripoli & London Acad. Press Inc. London, pp. 539-594. Sources : Groundwater Authority (1978)).

Petit V. (1997-1999) – *Aspect hydrogéologique d'études d'impact de mines en Inde : mine de fer dans l'état de Oga, et mines de chromites à Suttinda (État d'Orissa).*

Petit V. (2000) – *Volet eaux souterraines d'une étude portant sur l'apport de l'imagerie satellitale SPOT au développement des surfaces irriguées de la province du Shandong (Sud-Est de Beijing, Chine).*

Pouchan P. & *al.* (1988) – Aspects de l'hydrogéologie de la Polynésie française. (*Hydrogéologie*, n° 2, Orléans).

Pouchan P. (1990) – *Paléohydrogéologie et géothermalisme : exemples de l'Aquitaine et de l'Afar* (Thèse Univ. Bordeaux 3).

Risler J.-J. (1962-1965) – *Recherche d'eau dans des nappes superficielles des alluvions du bassin du Lac Tchad. Mission de recherches Hydrogéologiques du Nord Cameroun.*

Risler J.-J. (1968-1970) – *Recherche et développement des aquifères superficiels dans le versant ouest des reliefs côtiers. Water Conservation and Irrigation Commission du " New Southwales " (Australie).*

Samsoen M. (1941) – *Les eaux souterraines dans les territoires du Sud* (Algérie. (Bull. Serv. Carte géol. Algérie, Alger).

Schneider J.-L. (1989) – *Géologie et hydrogéologie de la République du Tchad.* (Thèse Univ. Avignon, 3 t., 650 p.).

Schneider J.-L. (2001) – *Carte de valorisation des eaux souterraines de la République du Tchad*. (Ministère de l'Environnement et de l'Eau, carte à 1/500 000 N'Djamena).

Schneider J.-L. (2001) – *Géologie, Archéologie, Hydrogéologie* (de la République du Tchad). (Ministère de l'Environnement et de l'Eau, 2 vol., 1100 p., N'Djamena).

Schoeller H. (1970) – *Les principaux problèmes d'évaluation des eaux souterraines et de ses mouvements à l'échelle continentale et à l'échelle mondiale*. (C.R. Symp. Reading Assoc. Intern. Hydrol. Sci.).

Seguin J.-J. (2005) – *Carte hydrogéologique de l'Afrique à 1/10 000 000.* (BRGM, RP-54404, Orléans).

Stieltjes L. (1988) – Hydrogéologie de l'île volcanique océanique de Mayotte (archipel des Comores, 0céan Indien occidental). (*Hydrogéologie*, n° 2, pp. 135-151, BRGM, Orléans).

Taltasse P. (1953) – *Recherches géologiques et hydrogéologiques dans le bassin de Fès-Meknès (Maroc).* (Thèse doct. Univ. Paris, 1950, Notes Mém. Serv. Géol. Maroc n° 115, Rabat).

Vigouroux R., Devernay L., Lenhardt F., Boisson M. *et al.* (2012) – *Quantitative impact assessment of an open-pit mine in south New-Caledonia, in a tropical climate and " pseudo-karstic " context*. (3rd International Feflow User Conference - Berlin).

Zaoui J. (1967) – *Emploi des modèles mathématiques pour l'étude des bassins d'eaux souterraines (Chott Chergui).* (8e congrès de l'Association Internationale des Hydrogéologues, Istambul 11-15 septembre 1967).

Principales réunions hydrogéologiques en France

1957 - Premier congrès de l'AIH à Paris.

1960 - " L'hydraulique souterraine ". (6es journées de l'hydraulique, Société hydrotechnique de France, Nancy, 28-30 juin 1960. Actes 2 vol. publ. " La Houille blanche ", Grenoble).

1969 - Congrès national d'hydrogéologie. Journées Henri Schoeller. (Bordeaux, Mars-Av. 1969. Publ. Mémoires du BRGM n° 76, Orléans).

