



COLLOQUE

Géologie et Hydrogéologie du Bassin de Paris

En hommage à Claude Mégnien

16 et 17 Novembre 2004

Ministère de la Recherche

1, rue Descartes 75005 PARIS

Onzièmes journées techniques du Comité Français de
l'Association internationale des Hydrogéologues

Journées thématiques de l'Association
des Géologues du Bassin de Paris

Séance spécialisée de la Société Géologique de France

PARRAINAGES

Agence de l'eau Loire-Bretagne
Agence de l'eau Seine-Normandie
BRGM
Compagnie générale des eaux
Lyonnaise des eaux
Ministère de la Recherche
SAGEP



COLLOQUE
16-17 Novembre 2004
PARIS

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE
DU BASSIN DE PARIS
Avancées et perspectives

En Hommage à Claude Mégnien

11^{èmes} journées techniques du
Comité Français d'Hydrogéologie
de l'Association Internationale des Hydrogéologues

Séance spécialisée de la Société Géologique de France

Journées thématiques de l'Association des Géologues du Bassin de Paris

Avec le parrainage de
Agence de l'Eau Loire - Bretagne
Agence de l'Eau Seine - Normandie
BRGM
Générale des Eaux
Lyonnaise des Eaux
Ministère de la Recherche
SAGEP

Conception et réalisation de la maquette de couverture :

GEOHYD
Parc Orléans Sologne, 386 rue du Rond d'eau
45075 ORLEANS cedex 2

Impression :

Service Reprographie du BRGM
Avenue Claude Guillemin BP 6009
45060 ORLEANS cedex 2

**COLLOQUE 16-17 NOVEMBRE 2004
PARIS**

Ministère de la Recherche
1, rue Descartes
75005 Paris

**GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE
DU BASSIN DE PARIS
Avancées et perspectives**

Colloque en hommage à Claude MÉGNIEN

*Sous la présidence d'honneur de Monsieur Hubert CURIEN
Ancien ministre chargé de la Recherche*

11èmes journées techniques du Comité français de l'Association Internationale des
Hydrogéologues

Séance spécialisée de la Société Géologique de France

Journées thématiques de l'Association des Géologues du Bassin de Paris

Secrétaire du colloque
Jacques LAUVERJAT

COMITÉ SCIENTIFIQUE

J. CHOROWICZ	Université Paris VI
B. DEFFONTAINES	Université de Marne la vallée
A. DESSÈVRE	DIREN de Bassin Seine - Normandie
J. GAUDANT	Président AGBP
F. HANOT	BRGM Service Cartographie et géologie
J. MARGAT	Président honoraire du CFH/AIH
T. POINTET	BRGM Service Eau
J.-C. ROUX	Président du Comité français de l'AIH
P. DE WEVER	Président de la SGF
M. VILLEY	BRGM Service de l'Action Régionale

COMITÉ D'ORGANISATION

L. CHERY	BRGM - Secrétaire du CFH/AIH
J. LABOURGUIGNE	AGBP
J. LAUVERJAT	CFH/AIH – Secrétaire général du colloque
J. LORENZ	AGBP
B. LECLERC	Trésorier du CFH/AIH
J.-C. ROUX	Président du Comité français de l'AIH

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE DU BASSIN DE PARIS

Avancées et perspectives

Le Bassin de Paris est une des régions de France où les recherches géologiques et hydrogéologiques ont été les plus anciennes et les plus nombreuses.

Sur le plan géologique, plusieurs formations de ce bassin sont à l'origine de stratotypes de référence mondiale, et une importante synthèse dirigée par Cl. MÉGNIEN a été publiée à l'occasion du Congrès Géologique International de 1980.

Sur le plan hydrogéologique, plusieurs aquifères superposés (Calcaires jurassiques, Sables de l'Albien, Craie du Crétacé supérieur, Sables et Calcaires du Tertiaire) constituent des ressources en eau considérables pour tous les usages et certaines d'entre elles des ressources ultimes en cas de pollution majeure.

Parmi eux, les nappes de l'Albien et du Cénomaniens, de la Craie, de la Beauce et de la Brie ont fait l'objet, dans la deuxième moitié du XXe siècle, d'études approfondies tant du point de vue quantitatif que qualitatif, en utilisant les méthodes les plus modernes.

Actuellement leur gestion prévisionnelle et la protection de leur qualité font l'objet d'une attention toute particulière de la part des pouvoirs publics.

Enfin, les aquifères du Bassin de Paris tiennent une place prépondérante dans l'ouvrage sur les eaux souterraines de la France en cours de publication sous l'égide du Comité Français d'hydrogéologie de l'AIH.

L'objectif de ce colloque, organisé en hommage à Claude MÉGNIEN, géologue et hydrogéologue de terrain, dont la carrière a été essentiellement consacrée au Bassin de Paris, est d'informer les chercheurs et praticiens, les responsables de l'aménagement du territoire et de la gestion des eaux souterraines sur les travaux les plus récents, les perspectives d'avenir et les applications dans les différents domaines.

La diffusion des connaissances acquises dans les divers domaines sera traitée en évoquant les vecteurs de transmission des connaissances.

Un temps sera réservé aux débats pour dégager des axes d'études et de recherches complémentaires.

Huit sessions ont été retenues :

Session 1 - Nouveaux apports des forages profonds

Session 2 - Le Jurassique

Session 3 - Une ressource ultime : les aquifères de l'Albien, du Néocomien et du Cénomaniens

Session 4 - Les apports de la géomorphologie et de la télédétection

Session 5 - La Craie

Session 6 - Le calcaire de Champigny

Session 7 - Le Calcaire de Beauce

Session 8 - Nouveaux concepts et axes de recherches

Le bureau du Comité Français de l'AIH



« Géologie et Hydrogéologie du Bassin de Paris Avancées et perspectives »

Colloque en hommage à Claude MEGNIEN

16 et 17 NOVEMBRE 2004

PARIS

Onzièmes journées techniques du
Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des
Hydrogéologues

Séance spécialisée de la Société Géologique de France

Journées thématiques de l'Association des Géologues du Bassin de Paris

Ministère de la Recherche
1 Rue Descartes, 75005 PARIS
Amphithéâtres Gay-Lussac et Poincaré



Programme de la première journée : AMPHI GAY-LUSSAC

- 8 h 15 Accueil des participants
- 9 h 00 *Ouverture du Colloque* par Jean-Claude ROUX, Président du Comité français de l'AIH
Intervention de Hubert CURIEN, Ancien Ministre de la Recherche
Regards sur la carrière de Claude MEGNIEN par Jean LABOURGUIGNE
- 9 h 30 **Session 1 : Nouveaux apports des Forages Profonds**
Président de séance : M. Patrick DE WEVER, Président de la SGF
- La susceptibilité magnétique : nouvel outil d'analyse cyclostratigraphique des séries sédimentaires mésozoïques. Exemple du Lias du forage GPF de Sancerre-Couy (Cher, France).
Bruno GALBRUN, Emilia HURET, Pierre- Yves COLLIN
- Corrélations à très haute résolution et analyse cyclostratigraphique des séries callovo-oxfordiennes des forages ANDRA du site de Bure (Est du bassin de Paris) : apport des mesures de susceptibilité magnétique.
Emilia HURET, Pierre - Yves COLLIN, Bruno GALBRUN, Slah BOULILA, Pascal ELION, Christian RAVENNE
- Les apports récents de la géologie et de l'hydrogéologie aux projets industriels.
Yves GROS, Michel VANDENBEUSCH
- 10 h 30 Pause
- 11 h 00 **Session 2 : Le Jurassique**
Président de séance : Mme Jacqueline LORENZ, AGBP
- L'Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris : corrélations des épisodes récifaux entre la Lorraine et la Bourgogne.
Cédric CARPENTIER, Bertrand MARTIN-GARIN
- Apport des investigations multi - échelles pour la construction d'un modèle conceptuel des plate-formes carbonatées de l'Oxfordien moyen et supérieur de l'Est du Bassin de Paris.
Georges VIGNERON, Jacques DELAY, Marc DISTINGUIN, Patrick LEBON, Alain TROUILLER
- Problématique de gestion des nappes libres du Jurassique à l'étiage ; cas de la Champagne Berrichonne et du Poitou.
Pascal BILLAULT, Frédéric VERLEY
- 12 h 00 Remise des prix Castany et Archambault 2004

- 13 h 00 Déjeuner
- 14 h 30 **Session 3 : Une ressource ultime, les aquifères profonds**
Président de séance : M.LANDAIS, Agence de l'Eau Seine - Normandie
- Approche par la géochimie de l'hydrodynamisme de la nappe de l'Albien dans le Bassin de Paris.
Yann RAOULT, Jacques LAUVERJAT, Jacques BOULEGUE, Philippe OLIVE
- La nappe de l'Albien- Néocomien, sauvegarde et mise en valeur d'une ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable de secours.
Philippe VERJUS
- Programme d'études et de modélisation pour la gestion de la nappe des sables du Cénomaniens.
Pascal BILLAULT, Marc BOISSON, Noëlle DOUCET
- Inventaire et évaluation des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin de Paris.
Jean-François VERNOUX
- 15 h 30 Pause
- 16 h 00 **Session 4 : Les apports de la télédétection. Relations nappes- rivières.**
Président de séance : Jean GAUDANT, Président de l'AGBP
- Télédétection spatiale : nouvelles perspectives en sciences et en géologie. Exemple du bassin de Paris.
Jean-Paul DEROIN
- Analyse de la contribution des nappes aux débits d'étiage du bassin de la Seine.
Pascal VIENNOT, Emmanuel LEDOUX, Eric GOMEZ, Agnès DESSEVRE
- Remontées de nappes et crues : mécanismes et cartographie des zones sensibles.
Thierry POINTET, Hubert MACHARD de GRAMONT, Vincent MARDHEL
- Les apports de l'interférométrie radar pour les études de géomorphologie et hydrogéologie : quelques exemples d'applications.
Benoît DEFFONTAINES
- Trois précurseurs français de l'Hydrogéologie.
Jean GAUDANT
- 17 h 00 Fin de la première journée
- 17 h 30 **Assemblée Générale du Comité Français d'Hydrogéologie de l'AIH**

Programme de la deuxième journée : AMPHI POINCARE

- 9 h 00 **Session 5 : La Craie**
Président de séance : Jean-Claude ROUX, Président du Comité Français d'Hydrogéologie
- 9 h 00 Projet Craie : corrélation stratigraphique et diagenèse de la Craie du Bassin de Paris ; applications hydrogéologiques.
Franck HANOT
- 9 h 30 L'alimentation en eau de Paris.
Jean-Michel BARBIER
- La protection des captages d'eaux souterraines de la SAGEP.
Gilbert FOURNOL
- Un exceptionnel laboratoire d'étude de la genèse des aquifères karstiques : la craie du Bassin de Paris (Normandie, Perche, Gâtinais, Forêt d'Othe).
Michel LEPILLER
- 10 h 15 Pause
- 10 h 45 **Session 6 : Eocène supérieur / Oligocène inférieur**
Président de séance : Pierre-Alain ROCHE
- La nappe des calcaires de Champigny, une ressource sous haute surveillance.
Anne REYNAUD
- Influence de la Seine sur le champ captant de Boissise-la-Bertrand (Seine-et-Marne)
Ari AKOUVI, Anne TRIGANON, Géraldine BOUTILLOT, Jean-Pierre GRIBET, Jacques LAUVERJAT
- Accroissement récent des teneurs en sulfates dans la nappe des sables de Fontainebleau, origines et implications pour la gestion de cette ressource.
Vincent SCHNEIDER, Florent BARBECOT, Laurent BERGONZINI, Christelle MARLIN, Marc MARSAULT, Laurent DEVER
- 11 h 45 Présentation des posters
- 13 h 00 Déjeuner
- 14 h 30 **Session 7 : Le calcaire de Beauce**
Président de séance : Thierry POINTET, BRGM
- Litho- stratigraphie et géométrie des corps sédimentaires composant le système aquifère de Beauce.
Denis GIOT, Yves - Michel LE NINDRE

Réalimentation du calcaire de Beauce à travers les sables et argiles de la Sologne.