1971 - Premier colloque " Hydrogéologie en pays calcaire. (Université de Besançon, Besançon, 8-9 oct. 1971). Doc. BRGM ER 1971). (Au cours des années suivantes, ces colloques ont été organisés tous les 4 à 5 ans en alternance avec l'Université de Neufchâtel (Suisse).

1974 - " Colloque international ". Xe Congrès de l'AIH. (BRGM, Montpellier, Sept. 1974).

1977 - Colloque national " Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine ". (Service géologique national / BRGM, Orléans, 1-2 mars 1977. Actes 2 vol.).

COLLOQUE DE NICE
LE DOSSIER DU JOUR
Les eaux souterraines :
un trésor qu'il faut "mettre à flot"
LE MONDE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES
L'ALIMENTATION EN EAU DE LA FRANCE
Colloque du service géologique national à Nice
Les eaux souterraines en France :
un trésor pour demain
Un trésor «underground» méconnu :
28/10/77

«Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France» (Nice, oct. 1977). Articles dans la presse locale.

1977 - Colloque national " Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France ". (BRGM, Nice, 27-28 oct. 1977. Actes éd. BRGM).

1978 - Colloque régional " Hydrogéologie de la Craie du Bassin de Paris ". (BRGM, Rouen, 25-26 mai 1978). Actes Doc. BRGM n° 1 et 3).

1978 - Symposium " Implications de l'hydrogéologie dans les autres sciences de la Terre ". (Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 11-16 sept. 1978. Actes publ. 2 vol., Mém. CERGH, 1980).

1979 - Colloque national " Connaître le sous-sol, un atout pour l'aménagement urbain ". (BRGM, Lyon, 13-15 mai 1979. Actes Doc. BRGM n° 29).

1982 - Colloque national. Jubilé scientifique de G. Castany " Les milieux discontinus en hydrogéologie ". (BRGM, Orléans, 16-17 novembre 1982. Actes éd. BRGM).

1986 - Journées " Eaux thermales et minérales ". (BRGM, Orléans-La Source, 28-29 janv. 1986. Actes Doc. 87 SG/N 220 EAU, av. 1986).

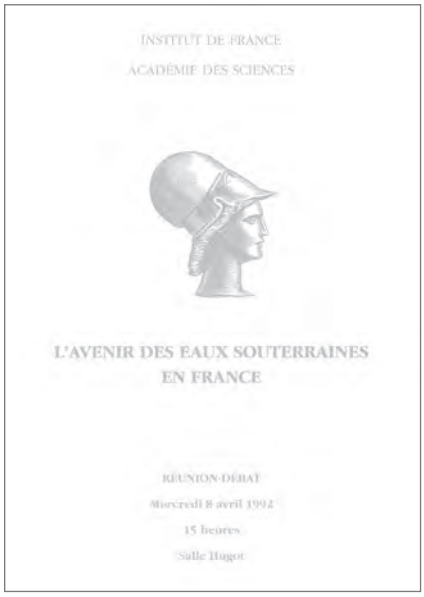
1988 - Colloque international " Hydrogéologie et Sûreté des dépôts de déchets radioactifs et industriels toxiques ". (AIH, Orléans, 7-10 juin 1988. Actes Doc. BRGM n° 160 et 161).

1990 - Colloque " L'eau souterraine. Un patrimoine à gérer en commun ". (BRGM, Paris, 6-7 nov. 1990. Actes 2 vol. Doc. BRGM n° 195).

«L'eau souterraine, un patrimoine à gérer en commun» (Paris, nov. 1990)

1990 - Colloque Recherche et Environnement " Eaux Souterraines ". (CNRS, La Part-Dieu, Lyon, 17-18 déc. 1990,).

1992 - Réunion - débat " L'avenir des eaux souterraines en France ". (Académie des Sciences, Paris, 8 avril 1992).