Philippe OLIVE

L'élaboration d'un modèle mathématique de gestion de la nappe de Beauce : enjeux, difficultés, résultats, perspectives.

Marc BONNET, Lionel DEMONGODIN, Pascal BILLAULT

Piézométrie et gestion de la nappe.

Pascal BILLAULT, Frédéric VERLEY, Gilles CHERIER, Philippe VERJUS

15 h 30 Pause

16 h 00 **Session 8 : Nouveaux concepts et axes de recherches**

Président de séance : M. Michel VILLEY, BRGM

Applications de la méthode de Sondage par Résonance Magnétique.

Jean-François GIRARD, Jean-Michel BALTASSAT, Anatoly LEGCHENKO, Jean-Michel VOUILLAMOZ, Stéphane SABATIER, Dominique CHIGOT, Jean-Claude SCHMIDT

Les occurrences de sélénium dans les forages d'alimentation en eau de la région parisienne : origine et perspectives d'études.

Laurence CHERY, Maryse ROUELLE-CASTREC

Référentiel géologique. Validation des données du sous-sol (forages sismiques); applications hydrogéologiques.

Franck HANOT

Evaluation du risque de non atteinte des objectifs de bon état qualitatif et quantitatif des masses d'eau souterraines du Bassin Seine- Normandie.

Cécile GARNIER, Agnès DESSEVRE

17 h 15 Clôture du colloque

La communication en Sciences de la terre.

Jacqueline LORENZ, AGBP

Session de posters

Pollution de la nappe libre de la Craie.

P. BENOIT, B. STAVOT

Apport de la micro granulométrie à la connaissance du fonctionnement hydrologique d'un aquifère crayeux karstique.

M. FOURNIER, N. MASSEI, L. DUSSART-BATISTA, M. BAKALOWICZ, J. RODET, J.P. DUPONT

Les méthodes multi - tableaux : une alternative à l'analyse factorielle des données environnementales (application à la géochimie d'un système karstique crayeux du bassin de Paris).

M. FOURNIER, M. AUBERT, N. MASSEI, L. DUSSART-BATISTA, M. BAKALOWICZ, J. RODET, J.P. DUPONT

Géochimie de la craie campano- maestrichtienne et événement dolomitique.
L. LE CALLONNEC, P. BENOIT, M. RENARD

Hypothèses sur la dolomitisation de la craie à partir des forages 701 et 702.
J.P.GELY, P. BLANC

Claude Mégnier (1933-2003)

Claude Mégnier nous a quitté le 17 janvier 2004 et ce jour-là Géochronique a perdu celui qui fut l'animateur de cette revue depuis sa création, en 1982, en tant que rédacteur en chef au titre du BRGM puis de la SGF.

Claude Mégnier est né le 24 juin 1933 à Saint-Maur-des-Fossés (94). Ce lieu restera son point d'attache toute sa vie.

Il fit ses études primaires et secondaires à Saint-Maur, au lycée Marcellin Berthelot, où les cours de géologie, en quatrième, lui donnèrent le goût pour cette discipline, son professeur étant André de Cayeux.

Claude a été formé à l'Université de Paris où il passera le SPCN puis les différents certificats de licence (Géologie générale, Géographie physique et géologie dynamique, Minéralogie, Géodynamique externe et Géologie appliquée) avant de soutenir, en 1960, un doctorat de 3^e cycle en hydrogéologie intitulé « Observations hydrogéologiques sur le Sud-Est du Bassin de Paris. Les circulations aquifères dans le Jurassique et le Crétacé de l'Yonne ».

Ses qualités ayant été remarquées au cours d'un stage au BRGM, en 1954, il fut engagé par cet organisme en 1955, bien que n'ayant pas encore satisfait à ses obligations militaires.

D'abord hydrogéologue il fut rapidement chargé du laboratoire de sédimentologie.

De retour du service militaire, les connaissances acquises dans le bassin de Paris le désignèrent tout naturellement pour être chargé, en 1962, de la création et de la direction du Service Géologique Régional du bassin de Paris où il constitua une équipe dynamique et fortement motivée d'une quarantaine d'agents. C'est en tant que directeur de ce service que toutes les qualités de Claude s'épanouirent : liaisons avec le monde scientifique, les élus régionaux et l'ensemble des services administratifs. Son attrait pour le terrain se traduit par un investissement dans la cartographie géologique et l'étude des faciès récifaux jurassiques.

Son activité dans le domaine de la géologie appliquée fut aussi primordiale. Il mit ses compétences d'hydrogéologue au service de la ville de Paris qui désirait réaménager son alimentation en eau, notamment dans la moyenne vallée de la Seine, où les travaux étaient en concurrence avec les exploitations de graviers. Ce travail déboucha, en 1970, sur la publication de l'« Atlas des nappes aquifères de la région parisienne ».

A la même époque, il mène parallèlement, la rédaction d'une thèse d'Etat « Hydrogéologie du centre du bassin de Paris » soutenue, en 1976, à l'université P. et M. Curie.

Cette même année, Claude fut nommé sous-directeur au Service Géologique National (SGN) à Orléans. Commence alors pour lui une nouvelle carrière en liaison avec la direction du SGN. A ce poste il gère et coordonne diverses activités : carte géologique de la France, carte géologique des marges continentales, documentation géologique mondiale, banque des données du sous-sol, service d'édition et de vente des publications du BRGM.

Il prend une part active à la préparation et à l'organisation du Congrès géologique international de 1980 et, à cette occasion, l'ampleur des connaissances acquises conduit naturellement Claude à assurer la coordination, en collaboration avec son épouse Françoise, de cette œuvre majeure qu'est la synthèse du Bassin de Paris. Plus de cent collaborateurs participèrent à la rédaction des trois volumes toujours largement consultés.

De 1984 à 1987 il est détaché au Secrétariat d'Etat aux risques majeurs où il est nommé conseiller scientifique au cabinet d'H. Tazieff puis de G. Renon.

De 1982 à 1992 il coordonne le programme pluridisciplinaire Géologie profonde de la France. Quatre forages profonds seront réalisés (Echassières, Cézallier, Sancerre-Couy, Ardèche) auxquels participeront des chercheurs de tous horizons.

Il termine sa carrière au BRGM comme adjoint au directeur du SGN de 1989 à 1992. C'est alors qu'il développe une activité de consultant auprès de diverses collectivités de la région Ile-de-France. Durant toutes ces années il assurera un rôle d'hydrogéologue agréé.

L'amitié et la passion pour la géologie sont des traits essentiels de la personnalité de Claude Mégrien. Dès son entrée au BRGM, il était clair qu'il ferait équipe avec ses collègues tant au plan scientifique qu'au plan humain. Cette première impression était la bonne et s'est vérifiée durant toute sa carrière par l'activité intense qu'il a déployée dans le cadre associatif jusqu'à ses derniers jours.

Géologue « retraité » mais toujours passionné, il s'intéressa au problème d'anomalies géophysiques dans la craie du bassin de Paris révélé par les recherches pétrolières. Il réussit à trouver les crédits pour effectuer deux forages de 700 m, entièrement carottés. Sous l'égide de l'Association des géologues du Bassin de Paris il anima une équipe pluridisciplinaire pour étudier les matériaux recueillis, les présenter au cours d'un colloque à l'Académie des sciences et en publier les résultats un an après la fin des travaux.

Claude était un géologue au sens global du terme. Son exigence et sa rigueur scientifiques l'ont conduit à donner une place prépondérante aux observations de terrain qui venaient toujours à l'appui de ses raisonnements et de ses conclusions. L'observation naturaliste était pour lui fondamentale. En témoigne notamment la grande qualité de ses travaux cartographiques dans l'Yonne.

Au cours de sa carrière il a exploré une grande partie des disciplines relevant des Sciences de la Terre jusqu'à, et y compris, les derniers développements liés à l'informatique, gardant cependant un esprit critique vis-à-vis de cette nouvelle approche de la géologie qui le conduisait à retourner à la vérité du terrain. Pour lui, l'ordinateur ne pouvait pas remplacer le marteau.

Il a su faire partager son enthousiasme à de nombreux collègues d'horizons très variés, les incitant à s'engager dans de grands projets tels que la synthèse du Bassin de Paris, le programme Géologie Profonde de la France et, plus récemment, Craie 700 qui ont été menés à bien grâce à son amicale ténacité.

Son besoin de communiquer, de faire partager ses connaissances l'on conduit à beaucoup donner dans le milieu associatif : Société Géologique de France, Association des Géologues du Bassin de Paris, Comité pour le Patrimoine Géologique, entre autres. Nombre de ses idées ont débouché sur des activités et des programmes de recherche, au sein de ces associations.

Ses qualités pédagogiques se sont manifestées tout au long de sa carrière par la qualité et la clarté de ses exposés, illustrés de manière très didactique rendant accessible au plus grand nombre des sujets parfois ardu ; quelques coups de craie au tableau pouvaient suffire. Il eut l'occasion de le manifester en tant que chef de travaux à l'Ecole nationale du Génie rural et chargé de cours à l'Université P. et M. Curie.

Il aimait réaliser des modèles. Il n'y a pas une nappe phréatique du Bassin de Paris qui n'ait eu sa représentation analogique, son bloc diagramme. Ces éléments ayant été des outils très précieux pour l'élaboration des modèles mathématiques qui sont venus après.

C'est encore ce souci constant de rendre la géologie accessible au plus grand nombre qui l'a conduit avec son ami et complice Claude Lorenz à fonder, il y a maintenant plus de vingt ans, la revue Géochronique. Il n'a eu de cesse d'améliorer le contenu et la présentation de cette revue aidé par une équipe d'amis, se réunissant tous les lundis, recrutés dans des milieux très divers : enseignants, chercheurs, ingénieurs pétroliers, collègues du BRGM et de l'ANDRA.

Son vaste réseau de connaissances dans les divers milieux des Sciences de la Terre a beaucoup contribué à la diversification et à l'enrichissement des sujets abordés dans les dossiers de Géochronique.

Il est difficile d'évoquer les nombreuses facettes de sa personnalité sans retenir comme point fort l'exigence de qualité qu'il a toujours manifestée dans toutes ses activités. Il ne se contentait jamais de

l'à peu près. Peut-être était-ce sa passion pour les forages profonds qui le conduisait à vouloir toujours aller au fond des choses.

Nous, ses amis, avons été fiers de travailler à ses côtés avec le désir partagé de servir la géologie pour le plus grand nombre. Il restera pour nous une référence constante.

Ses amis et collègues, en particulier ceux de l'équipe de Géochronique garderont le souvenir d'un homme chaleureux et fidèle en amitié qui animait les rencontres par sa bonne humeur en alimentant la nôtre par de petites histoires qu'il tirait d'un stock apparemment inépuisable.

J. Labourguigne, J. Lorenz et J. Ricour

Claude Mégnier et le Comité Français d'Hydrogéologie de l'AIH

Notre collègue, Claude MÉGNIEN, nous a quittés le 17 janvier 2003, dans sa 70^{ème} année, à l'issue d'une longue maladie.

Après des études universitaires à la Sorbonne où il obtint une licence ès Sciences, il fit partie de la première promotion du Laboratoire de Géologie dynamique, option hydrogéologie et présenta en 1960, une thèse de 3^{ème} cycle « Observations hydrogéologiques dans le Sud-Est du Bassin de Paris » sous la direction de G. Castany. En 1979, il obtenait le grade de Docteur d'État en soutenant une thèse sur « L'hydrogéologie du Centre du Bassin de Paris ».

De 1962 à 1976, il fut le fondateur et le directeur du Service géologique régional Bassin de Paris du BRGM, à Brie-Comte-Robert, où il donna, notamment, un essor considérable à l'hydrogéologie de cette région. Parmi les nombreux travaux d'hydrogéologie qu'il initia et dirigea pendant cette période, nous retiendrons 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 aquifères de la Région parisienne.

Les travaux de Claude MÉGNIEN ne se sont pas limités à l'hydrogéologie puisque, géologue à part entière, il contribua au levé de plusieurs cartes géologiques dans le Sud-Est du Bassin de Paris, dirigea le programme « Géologie profonde de la France », coordonnant les travaux de forages, la synthèse et la publication, et fut Président du programme international de corrélation géologique. En 1998, il initia et dirigea un programme de reconnaissance stratigraphique par forages dans la craie profonde de la Région de Provins.

Claude MÉGNIEN effectua la quasi-totalité de sa carrière au BRGM où il assura successivement, outre celle de Directeur du S.G.R. Bassin de Paris, les fonctions de Sous-Directeur du Service géologique national (1977-1980), membre du Directoire du Service Géologique National (1981), Président du Conseil Scientifique (1982), Directeur du programme Géologie Profonde de la France (1982-1992).

De 1984 à 1987, il occupa le poste de Directeur adjoint à la Délégation aux Risques majeurs, puis celui de Conseiller scientifique au Cabinet du Secrétaire d'État aux Risques Majeurs.

Il s'intéressa activement aussi aux actions de communication et de promotion de la géologie en créant notamment la revue "Géochronique" en 1982, dont il fut le rédacteur en chef, périodique qui lui tenait particulièrement à cœur et auquel il se consacra pendant plus de 20 ans.

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).

Claude MÉGNIEN était un meneur d'hommes, sachant persuader et communiquer son dynamisme à ses collaborateurs, dans la bonne humeur mais aussi avec rigueur. Il avait la passion d'entreprendre et de réussir, n'hésitant jamais à se remettre en question quand il le fallait. 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.

À sa retraite, après 1994, Claude MÉGNIEN resta très actif dans les domaines de la géologie et de l'hydrogéologie, étant expert de la S.A.G.E.P. pour la protection et le développement des ressources en eau souterraine de la ville de Paris, hydrogéologue agréé, rédacteur en chef de Géochronique. En mai 2000, il organisait le colloque « Craie 700 » à l'Académie des Sciences.

Infatigable, il ne ménageait pas ses efforts pour atteindre les objectifs qu'il s'était fixés et il est resté à sa table de travail jusqu'au bout de ses forces.

Claude MÉGNIEN était Chevalier dans l'Ordre du Mérite National, Lauréat du prix Gosselet de la S.G.F. (1993) et du Prix Castany de l'A.I.H. (1998).

Tous ceux qui l'ont bien connu savent combien il était bon vivant, avait le sens de l'humour et maniait la plaisanterie avec brio. Beaucoup d'entre nous se souviennent encore de l'ambiance qu'il donnait lors des sorties géologiques de l'A.G.B.P., des réunions de chefs de S.G.R. des années 60-70 et, plus récemment, de l'excursion hydrogéologique de l'A.I.H. en Irlande en 1998.

À son épouse Françoise, également géologue, qui l'a toujours soutenu dans ses nombreuses activités, nous exprimons toute notre sympathie, et à Claude, nous disons un adieu, triste et amical, avec toute notre gratitude pour le rôle majeur qu'il a joué dans la promotion des eaux souterraines de la France. Son souvenir restera gravé dans nos mémoires, et pour tous les hydrogéologues, son nom restera dans les annales de l'hydrogéologie du Bassin de Paris.

Jean-Claude ROUX



Claude MÉGNIEN lors de la remise du Prix Castany le 27 novembre 1998 au Ministère de la Recherche, entouré : de gauche à droite par M. LEPILLER, J.-C. ROUX, N. BARAN et J. MARGAT



Claude MÉGNIEN à la Chaussée des Géants (Irlande) lors de l'excursion AIH en avril 1998

Géologie et Hydrogéologie du Bassin de Paris. Avancées et perspectives.

Colloque en hommage à Claude MEGNIEN

16 - 17 NOVEMBRE 2004

SOMMAIRE

	Pages
Session 1 : Nouveaux apports des Forages Profonds	21
La susceptibilité magnétique : nouvel outil d'analyse cyclostratigraphique des séries sédimentaires mésozoïques. Exemple du Lias du forage GPF de Sancerre-Couy (Cher, France). Bruno GALBRUN, Emilia HURET, Pierre- Yves COLLIN	23
Corrélations à très haute résolution et analyse cyclostratigraphique des séries callovo-oxfordiennes des forages ANDRA du site de Bure (Est du bassin de Paris) : apport des mesures de susceptibilité magnétique. Emilia HURET, Pierre- Yves COLLIN, Bruno GALBRUN, Slah BOULILA, Pascal ELION, Christian RAVENNE	31
Les apports récents de la géologie et de l'hydrogéologie aux projets industriels. Yves GROS, Michel VANDENBEUSCH	39
Session 2 : Le Jurassique	45
L'Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris : corrélations des épisodes récifaux entre la Lorraine et la Bourgogne. Cédric CARPENTIER, Bertrand MARTIN-GARIN	47
Apport des investigations multi- échelles pour la construction d'un modèle conceptuel des plateformes carbonatées de l'Oxfordien moyen et supérieur de l'Est du Bassin de Paris. Georges VIGNERON, Jacques DELAY, Marc DISTINGUIN, Patrick LEBON, Alain TROILLER	55
Problématique de gestion des nappes libres du Jurassique à l'étiage ; cas de la Champagne Berrichonne et du Poitou. Pascal BILLAULT, Frédéric VERLEY	63
Session 3 : Une ressource ultime, les aquifères profonds	67
Approche par la géochimie de l'hydrodynamisme de la nappe de l'Albien dans le Bassin de Paris. Yann RAOULT, Jacques LAUVERJAT, Jacques BOULEGUE, Philippe OLIVE	69
La nappe de l'Albien- Néocomien, sauvegarde et mise en valeur d'une ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable de secours. Philippe VERJUS	75
Programme d'études et de modélisation pour la gestion de la nappe des sables du Cénomaniens. Pascal BILLAULT, Marc BOISSON, Noëlle DOUCET	85

Inventaire et évaluation des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin de Paris. Jean-François VERNOUX	91
Session 4 : Les apports de la télédétection. Relations nappes - rivières.	99
Télédétection spatiale : nouvelles perspectives en sciences et en géologie. Exemple du bassin de Paris. Jean-Paul DEROIN	101
Analyse de la contribution des nappes aux débits d'étiage du bassin de la Seine. Pascal VIENNOT, Emmanuel LEDOUX, Eric GOMEZ, Agnès DESSEVRE	111
Remontées de nappes et crues : mécanismes et cartographie des zones sensibles. Thierry POINTET, Hubert MACHARD de GRAMONT, Vincent MARDHEL	119
Session 5 : La Craie	121
Projet Craie : corrélation stratigraphique et diagenèse de la Craie du Bassin de Paris ; applications hydrogéologiques Franck HANOT	123
L'alimentation en eau de Paris Jean-Michel BARBIER	127
La protection des captages d'eaux souterraines de la SAGEP. Gilbert FOURNOL	133
Session 6 : Eocène supérieur / Oligocène inférieur	141
La nappe des calcaires de Champigny, une ressource sous haute surveillance. Anne REYNAUD	143
Influence de la Seine sur le champ captant de Boissise-la-Bertrand (Seine-et-Marne) Ari AKOUVI, Anne TRIGANON, Géraldine BOUTILLOT, Jean-Pierre GRIBET, Jacques LAUVERJAT	153
Accroissement récent des teneurs en sulfates dans la nappe des sables de Fontainebleau, origines et implications pour la gestion de cette ressource. Vincent SCHNEIDER, Florent BARBECOT, Laurent BERGONZINI, Christelle MARLIN, Marc MARSAULT, Laurent DEVER	159
Session 7 : Le calcaire de Beauce	165
Litho- stratigraphie et géométrie des corps sédimentaires composant le système aquifère de Beauce. Denis GIOT, Yves- Michel LE NINDRE	167
Réalimentation du calcaire de Beauce à travers les sables et argiles de la Sologne. Philippe OLIVE	173
L'élaboration d'un modèle mathématique de gestion de la nappe de Beauce : enjeux, difficultés, résultats, perspectives. Marc BONNET, Lionel DEMONGODIN, Pascal BILLAULT	175
Piézométrie et gestion de la nappe. Pascal BILLAULT, Frédéric VERLEY, Gilles CHERIER, Philippe VERJUS	185

Session 8 : Nouveaux concepts et axes de recherches	191
Applications de la méthode de Sondage par Résonance Magnétique. Jean-François GIRARD, Jean-Michel BALTASSAT, Anatoly LEGCHENKO, Jean-Michel VOUILLAMOZ, Stéphane SABATIER, Dominique CHIGOT, Jean-Claude SCHMIDT	193
Les occurrences de sélénium dans les forages d'alimentation en eau de la région parisienne : origine et perspectives d'études. Laurence CHERY, Maryse ROUELLE-CASTREC	197
Référentiel géologique. Validation des données du sous-sol (forages sismiques) ; applications hydrogéologiques Franck HANOT	205
Evaluation du risque de non atteinte des objectifs de bon état qualitatif et quantitatif des masses d'eau souterraines du Bassin Seine- Normandie. Cécile GARNIER, Agnès DESSEVRE	211
Posters	221
Pollution de la nappe libre de la Craie. P. BENOIT, B. STAVOT	223
Apport de la micro granulométrie à la connaissance du fonctionnement hydrologique d'un crayeux karstique. M. FOURNIER, N. MASSEI, L. DUSSART-BATISTA, M. BAKALOWICZ, J. RODET, J.P. DUPONT	225
Les méthodes multi- tableaux : une alternative à l'analyse factorielle des environnementales (application à la géochimie d'un système karstique crayeux du bassin de Paris M. FOURNIER, M. AUBERT, N. MASSEI, L. DUSSART-BATISTA, M. BAKALOWICZ, J. RODET, J.P. DUPONT	233
Géochimie de la craie campano- maestrichtienne et événement dolomitique. L. LE CALLONNEC, P. BENOIT, M. RENARD	243
Hypothèses sur la dolomitisation de la craie à partir des forages 701 et 702. J.P.GELY, P. BLANC	251

SESSION 1

Nouveaux apports des forages profonds

La susceptibilité magnétique (SM) : nouvel outil d'analyse cyclostratigraphique des séries sédimentaires mésozoïques. Exemple du Lias du forage GPF de Sancerre-Couy (Cher, France).