INSTITUT DE FRANCE
ACADÉMIE DES SCIENCES

L'AVENIR DES EAUX SOUTERRAINES EN FRANCE

RÉUNION-DÉBAT
Mercredi 8 avril 1992
15 heures
Salle Hugot

«L'avenir des eaux souterraines» (Académie des Sciences, 8/4/1992). Programme de la réunion-débat

1993 - Colloque national " L'Hydrogéologie au XXIe siècle " en hommage à G. Castany. (CFH/AIH, Paris, 24 nov. 1993).
Première journée technique du Comité Français d'Hydrogéologie. Par la suite des journées techniques ont été organisées par le CFH, généralement chaque année. (Les 19es journées techniques du CFH se sont tenues à Bordeaux, du 30 mai au 2 juin 2013, à l'occasion du 25e anniversaire de la disparition du Professeur H. Schoeller, sur le thème "Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?").

1995 - Colloque d'hydrotechnique " connaissance et valorisation des nappes profondes ". (Société hydrotechnique de France, 152e session du Comité Scientifique et Technique, Paris, 15-16 nov. 1995. Actes publ. SHF).

1996 - Colloque international " Les eaux souterraines en région agricole, ESRA 1996 ". (Université de Poitiers, Poitiers, sept. 1996).

1996 - Séminaire national " Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique ". (BRGM/ Ministère de l'Environnement/Agences de l'eau, 27-29 nov. 1996, Montpellier).

1997 - Séminaire " Les eaux souterraines et leurs qualités ". (Agence de l'eau Seine-Normandie / SAGEP, 4-5 mars 1997, Fontainebleau).

2000 - Colloque d'hydrotechnique " Protection des eaux souterraines ". (Société hydrotechnique de France, 163e session du Comité Scientifique et Technique, Paris, 10-11 mai 2000. Actes publ. SHF).

2000 - Colloque international " Les eaux souterraines en région agricole, ESRA 2000 ". (Université de Poitiers, Poitiers, sept. 2000).

2001 - Colloque international " 7e colloque d'hydrogéologie en pays calcaire ". (Université de Franche-Comté, Besançon, sept. 2001.

2006 - Colloque international " 50e anniversaire de l'Association Internationale des Hydrogéologues " - " 150e anniversaire de la Loi de Darcy " et " Gestion des grands aquifères ". (BRGM/ AIH-CFH, Dijon, 30 mai-1er juin 2006).

2006 - Colloque national " Périmètres de protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine ". (Direction Générale de la Santé, Paris, 18 oct. 2006).

2008 - Colloque national " Hydrogéologie et Karst, au travers des travaux de Michel Lepiller ". (CFH/ AIH. Polytech. Univ. d'Orléans, 16-17 mai 2008).

2010 - Conférence internationale " Aquifères transfrontaliers/ISARM 2010 ". (UNESCO, Paris, 6-8 déc. 2010).

2011 - 24e Conférence Régionale Européenne de l'ICID " Groundwater 2011. Gestion des ressources en eau souterraine ". (AFEID, Orléans, 14-16 mars 2011).

2011 - Colloque international " H2Karst, 9e colloque d'hydrogéologie en pays calcaire ". (Université de Franche-Comté, Besançon, 1er-3 sept. 2011).

Hydrogéologie de la Craie du Bassin de Paris (Rouen, mai 1978).
De G. à Dr. J. Colliot (DRIR/HNO), G. Lienhardt (BRGM), A. Bettencourt (Président de la Région Haute-Normandie), Ch. Pomerol (Président de l'AGBP et J.-C. Roux (Directeur BRGM/SGR/PNO).
BRGM/PNO

«L'avenir des eaux souterraines» (Paris, 8/4/1992)
De G. à Dr. : M. Rapinat (CGE), J.-C. Roux (BRGM), F. Tenière-Buchot (AESN), C. Guillemin (BRGM), Ph. Rocard (SEI), J. Vial (CSHPF).
BRGM/PNO

«Hydrogéologie et Surêté des dépôts de déchets radioactifs et industriels toxiques» (Orléans, juin 1988). Les congressistes.
Au 1er rang au centre, de G. à Dr. : 1- J. Margat, 2- H. Astié (BRGM), 3- Mme André-Jehan (ANDRA) et 4- G. Castany (Président du CFH)