Bruno Galbrun¹, Emilia Huret¹, Pierre-Yves Collin^{1,2}

¹ Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, FR CNRS 32 « CEPAGE - Centre Parisien de Géologie », case 117, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 5, France.

² UMR CNRS 5143 « Paléobiodiversité & Paléoenvironnements »

bgalbrun@ccr.jussieu.fr

I. INTRODUCTION – PROBLEMATIQUE

Les propriétés magnétiques des sédiments et séries sédimentaires sont de plus en plus utilisées pour tracer les changements paléoenvironnementaux dus à la variabilité climatique. En effet, à ces changements sont associés divers processus d'altération et d'érosion, ainsi que divers modes de transport et de dépôt ; il en résulte selon les environnements une grande variabilité des types de sédiments et de leurs contenus en minéraux magnétiques (nature et quantité) [1-3]. Le magnétisme environnemental, est devenue une discipline à part entière des Sciences de la Terre et son application est commune pour l'analyse des séries récentes éoliennes, lacustres ou pélagiques.

Le paramètre utilisé en premier lieu est la susceptibilité magnétique (SM) en champ faible, dite aussi susceptibilité magnétique initiale, qui traduit essentiellement la concentration en minéraux magnétiques. Dans les sédiments marins, ces minéraux sont (1) divers oxyde de Fer ferrimagnétiques telle la magnétite (et les titanomagnétites) détritiques, et (2) des minéraux paramagnétiques comme les argiles, les silicates ferromagnésiens (biotite, olivine...), la pyrite [4-5]. Ces minéraux paramagnétiques de faible SM sont les principaux porteurs de la SM dans les calcaires, les marnes, les grès argileux... La calcite, le quartz, la matière organique et l'eau, sont diamagnétiques (ils présentent une très faible SM négative) et ont tendance à diminuer la valeur globale d'un échantillon calcaire ou gréseux. Les fluctuations de la SM dans une série sédimentaire reflètent donc essentiellement les variations en apports détritiques, et par le biais des processus d'altération continentale elles sont donc représentatives des évolutions climatiques, elle mêmes régies par les paramètres de l'orbite terrestre (précession, obliquité, excentricité). En effet on observe dans les séries récentes, que les fluctuations observées dans les paramètres magnétiques, telle la SM, sont le plus souvent cycliques, et sont parfaitement corrélées avec la courbe d'insolation calculée à partir de l'évolution des paramètre orbitaux. Ainsi ces fluctuations peuvent être utilisées pour l'analyse d'une série sédimentaire comme un réel outil chronostratigraphique à haute résolution. Ce type d'applications sur des séries mésozoïques n'en est qu'à ses débuts [6-7], mais se développe car la SM est facilement mesurable en laboratoire, voire sur le terrain, les mesures sont très précises et sensibles au moindre changement minéralogique, non destructives et très rapides [8]. Cette technique est donc particulièrement adaptée à une étude cyclostratigraphique très haute résolution qui peut nécessiter plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de mesures. Ainsi une nouvelle discipline émerge, la *MSEC* (*Magnetosusceptibility Event and Cyclostratigraphy*) [4], que l'on pourrait traduire simplement par SMEC (Susceptibilité Magnétique Et Cyclostratigraphie).

Nous avons tenté une telle approche sur le Lias du forage GPF de Sancerre-Couy (Cher,

France) et en particulier sur le Toarcien. Nos objectifs étaient multiples :

- élaborer une méthodologie rapide et fiable de mesure de la SM sur un forage mésozoïque,
- comprendre les liaisons entre variations de la SM et changements lithologiques,
- apprécier la pertinence de l'outil SM dans une série marneuse ou argileuse homogène,
- analyser les évolutions à long terme et les fluctuations haute fréquence de la SM,
- utiliser ces dernières comme outil chronostratigraphique et estimer ainsi la durée de l'étage Toarcien.

II. LE FORAGE GPF DE SANCERRE-COUY

II.1 Le Lias du forage de Sancerre-Couy

Le forage de Sancerre-Couy se situe dans le Sud du Bassin de Paris, entre Bourges (Cher) et la Charité-sur-Loire (Nièvre) sur la commune de Couy. Il a été foré en 1986 dans le cadre du programme *Géologie Profonde de la France* et avait pour but la reconnaissance de l'anomalie magnétique du bassin de Paris. Ce sondage a traversé 940 m de sédiments, à partir de la base du Callovien, avant d'atteindre le socle ; le Lias y est épais de 360 m [9].

Le Toarcien est épais de 157 mètres. Après une dizaine de mètres plutôt calcaires à son sommet, il est essentiellement constitué d'argilites micacées grises à noires sur près de 100 m, puis est plutôt marneux à sa base. De nombreuses ammonites ont été récoltées dans cette série et toutes les zones d'ammonites du Toarcien sont représentées bien que leurs limites ne puissent pas toujours être placées avec précision. Le Pliensbachien (84 m.), très riche en ammonites également, est constitué de marnes plus ou moins calcaires. Le Sinémurien (68 m.) est constitué d'alternances marno-calcaires, le faciès calcaire prédominant à sa base.

Le forage se présente sous forme de carottes de 8 cm de diamètre, la récupération est proche de 100 %, il est stocké au BRGM à Orléans.

II.2 Réalisation des mesures de SM

Les mesures de SM ont été réalisées directement sur la surface de la carotte avec une sonde Bartington MS2-E1 qui est couramment utilisée pour l'analyse haute résolution des carottes de sédiments récents marins ou lacustres [10]. Cette sonde a une résolution spatiale selon un rectangle de 3.8 mm sur 10.5 mm (soit une surface de 0.4 cm²), une mesure est théoriquement possible tous les 5 mm. Le système Bartington a une sensibilité théorique de 1x10⁻⁶ SI.

Nous avons tout d'abord mesuré selon un intervalle de 1 cm, quatre segments de quelques mètres représentatifs des différentes lithologies rencontrées dans le Lias : 6 m de calcaires et 6 m d'alternances marno-calcaires dans le Sinémurien, 12 m de marnes à la limite Domérien-Toarcien, 12 m d'argilites dans le Toarcien supérieur. Ces tests avaient pour but de comprendre les variations de la SM en fonction des changements lithologiques majeurs, mais aussi d'éventuels changements non visibles à l'œil (fig. 1).

Puis nous avons entrepris l'analyse de l'ensemble de la série toarcienne argilo-marneuse avec un intervalle de mesure de 4 cm : ainsi plus de 4000 mesures ont été effectuées. De même, une centaine d'échantillons prélevés régulièrement le long de la série a été mesurée avec un susceptomètre de laboratoire KLY-2 afin de vérifier la qualité des mesures réalisées avec la sonde MS2-E1. Deux types de variations apparaissent dans cette série toarcienne : des évolutions à long terme plurimétriques (fig. 2) et des fluctuations haute fréquence apparemment de différentes périodes de quelques dizaines de centimètres (fig. 1b).

III. RESULTATS

III.1. Variations de la SM et changements lithologiques

Les analyses sur les intervalles tests permettent d'affirmer :

- que la SM des faciès mesurés est très faible : inférieure à 5×10^{-5} SI dans les calcaires et guère plus que 20×10^{-5} SI dans les faciès argileux (fig. 1a). Ceci est conforme au comportement magnétique des différents minéraux, la calcite est diamagnétique (très faible SM négative) et les minéraux argileux sont paramagnétiques (faible SM positive),
- la SM est très sensible au moindre changement lithologique, visible à l'œil ou non. Elle est due essentiellement aux minéraux paramagnétiques argileux, comme l'attestent les courbes d'hystérésis que nous avons tenté d'établir sur quelques échantillons,
- les alternances marno-calcaires sont parfaitement mises en évidence par les variations de la SM, et le caractère très progressif d'un passage marne-calcaire est très bien marqué (fig. 1a),
- la sonde Bartington MS2-E1 est très fiable, présentant un degré de précision réel de l'ordre de 1×10^{-6} SI, ce qui est établi par les nombreux tests de reproductibilité que nous avons effectués, et confirmé par les variations très progressives de SM lors d'un passage marne-calcaire,
- dans les alternances marno-calcaires du Sinémurien les valeurs de SM des bancs calcaires sont homogènes, alors que les valeurs de SM dans les interbancs argileux présentent des fluctuations (fig. 1a),
- dans les formations marneuses et argileuses, homogènes, du Domérien et du Toarcien, des fluctuations à hautes fréquences de la SM sont bien marquées et apparaissent cycliques (fig. 1b).

III.2. Variations de la SM à long terme au cours du Toarcien

Un découpage séquentiel est proposé sur cette série toarcienne à partir de l'analyse sédimentologique (faciès, figures sédimentaires). L'évolution à long terme de la SM, traduisant les variations lithologiques fines, semble confirmer ce schéma en se corrélant avec les cycles majeurs transgressif-regressif de 2^{ème} et 3^{ème} ordre, selon un modèle simple : la diminution de l'intensité de la SM traduit les phases régressives et l'augmentation, les phases transgressives (fig. 2). Ce découpage séquentiel proposé à partir des fluctuations de la SM sur le forage de Sancerre-Couy est conforme au découpage séquentiel régional pour le Toarcien [11], et complète ce qui avait initialement été proposé sur le forage à partir des données diagraphiques [12].

III.3. Variations haute fréquence de la SM : analyse cyclostratigraphique du Toarcien

Les fluctuations à haute fréquence ont été analysées par analyse spectrale, technique de base dans les études cyclostratigraphiques [13]. De nombreux tests ont été réalisés en faisant varier l'épaisseur de l'intervalle étudié (de 5 à 20 m), en utilisant différents lissages des données... Les résultats essentiels de cette analyse cyclostratigraphique sont :

- trois périodicités/cyclicités dominantes existent tout au long de la série du Toarcien (fig. 3),

- l'épaisseur de ces périodicités évolue au long de la série (0.3 à 0.6 m, 0.5 à 1 m., 1 à 2 m.), les variations du taux de sédimentation peuvent ainsi être estimées,
- l'analyse du rapport de fréquence de ces cyclicités [6] permet de les rapporter aux durées des périodes orbitales du Jurassique inférieur (précession à 18100 et 21600 ans, obliquité à 36900, excentricité à 95000 ans),
- ces cycles, essentiellement ceux d'obliquité, après un lissage modéré des valeurs de SM, sont bien reconnaissables le long de la série (fig. 4), ils peuvent donc être comptés, et connaissant la durée d'un cycle, il est aisé d'estimer des durées,
- la durée de l'ensemble du Toarcien peut ainsi être estimée à 8.3 Ma ce qui est tout à fait conforme à la durée estimée par les rares données radiochronologique disponibles sur le Jurassique [14].

IV. CONCLUSION -PERSPECTIVES

Les conclusions de notre étude sont à la fois d'ordre méthodologique et propres au Toarcien du forage de Sancerre-Couy :

- la SM est un outil très prometteur pour l'analyse sédimentologique à haute résolution des séries sédimentaires mésozoïques car il est très dépendant des variations lithologiques fines, et permet même de mettre en évidence des variations dans des faciès apparemment homogènes comme des marnes ou des argilites. C'est également un outil rapide et facile à mettre en œuvre,
- la SM est un outil fiable pour l'analyse séquentielle des séries mésozoïques,
- les fluctuations de la SM permettent une analyse cyclostratigraphique des séries mésozoïques de faciès homogène, et peuvent être utilisées comme outil chronostratigraphique à haute résolution,
- la sonde Bartington MS2-E1, utilisée jusqu'à présent sur des sédiments récents, est adaptée à l'analyse de séries sédimentaires mésozoïques en forage,
- la durée de l'étage Toarcien a pu être estimée à 8.3 Ma. L'estimation de la durée des étages du Mésozoïque, des zones d'ammonites, de la durée de n'importe quel phénomène enregistré dans une série sédimentaire peut être appréhendée par une telle étude,
- c'est l'obliquité qui semble être le paramètre orbital qui s'exprime le mieux dans la série des argilites du Toarcien du Sud du bassin de Paris.

Références bibliographiques

- [1] Evans M.E. & Heller F., 2003 – Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics. Academic Press, International Geophysics Series, vol. 86, 293 p.
- [2] King J.W. & Channell J.E.T., 1991 – Sedimentary magnetism, environmental magnetism and magnetostratigraphy. *Rev. Geophys.*, 29, 358-370.
- [3] Reynolds R. L. & King J., 1995 – Magnetic records of climate change. *Rev. Geophys. Sup.*, 101-110.
- [4] Ellwood B.B., Crick R.E., El Hassani A., Benoist S.L. & Young R.H., 2000 – Magnetosusceptibility Event and Cyclostratigraphy method applied to marine rocks: detrital input versus carbonate productivity. *Geology*, v. 28, p. 1135-1138.

- [5] Ellwood B.B., Crick R.E., Garcia J.L., Fernandez A., Soto F. M., Massoni M.T., El Hassani A. & Kovas E.G., 2001 – Global correlation using magnetic susceptibility data from Lower Devonian rocks. *Geology*, v. 29, p. 583-586.
- [6] Mayer H. & Appel E., 1999 - Milankovitch cyclicity and rock-magnetic signatures of paleoclimatic change in the Early Cretaceous Biancone Formation of the Southern Alps, Italy. *Cretaceous Research*, 20, 189-214.
- [7] Weedon G.P., Jenkyns H.C., Coe A.L. & Hesselbo S.P., 1999 – Astronomical calibration of the Jurassic time scale from cyclostratigraphy in British mudrock. *The royal society*, v. 357, p. 1787-1813.
- [8] Dearing J., 1999 – Magnetic susceptibility. In: Walden J., Oldfield F. & Smith J.P. (eds.), Environmental magnetism – a practical guide. *Quaternary Research Association*, London, *Technical guide*, 6, 35-62.
- [9] Lorenz J., Lefavrais R., Depeche F., Leclerc V., Marchand D., Roy B., Taugourdeau J. & Reyre Y., 1987 – Le Jurassique. In Lorenz C. coord., Géologie Profonde de la France, Forage scientifique de Sancerre-Couy (Cher), *Documents du BRGM 136*, 19-26.
- [10] Nowaczyk N.R., 2001 – Logging of magnetic susceptibility. In : Last .M. & Smol J.P. (eds.), Tracking environmental change using lake sediments, vol. 1, Kluwer Academic Publishers.
- [11] Guillocheau F. et al., 2000 – Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin : 3D stratigraphic constraints. *Geodinamica Acta*, 19, 189-246.
- [12] Gély J.P., Lorenz C. & Lorenz J., 1996 – Les terrains jurassiques du sondage de Couy (Cher, France). Leur analyse séquentielle détaillée à partir de la description des carottes et des courbes diagraphiques. *Revue de l'IFP*, 51, 3, 319-331.
- [13] Weedon G.P., 2003 – Time-Series analysis and cyclostratigraphy. Cambridge University Press, 259 p.
- [14] Gradstein F.M., Ogg J.G., Smith A.G., Bleeker W. & Lourens L.J., 2004 – A new Geologic Time Scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 27, 2, 83-100.

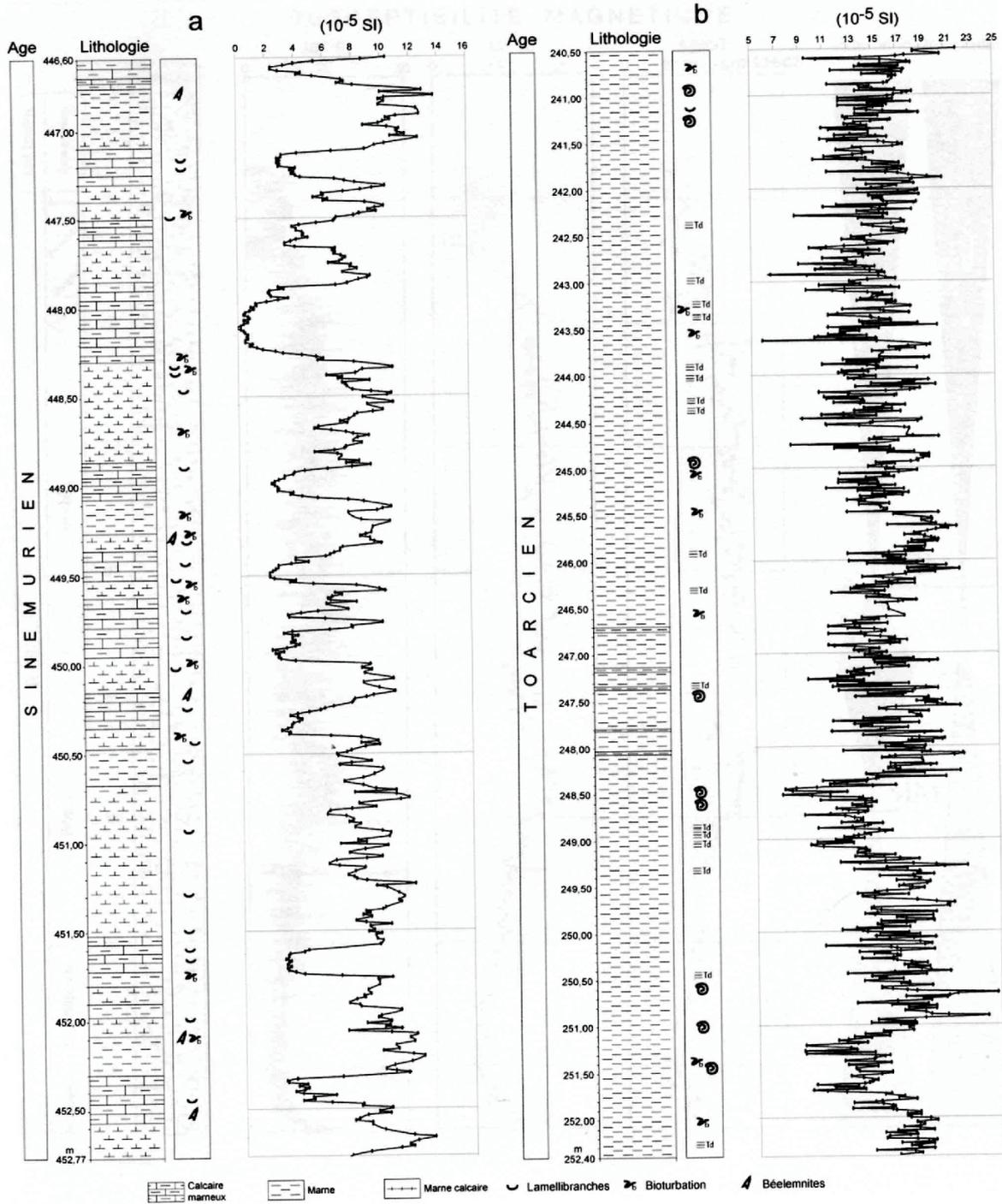


Figure 1 - Enregistrements détaillés (intervalle de mesure de 1 cm) de la susceptibilité magnétique sur deux intervalles tests de 12 mètres d'épaisseur : (a) alternances marno-calcaires dans le Sinémurien (446.60 à 452.77 mètres), (b) argilites dans le Toarcien (240.50 à 252.40 mètres).