«L'hydrogéologie au XXIe siècle» - Hommage à G. Castany (Paris, 24/11/1993)
De G. à Dr. : G. de Marsily (Univ. Paris 6), J.-C. Roux (Secrétaire du CFH), J. Margat (Président du CFH),. *BRGM*

«L'hydrogéologie au XXIe s.»
De G. à Dr. : P. Roussel (Direction de l'Eau), Cl. Lefrou (BRGM), Jean Ricour (ancien du BRGM). *BRGM*

Colloque CFH d'Avignon (1995)
B. Blavoux (à G.) et J. Margat. *J.-C. Roux*

«Qualité des eaux souterraines», Paris 1997.
De G. à Dr. : J. Margat (Président du CFH), J.-C. Roux (Secrétaire du CFH), D. Tricard (DGS),
G. Duermael (BRGM). *J.J. Risler*

Colloque International « 50e anniversaire de l'AIH » et « 150e anniversaire de la loi de Darcy »

Dijon, 30 mai - 1er juin 2006

Assemblée générale de l'AIH. 2e à G. : S. Foster (Président de l'AIH). À Dr. : W. Struckmeïer (Secrétaire général de l'AIH). A l'extrême Dr. : A. Skinner (Secrétaire de l'AIH). *J.-C. Roux*

Cérémonie d'ouverture. A la tribune : S. Foster (Président de l'AIH). *P. Marchet*

Cérémonie de clôture. De g. à Dr. : Mme A. Aureli (UNESCO), S. Foster (Président AIH), D. Houssin (Directeur BRGM), A. Rebsamen (Maire de Dijon), J.-C. Roux (Président du CFH), G. de Marsily (Univ. Paris 6). *P. Marchet*

Les congressistes devant le palais des Congrès de Dijon. *P. Marchet*

L'HOMMAGE DES HYDROGÉOLOGUES À HENRY DARCY

À l'occasion du Colloque hydrogéologique international " Gestion des grands aquifères ", tenu à Dijon du 30 mai au 1er juin 2006 pour célébrer le 50e anniversaire de l'Association Internationale des Hydrogéologues, et le 150e anniversaire de la loi de Darcy, une cérémonie s'est déroulée au square Darcy, au cours de laquelle une plaque commémorative a été apposée sur le réservoir de l'aqueduc de la source du Rosoir, en hommage aux travaux du célèbre ingénieur, en présence de la famille d'Henry Darcy, des représentants du maire de Dijon, F. Rebsamen, des présidents de l'AIH, S.-D. Foster, et du CFH, J.-C. Roux, et de l'ensemble des participants au colloque.

Hommage à Henry Darcy

Dijon, 30 mai 2006

Allocution de Jean Darcy, arrière-arrière-petit-neveu d'Henry Darcy. A G., l'Adjoint au Maire de Dijon et S. Foster (AIH), à Dr., J.-C. Roux (Président du CFH). *F. Roux-Daudé*

Inauguration de la plaque commémorative. *F. Roux-Daudé*

La plaque commémorative des œuvres d'Henry Darcy apposée sur le réservoir

J. Margat (ancien président du CFH), J.-C. Roux (Président CFH) et A. Askew (AIHS) devant la plaque commémorative d'Henry Darcy. *F. Roux-Daudé*