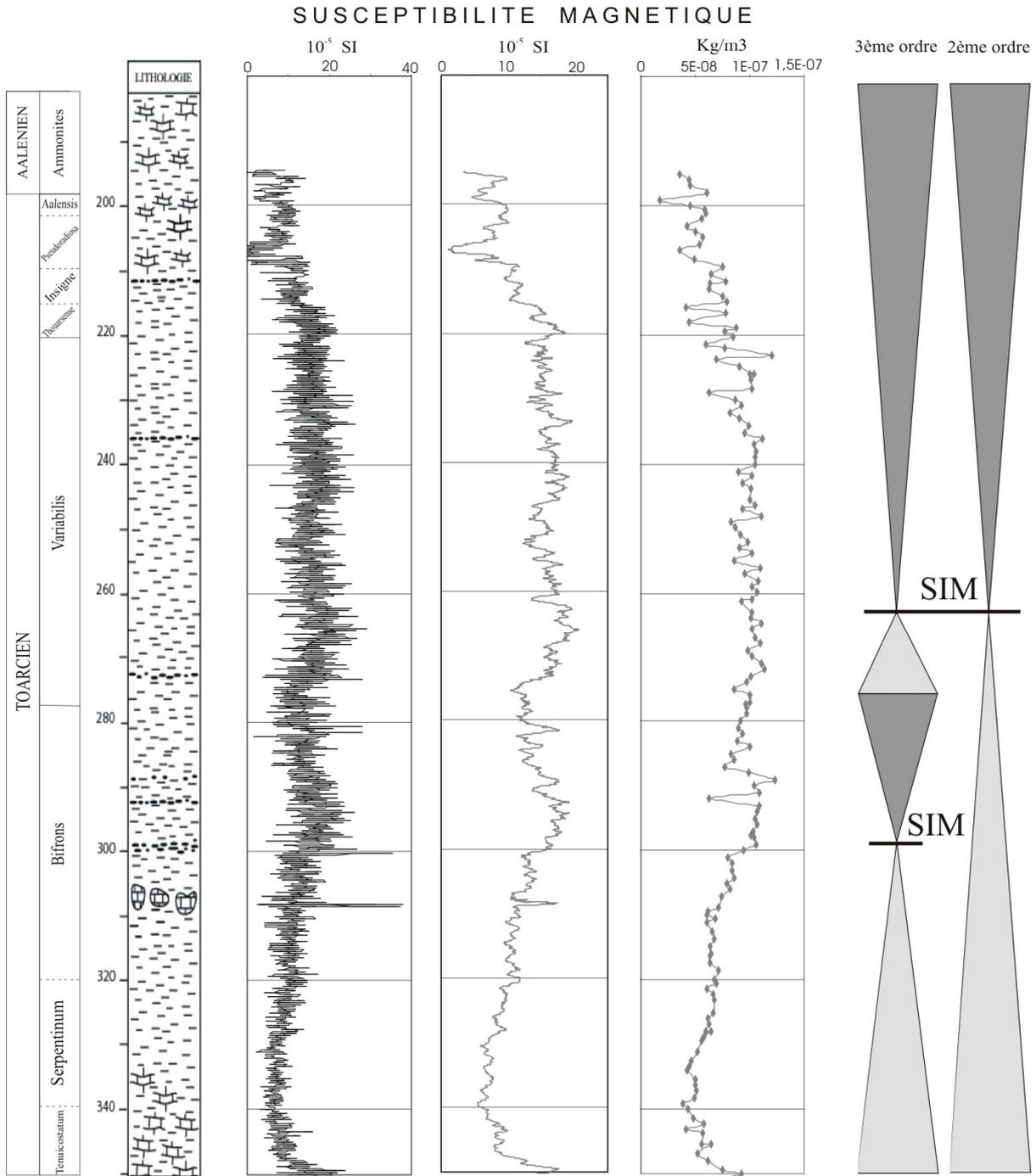


Figure 2 - Evolution de la susceptibilité magnétique sur l'ensemble de la série du Toarcien. De gauche à droite : zones d'ammonites, lithologie, enregistrement de la SM tous les 4 cm avec la sonde MS2-E1, courbe lissée des mesures de SM, mesures sur une centaine d'échantillons avec le susceptomètre de laboratoire KLY-2, découpage séquentiel proposé à partir des mesures de SM.

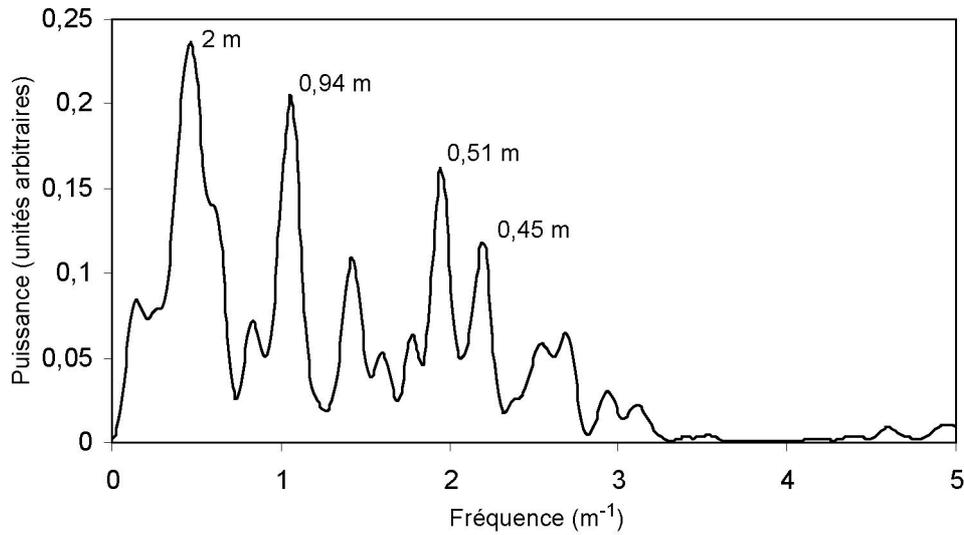


Figure 3 - Exemple de périodogramme type obtenu à partir des mesures de susceptibilité magnétique sur un intervalle du Toarcien (310-322,5 mètres). Les périodes dominantes 0,45 et 0,51, puis 0,94 et enfin 2 m représentent respectivement la précession, l'obliquité et l'excentricité.

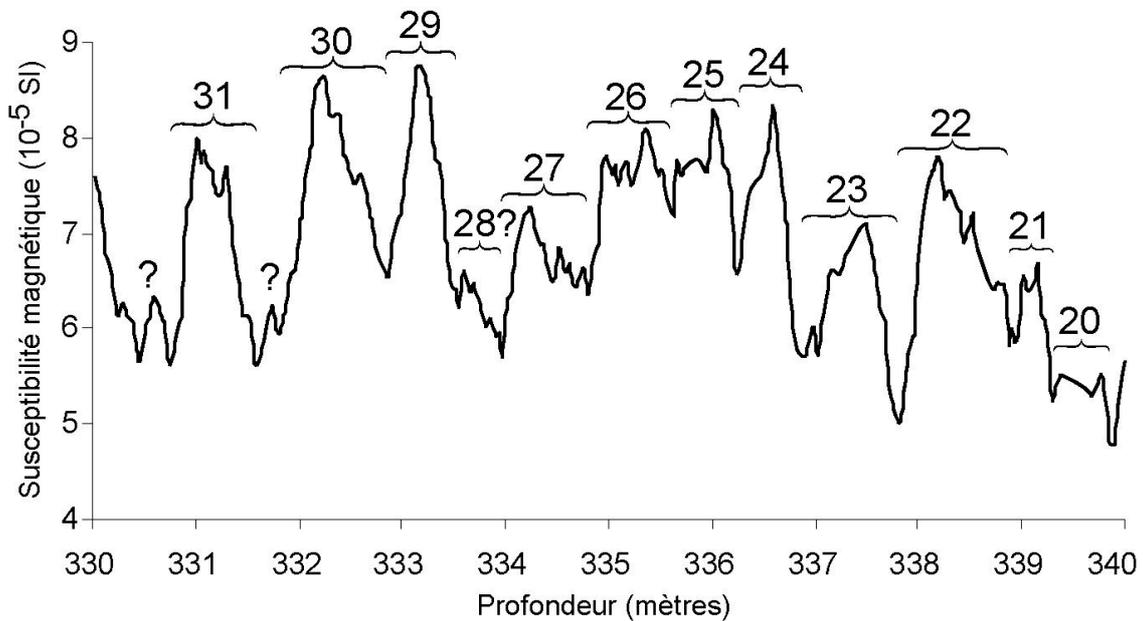


Figure 4 - Exemple sur un court intervalle du Toarcien (330-340 mètres) des cycles d'obliquité (d'environ 1 mètre d'épaisseur) mis en évidence à partir des fluctuations de la susceptibilité magnétique (données lissées sur 7 points).

Corrélations à très haute résolution et analyse cyclostratigraphique des séries callovo-oxfordiennes des forages Andra du site de Bure (Est du Bassin de Paris) : apport des mesures de susceptibilité magnétique.

Emilia Huret ^{1,2}, Bruno Galbrun ¹, Pierre-Yves Collin ^{1,3}, Slah Boulila ¹, Pascal Elion ² et Christian Ravenne ⁴.

¹ Université Pierre et Marie Curie, FR CNRS 32 « Cepage », Case 117, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05 huret@ccr.jussieu.fr

² Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs, Parc de la Croix Blanche, 1/7 rue Jean Monnet, 92298 Châtenay-Malabry.

³ UMR CNRS 5143 « Paléobiodiversité et Paléoenvironnements ».

⁴ Institut Français du Pétrole, Avenue de Bois-Préau, 92582 Rueil-Malmaison.

I. INTRODUCTION : PROBLEMATIQUE

Cette étude s'intègre aux travaux réalisés actuellement par l'ANDRA sur le site de Bure (Meuse, France) dans le cadre de l'installation d'un laboratoire souterrain d'étude pour le stockage des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue.

Son objectif est de rechercher de possibles lacunes sédimentaires de courte durée (inférieure à la centaine de milliers d'années) dans la série argileuse du Callovo-oxfordien devant accueillir ce laboratoire. Le but est d'identifier et de caractériser la géométrie interne de cette couche et de préciser une éventuelle variabilité latérale et verticale, même d'un faible ordre de grandeur, des paramètres pétrophysiques, aux abords de tels hiatus d'épaisseur métrique.

La mise en évidence de hiatus de courte durée dans une série sédimentaire nécessite que celle-ci ait enregistré un « chronomètre » d'une résolution inférieure à la durée des lacunes recherchées. Seuls les rythmes sédimentaires contrôlés par les paramètres de l'orbite terrestre (précession, obliquité et excentricité), lorsqu'ils sont enregistrés et préservés dans une série, peuvent répondre à cette attente. En effet, leur pouvoir de résolution, est d'un ordre de grandeur bien supérieur (jusqu'à 20000 ans au minimum) à toute autre méthode de datation relative ou absolue dans le Mésozoïque.

Ainsi la recherche de hiatus a-t-elle été entreprise ici par une approche cyclostratigraphique haute résolution basée sur l'étude des fluctuations de la susceptibilité magnétique, dont on a montré par ailleurs dans les séries récentes qu'elles étaient sous la dépendance des paramètres orbitaux [1-2].

II. LE CALLOVIEN-OXFORDIEN DES FORAGES DE L'ANDRA

Le site Meuse/Haute-Marne se situe à l'Est du Bassin de Paris, à 15 kilomètres au Nord-Est de l'agglomération de Joinville. L'étude porte sur la série argileuse du Callovo-Oxfordien, partiellement carottée dans quatre forages ANDRA : EST 342, EST 322, et EST 312 situés dans l'environnement régional du site, et orientés sur un transect Sud-Ouest – Nord-Est d'environ quarante kilomètres, et le forage EST 103 sur le site même du laboratoire.

La « formation » étudiée débute à sa base par des niveaux d'âge Callovien moyen (Dogger) et se termine à son sommet dans l'Oxfordien moyen (Malm). Elle est formée d'une épaisse série

marneuse ou argileuse, homogène, de plus de 100 mètres d'épaisseur (130 mètres sur le site du laboratoire) présentant un léger pendage de 1° à 1,5° vers le Nord Ouest. Elle est encadrée par des ensembles carbonatés : à sa base, d'âge bathonien et à son sommet, de l'Oxfordien moyen et supérieur, ce dernier caractérisé par des calcaires, récifaux à périrecifaux.

Les datations biostratigraphiques ont été réalisées sur les ammonites. Dans le cadre de notre étude, seules les limites de zones sur le forage EST 103 sont bien reconnues (datations biostratigraphiques en cours pour les forages EST 312, 322 et 342).

D'un point de vue paléogéographique, le site Meuse/Haute-Marne se situe en domaine de plate-forme externe, dans une zone en dépression située entre deux domaines paléogéographiques plus proximaux : la plate-forme bourguignonne au sud-ouest et la plate-forme ardennaise au nord-est .

III. ETUDE DES VARIATIONS DE LA SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE

III.1 Méthodologie

Les mesures de susceptibilité magnétique (SM) ont été réalisées sur les quatre forages avec une sonde Bartington MS2E1. Cette sonde couramment utilisée pour l'étude des sédiments marins ou lacustres actuels [3] apparaît être un outil fiable pour l'étude de séries mésozoïques [4-5].

Plus de 8000 mesures de SM ont été réalisées directement à la surface des forages, tous les 4 centimètres, parallèlement à la stratigraphie.

III.2 Analyse des variations à long terme de la SM

La courbe de SM (lissée sur 7 points) est représentée pour chacun des forages (fig. 1). Il apparaît que la susceptibilité magnétique évolue selon des tendances plurimétriques et que ces évolutions se retrouvent d'un forage à l'autre. Des corrélations basées sur ces variations (en particulier sur les minima et maxima de SM) ont été réalisées sur l'ensemble du transect et ont permis de caler au mieux les forages. La susceptibilité magnétique apparaît donc comme un bon outil de corrélation intra-bassin.

D'autre part, les données sédimentologiques comparées aux grandes tendances des variations de la SM laissent penser que les variations de la teneur en argile régissent l'évolution de la SM. En comparaison avec le découpage séquentiel régional [6], il apparaît que les variations à long terme de la SM reflètent les cycles majeurs transgressifs/régressifs de 3^{ème} ordre. Ceci suggère que les variations à long terme de la SM sont contrôlées par les variations du niveau marin relatif, les transgressions se caractérisant par d'importants dépôts argileux (donc augmentation de la SM), et les régressions par une diminution des dépôts argileux.

III.3 Analyse des variations haute fréquence de la SM

III.3.1 Analyse cyclostratigraphique

Les variations à haute fréquence de la SM ont fait l'objet d'une étude cyclostratigraphique par analyse spectrale. Les analyses ont été réalisées avec le logiciel Analyseries [7], en utilisant la fonction Blackman-Tuckey [8] sur des intervalles de 10 mètres, avec un lissage de 7 à 11 points des valeurs de SM.

Les résultats pour les forages EST 342, EST 322 et EST 312 sont présentés sur la figure 2. Ils présentent la courbe brute de SM, la courbe lissée sur 7 points (calculée par moyenne mobile)

et les périodogrammes obtenus par intervalle de 10 mètres.

L'interprétation cyclostratigraphique s'est effectuée en calculant les rapports des fréquences dominantes (tab. 1 & 2) obtenues pour chacun des périodogrammes [9] puis en comparant ces rapports avec ceux calculés pour les paramètres orbitaux du Jurassique supérieur [10] (tab.3).

PRECESSION			OBLIQUITE	EXCENTRICITE
Précession 1	Précession 2	Précession(moy)		
18 200 ans	21 900 ans	20 050 ans	37 700 ans	95 000 ans

Tableau 1 - Durées des paramètres orbitaux pour le Jurassique supérieur.

Temps	Précession/Obliquité			Obliquité/ Excentricité é	Précession/Excentricité		
	P1/O	P2/O	Pmoy/O		P1/E	P2/E	Pmoy/E
Jurassique Supérieur	0,483	0,581	0,532	0,397	0,191	0,230	0,211

Tableau 2 - Rapports de fréquence pour les paramètres orbitaux du Jurassique supérieur.

Forages	Cycles observés (en mètres)			a/b	b/c	a/c
	a	b	c			
EST 342	0,46	0,68	1,98	0,529	0,350	0,211
EST 342-	0,59	1,20	2,85	0,492	0,421	0,207
EST 322-	0,52	0,98	2,44	0,531	0,401	0,213
EST 322-	0,44	0,85	2,32	0,518	0,366	0,190
EST 312-	0,44	0,76	2,08	0,579	0,365	0,211
EST 312	0,33	0,68	1,72	0,486	0,395	0,192

Tableau 3 - Rapports de fréquence des cyclicités dominantes observées sur les forages EST 342, EST 322 et EST 312.

Pour l'ensemble des 3 forages, il apparaît que les rapports des cyclicités dominantes observées sur chacun des périodogrammes sont du même ordre de grandeur que ceux des paramètres orbitaux au Jurassique supérieur. Ainsi les cyclicités de 0,5, 1 et 2,5m ont pu être rapportées respectivement à la précession, l'obliquité et l'excentricité. Les variations d'épaisseurs des cyclicités dominantes observées selon les forages et parfois au sein d'un même forage sont certainement représentatives des variations du taux de sédimentation.

En comptant les cycles, très bien reconnus sur le signal de SM, il est possible de faire des estimations de durées sur des intervalles de temps précis. Par exemple, sur le forage EST 103, la durée minimale et maximale de la zone d'ammonite à Mariae (Oxfordien inférieur) dont les limites sont bien connues a pu être estimée entre 2,08 et 2,34 Ma [11].

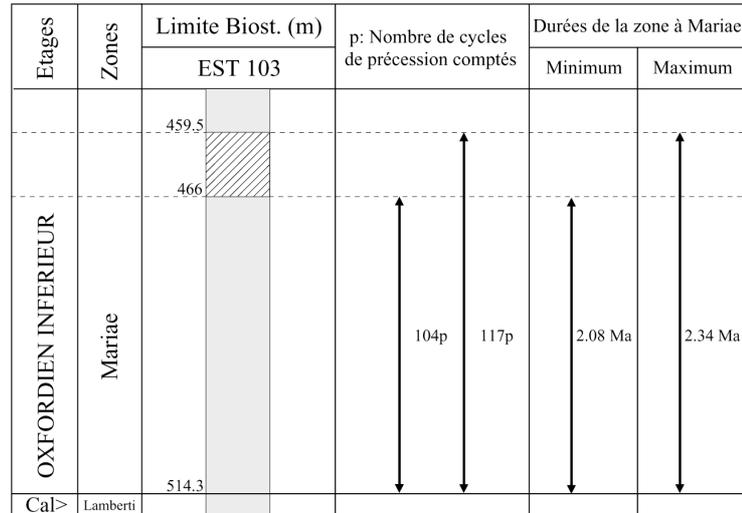


Figure 3 - Estimation de la durée de la zone à Mariae sur le sondage EST 103.

Cette méthodologie apparaît donc clairement appropriée pour entreprendre des comparaisons sur les estimations de durée enregistrées sur chacun des forages à l'échelle du transect considéré (comparaison de la durée de l'ensemble de la formation ou de zones d'ammonite d'un forage à l'autre).

La recherche de hiatus, et surtout l'estimation de leur durée, peut ainsi être envisagée par une telle approche.

III.3.2 Corrélations des cyclicités haute fréquence

La susceptibilité magnétique étant un bon outil de corrélation intra-bassin à l'échelle des évolutions à long terme, un essai de corrélation haute résolution en utilisant les cyclicités mises en évidence sur l'ensemble des forages a été réalisé.

Ces corrélations ont été réalisées par couple de forages sur le logiciel Analyseries. Cette méthode permet de corréler graphiquement une série de données à une autre, considérée comme série de référence, en fonction d'un coefficient traduisant la validité des corrélations effectuées.

Le résultat est une courbe de corrélation dont les variations (changement de pente) traduisent l'évolution du taux de sédimentation d'un site par rapport à l'autre considéré comme référence.

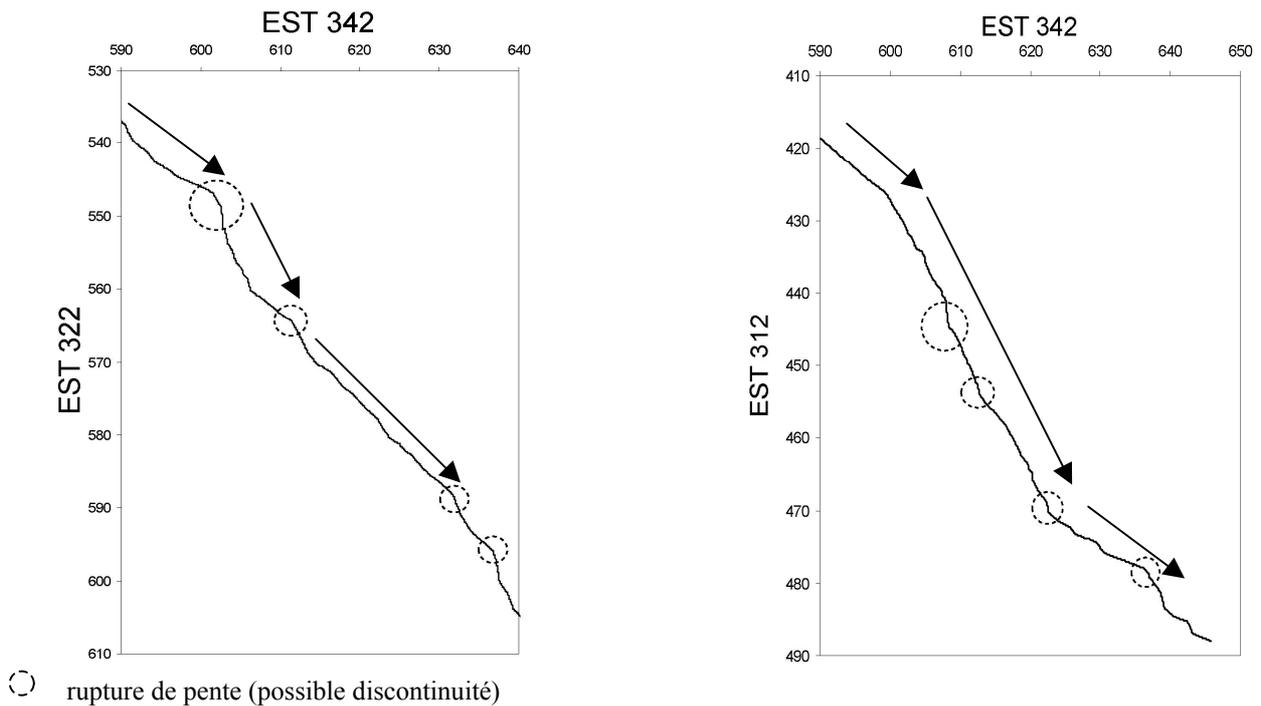


Figure 4- Courbes de corrélation de SM des puits EST 322-EST 342 et EST 312-EST 342.

Deux exemples sont présentés sur la figure 4. Les courbes de corrélation montrent des changements de la pente très nets, qui traduisent des variations du taux de sédimentation, et des ruptures parfois très franches (notamment sur les corrélations réalisées entre les forages EST322-EST 342) qui peuvent traduire d'éventuelles discontinuités voire des lacunes éventuelles.

La susceptibilité magnétique se confirme être un outil de corrélation de très haute résolution. Elle permet de mettre en évidence les variations du taux de sédimentation et de « soupçonner » des discontinuités traduisant peut-être de potentielles zones de hiatus.

IV. CONCLUSIONS

A l'issue de cette étude préliminaire sur la série argileuse callovo oxfordienne de l'Est du Bassin de Paris, il apparaît que :

- les variations à long terme de la SM associées aux variations de la teneur en argile reflètent les variations du niveau marin relatif,
- l'analyse des variations haute fréquence de la SM, par une étude cyclostratigraphique, permet de mettre en évidence des cyclicités dominantes (0,5m, 1m et 2,5m) se rapportant aux paramètres orbitaux que sont la précession, l'obliquité et l'excentricité,
- les corrélations des cyclicités à haute fréquence permettent de mettre en évidence (1) les variations du taux de sédimentation, et (2) des zones de discontinuités.
- il n'y a pas de hiatus important à l'échelle du bassin.
- la SM est un bon outil de corrélation à distance à la fois pour les variations à long terme mais aussi pour des corrélations très haute fréquence dans les séries sédimentaires mésozoïques en forage.
- la SM est outil adapté pour les études cyclostratigraphiques à haute résolution. La recherche de hiatus, et surtout l'estimation de leur durée, peuvent être envisagée par une telle approche.