L'assistance lors de la cérémonie. *F. Roux-Daudé*

ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADES	Accès aux Données sur les Eaux Souterraines
AEP	Alimentation en Eau Potable
AFD	Agence Française de Développement
AFEID	Association Française pour l'Etude de l'Irrigation et du Drainage (ICID)
AFME	Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie
AGBP	Association des Géologues du Bassin de Paris
Agences de l'eau :	
AG	Adour-Garonne
AP	Artois-Picardie
LB	Loire-Bretagne
RM	Rhin-Meuse
RM&C	Rhône-Méditerranée & Corse
SN	Seine-Normandie
AHSP	Association des Hydrogéologues des Services Publics
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
AIH	Association Internationale des Hydrogéologues
AISH	Association Internationale des Sciences Hydrologiques
ANDRA	Agence Nationale des Déchets Radioactifs
ANRED	Agence Nationale pour la Récupération des Déchets
ARS	Agence Régionale de Santé
BAD	Banque Africaine de Développement
BCEOM	Bureau Central d'Études pour les Équipements d'Outre Mer (EGIS international depuis 2008)
BICHE	(modèle) : " BIlan CHimique des Eaux "
BIRH	Bureau d'Inventaire des Ressources Hydrauliques (Tunisie)
BOAD	Banque Ouest Africaine de Développement
BRGG	Bureau de Recherches Géologiques et Géophysiques
BRGGM	Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BRL	Bas-Rhône Languedoc
BSGF	Bulletin de la Société Géologique de France
BSS	Banque des Données du Sous-Sol (BRGM)
BURGÉAP	Bureau de Recherches de Géologie Appliquée
CASPAR	Caractérisation d'Aquifères Semi-Profonds Armoricains
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CEFIREN	Centre Franco-Indien de Recherche sur l'Environnement
CEFIRES	Centre Franco-Indien des Eaux Souterraines
CEMAGREF	Centre d'Études du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et Forêts (devenu IRSTEA)
CERG	Centre d'Études et de Recherches Géologiques
CERGA	Centre d'Études et de Recherches de Géologie Appliquée
CERH	Centre d'Études et de Recherches Hydrogéologiques
CETE	Centre d'Études Techniques de l'Équipement
CFC	Chloro-Fluo-Carbure
CFG	Compagnie Française de Géothermie
CFH	Comité Français d'Hydrogéologie
CGE	Compagnie Générale des Eaux
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
CIEH	Comité Interafricain d'Études Hydrauliques (Ouagadougou)
CIG	Centre Informatique de Géologie (École des Mines de Paris)
CLE	Commission Locale de l'Eau
CNR	Compagnie Nationale du Rhône
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COMEX	Compagnie Maritime d'Expertise
CORPEN	Comité d'ORientation pour les Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement
CPGF	Compagnie de Prospection Géophysique Française

CRAS	Comptes-rendus de l'Académie des Sciences
CRG	Centre de Recherches de Géodynamique (Université Paris 6 - Thonon-les-Bains)
CSHPF	Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
DATAR	Délégation à l'Aménagement du Territoire et des Régions
DCE	Directive Cadre Européenne sur l'Eau
DDAF	Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts
DDASS	Direction Départementale d'Action Sanitaire et Sociale
DDT	Direction Départementale des Territoires
DEA	Diplôme d'Études Approfondies
DESS	Diplôme d'Études Supérieures Spécialisées
DGRST	Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique
DGS	Direction Générale de la Santé
DHI	Décennie Hydrologique Internationale
DICA	Direction des Carburants (devenue par la suite Direction des HYdroCArbures : DHYCA)
DIREN	Direction Régionale de l'Environnement
DREAL	Direction Régionale de l'Écologie, de l'Aménagement et du Logement
DRIR	Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche (puis DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement)
DUP	Déclaration d'Utilité Publique
EDF	Électricité de France
EPOCH	Programme de Recherche de la CEE
ENGREF	École Nationale du Génie Rural et des Forêts
ENSG	École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy
ENSMP	École Nationale Supérieure des Moteurs et du Pétrole
EPIC	Établissement Public à vocation Industrielle et Commerciale
ERESS	Évaluation des Ressources en Eau du Sahara Septentrional
ERH	Évaluation des Ressources hydrauliques
ESRA	Eaux Souterraines en Région Agricole
FAD	Fonds Africain de Développement
FAO	Food and Agriculture Organization
FED	Fonds Européen de Développement
FNDAE	Fonds National pour le Développement de l'Alimentation en Eau potable
GDF	Gaz de France
GEFLI	Groupement d'Étude Français en Libye
GIF	Géologues Indépendants de France
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GRECO	Groupement de Recherches Coordonnées (CNRS)
HPA	Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICID	International Commission of Irrigation and Drainage
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IFARE	Institut Franco-Allemand de Recherche sur l'Environnement
IFEN	Institut Français de l'Environnement (intégré au SOeS en 2008)
IFP	Institut Français du Pétrole (IFPE Énergies Nouvelles depuis 2010)
IGAN	Institut de Géologie Appliquée de Nancy
IMFS	Institut de Mécanique des Fluides de Strasbourg
INGRI	Institut National de Recherches Géophysiques Indien
INPG	Institut National Polytechnique de Grenoble
IMPL	Institut National Polytechnique de Lorraine
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IRD	Institut de Recherches scientifiques pour le Développement en coopération (ex. ORSTOM).
IRH	Inventaire des Ressources Hydrauliques
ISARM	International Shared Aquifer Resources Management
ISSEP	Institut Scientifique de Service Public (Belgique)
ITGE	Institut Technologique Géologique d'Espagne
LCHF	Laboratoire Central d'Hydraulique de France
MARCEAU'S	" Modèle d'Analyse et de Recherche sur la Communication des Eaux Souterraines "
MDPA	Mines De Potasse d'Alsace
MEDAD	Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durable
MEDALUS	Mediterranean Environnment Desertification and Land Use
MEDD	Ministère de l'Écologie et du Développement Durable
OHV	Composés Organiques Halogénés Volatils

OMM	Organisation Météorologique Mondiale
OMVSS	Office de Mise en Valeur du Sahara Septentrional
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
ONEP	Office National de l'Eau Potable (Maroc)
ONQUES	Observatoire National de la Qualité des Eaux Souterraines
ORSTOM	Office de Recherches Scientifiques et Techniques d'Outre Mer (IRD depuis 1998)
PHI	Programme Hydrologique International (UNESCO)
PIREN	Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement
POLMAR	POLlution MARine
PNSE	Plan National Santé Environnement
RAPSODI	Recherche d'Aquifères Profonds dans le Socle du Département d'Ille-et-Vilaine
RMP	Résonance Magnétique Protonique
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SCET	Société Centrale d'Équipement du Territoire
SCGAL	Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SEI	Service de l'Environnement Industriel (Ministère de l'Environnement)
SEQ eaux	Système d'Évaluation de la Qualité des eaux
SESAME	" Simulation des Écoulements de Solutés dans les Aquifères par un Modèle Equimultiple " (modèle)
SGAL	Service Géologique d'Alsace et de Lorraine
SGR	Service Géologique Régional
SHF	Société Hydrotechnique de France
SIG	Système d'Information Géographique
SILURES	Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer français
SOeS	Service d'Observations et Statistiques du Ministère de l'Écologie.
SOGREAH	Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques
SPEPE	Service pour l'Étude des Problèmes de l'Eau
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRAE	Service Régional d'Aménagement des Eaux
UFG	Union Française des Géologues
UNDP	United Nations Development Programme
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture
VIKING	" Vitesses Continues Interpolées dans une Grille " (modèle)
WRC	Water Research Center (Grande-Bretagne)
ZNS	Zone Non Saturée
ZRE	Zone de Répartition des Eaux

Source intermittente de Fontestorbes (Arriège). *P. Cabrol*

Achevé d'imprimer en octobre 2013
sur les presses de CORBET (45160)

Dépôt légal : octobre 2013

Imprimé en France

Composition et mise en pages CORBET

HISTOIRE DE L'HYDROGÉOLOGIE FRANÇAISE

Né à Paris en 1924, licencié-es-sciences (Université de Paris 1946) et ingénieur-géologue (Ecole de Nancy 1947), **Jean Margat** a découvert et amorcé la profession d'hydrogéologue au Maroc, à partir de 1947, au Centre des Etudes Hydrogéologiques du Service Géologique. Puis au BRGM, à partir de 1961 il fonde le Département d'Hydrogéologie dont il a lancé et dirigé les activités d'études et de recherches en France et outre-mer, et il s'est particulièrement voué à la méthodologie, à la cartographie, à l'économie et aux comptes de l'eau, et aux synthèses mondiales. Expert auprès d'organisations internationales, il s'est consacré aussi à la formation et à la vulgarisation. Son dernier ouvrage est « Les eaux souterraines dans le monde » (UNESCO/BRGM), et il a reçu en 2008 le prix international d'Hydrologie décerné par l'UNESCO, l'OMM et l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques.
Il a été Vice-président de l'AIH (1989-1996) et Président du Comité Français d'Hydrogéologie (1993-2001).

Né à Bruxelles en 1956, **Didier Pennequin** a fait ses études supérieures aux Etats-Unis où il a obtenu, en 1978, un « Bachelor of Science » en sciences de la terre et en espagnol et, en 1982, un Master of Science en géologie de l'Université du Wisconsin – Madison. Après sa thèse et un passage de quelques années au « Water Resources Center » du Wisconsin comme chercheur, il termine ses études en France à l'Ecole Supérieure d'Electricité où il reçoit son diplôme en informatique en 1985. Il rentre à ARLAB en 1985, puis à la SAFEGE en 1986, où il dirige une activité de modélisation mathématique et mène des projets dans les domaines de l'eau et de l'environnement.
En 2001 il rejoint le BRGM comme « Chef du Service Eau » dont il développe fortement l'activité et contribue à son rayonnement en Europe et sur la scène internationale. Durant cette période il s'intéresse à différents sujets incluant la mise en œuvre de la législation européenne sur l'eau, la prévision des crues, la réutilisation des eaux usées, la socio-économie de l'eau, la gestion transfrontalière des ressources en eau et la gouvernance de l'eau. Il intervient souvent dans le cadre des Nations-Unies sur ces sujets. Depuis 2012, il dirige la direction régionale de Haute-Normandie du BRGM.
Il a contribué à plusieurs ouvrages et publié une quarantaine d'articles scientifiques et techniques et a été Vice-président Europe de l'AIH (2006-2012).

Né à Paris en 1936, **Jean-Claude Roux** fait ses études de géologie à l'Université de Paris. Licencié- es- sciences en 1960, il obtient en 1963 le grade de Docteur 3e cycle en Hydrogéologie. Entré au BRGM dès cette date il fonde en 1964 le Service Géologique Régional Picardie où il crée, notamment, le Bassin hydrogéologique expérimental de l'Hallue représentatif de la nappe de la craie dans la Somme. Directeur du SGR Picardie-Normandie de 1968 à 1978 il développe dans ces Régions les inventaires et la cartographie des eaux souterraines, l'exploitation des ressources aquifères, l'étude de leur vulnérabilité aux pollutions et les premiers réseaux de contrôle des nappes .
En 1980, il est nommé Chef du premier département « Environnement » du BRGM et se consacre plus particulièrement aux études d'impacts, de pollutions des eaux souterraines, de stockages de déchets industriels et urbains, et d'assainissements non collectifs. De 1993 à 1995, il est Chargé de mission « Eau » à la Direction du Service Public du BRGM. Auteur de plusieurs ouvrages traitant de la prévention des pollutions des eaux souterraines et des captages d'eau destinés à la consommation humaine, il a coordonné le rapport n°29 de l'Académie des Sciences « Pollution des eaux souterraines en France » (1991) et « Aquifères et eaux souterraines en France » (2006).
Il a été Secrétaire (1993-2001) puis Président (2002-2009) du Comité Français d'Hydrogéologie.

Couverture :
Fontaine du Puits artésien de Grenelle, place de Breteuil à Paris en 1880 *(gravure d'époque)*.

Comité Français d'Hydrogéologie
c/o BRGM/Direction D3E - 3, avenue Claude Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2
contact@cfh-aih.fr

© CFH 2013
Tous droits de reproduction et d'adaptation réservés

ISBN 978-2-9530816-7-1

Prix : 28 €