Références bibliographiques

- [1] Weedon G.P., 2003 - Time-Series analysis and cyclostratigraphy. Cambridge University Press, 259 p.
- [2] Evans M.E. & Heller F., 2003 - Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics. Academic Press, International geophysics Series, vol. 86, 293 p.
- [3] Nowaczyk N.R., Minyuk P., Melles. M., Brigham-Grette J., Glushkova O., Nolan M., Lozhkin A.V., Stetsenko T.V., Andersen P.M. & Forman S.L., 2002 - Magnetostratigraphic results from impact crater Lake El'gygytyn, northeastern Siberia: a 300 kyr long high resolution terrestrial paleoclimatic record from Arctic, *Geophys. J Int.*, 150, 109-126.
- [4] Galbrun B., Huret E. & Collin P.Y., 2004 - La susceptibilité magnétique (SM) : nouvel outil d'analyse cyclostratigraphique des séries sédimentaires mésozoïques. Exemple du Lias du forage GPF de Sancerre-Couy (Cher, France). *Ce volume*.
- [5] Weedon G.P., Jenkyns H.C., Coe A.L. & Hesselbo S.P., 1999 - Astronomical calibration of the jurassic time scale from cyclostratigraphy in British mudrock. *The Royal Society.*, 357, 1787-1813.
- [6] Pellenard P., Deconinck J-F., Marchand D., Thierry J., Fortwengler D. & Vigneron G., 1999 - Contrôle géodynamique de la sédimentation argileuse du Callovien-Oxfordien moyen dans l'Est du bassin de Paris : Influence eustatique et volcanique. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et de l'Univers.*, 328, 807-813.
- [7] Paillard D., Labeyrie L. & Yiou P., 1996 - Macintosh programs performs, Time-series analysis. Eos, Transactions, *American Geophysical Union*, 77-79.
- [8] Blackman R.B. & Tukey J.W., 1958 - The measurement of power spectra From the Point of View of Communication Engineering. *Dover Publications, New York*.
- [9] Mayer H. & Appel E., 1999 - Milankovitch cyclicity and rock-magnetic signatures of paleoclimatic changes in the early Cretaceous Biancone Formation of the Southern Alps, Italy. *Cretaceous Research*, 20, 189-214.
- [10] Berger A. & Loutre M.F., 1994 - Astronomical forcing through geological time. In : Orbital forcing and cyclic sequences, (de Boer P. L. & Smith D. G. Eds.), *Special publication of Sedimentologist,s* 19, 15-24.
- [11] Boulila S., 2003 - Caractérisation des hiatus sédimentaires dans les séries Callovo-oxfordiennes de l'Est du Bassin de Paris et du Bassin du sud-est de la France. *Mémoire de DEA Méthodes Quantitatives et Modélisation des Bassins Sédimentaires*, Université Pierre et Marie Curie, Inédit.

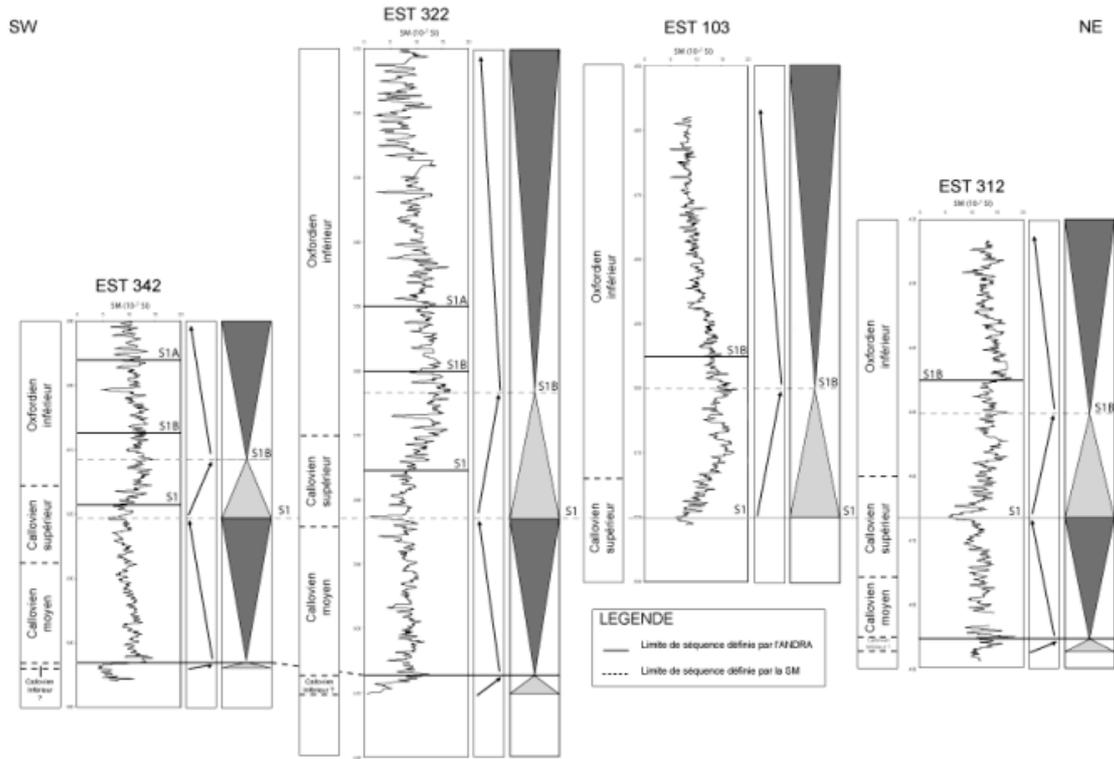


Figure 1 - Evolutions des variations à long terme de la SM et proposition d'un découpage séquentiel pour les forages EST 312, 322, 103 & 342.

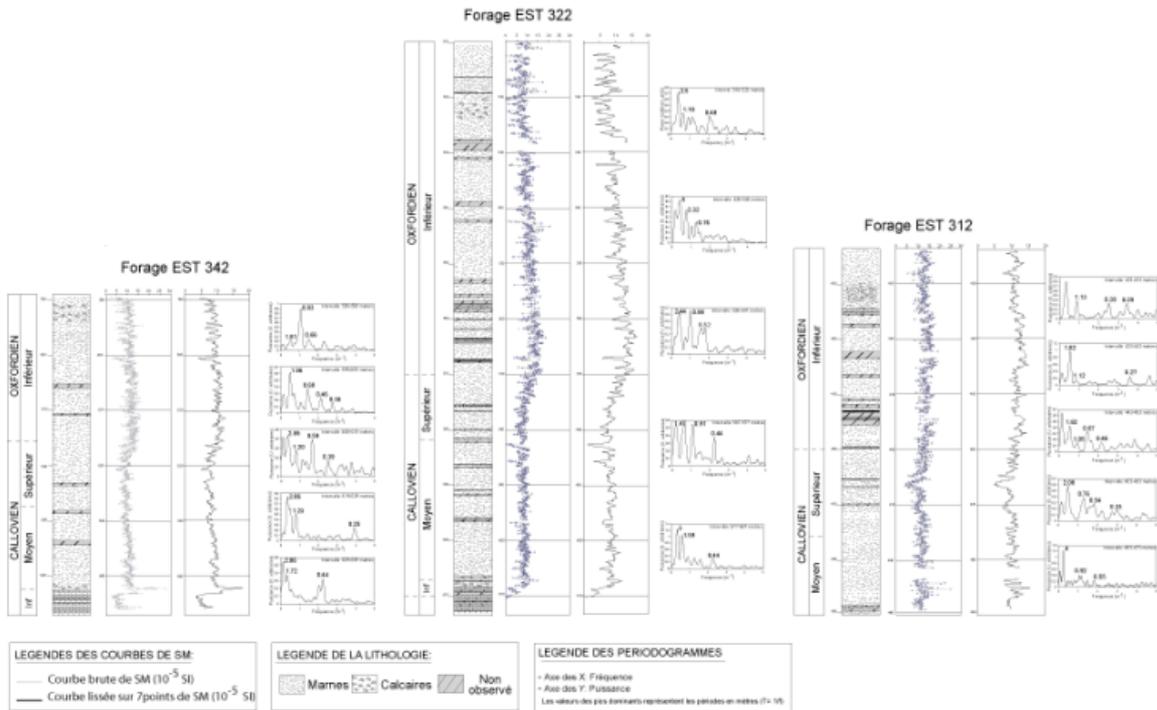


Figure 2 - Analyse cyclostratigraphique des forages EST 312, 322, et 342.

Quelques Evolutions récentes des Outils de l'Ingénieur des Sciences de la Terre.

Yves Gros, Michel Vandenbeusch

ANTEA, Avenue Claude Guillemin 45061 ORLEANS CEDEX 2 m.vandenbeusch@antea-ingenierie.fr

1. EVOLUTION

« Des évolutions marquantes ont été faites en géologie, en géochimie, en hydrogéologie, conduisant à faciliter l'observation des traits caractéristiques, à permettre la simulation des lois de comportements, à visualiser aisément des hypothèses de travail et des résultats de calcul.

Ces outils conduisent à faciliter les représentations et les compréhensions des structures géologiques en place notamment en établissant des modèles géologiques en deux ou trois dimensions. Ces objectifs concourent à réduire les incertitudes que l'on attribue toujours à « l'aléa » géologique face à des aménagements dont les réalisations devraient être, de plus en plus, sans risques. »

Le géologue abandonne une image, notamment dans le milieu du génie civil, de scientifique ayant un caractère de rêveur voire de poète, qui « racontait des choses intéressantes » sur l'histoire de la terre en utilisant un langage ésotérique mais qui était relativement absent lorsqu'il lui était demandé une coupe géologique précise avec des notions de fiabilité et de degrés d'incertitudes.

2. OUTILS POUR LA GEOLOGIE.

La diminution de l'aléa géologique passe par l'établissement de modèles géologiques 2D, voire 3D, avec une analyse du degré de fiabilité et d'incertitude des données de base et des prévisions correspondantes. Pour parvenir à ces réductions des risques, en essayant d'appréhender les lacunes de connaissance pouvant subsister, des ensembles de méthodes ou techniques sont appliquées aux éléments géologiques. Celles-ci concernent :

- **La caractérisation et l'analyse de la variabilité horizontale et verticale** des ensembles géologiques (formations sédimentaires, métamorphiques, volcaniques ou magmatiques) et par l'utilisation de toutes les méthodes disponibles pour appréhender ces paramètres. Elles concernent la stratigraphie, la sédimentologie, la sédimentologie séquentielle, la minéralogie, la paléontologie, la pétrographie, etc. Ces méthodes sont mises en œuvre à l'affleurement ou à partir de données de forages (carottes) complétées par l'utilisation de diagrapies différées variées.
- **La définition de la géométrie des formations** à partir des données d'affleurements et/ou de forages que ce soit en domaine plicatif ou fracturé. Ce sont essentiellement les méthodes de l'analyse structurale qui sont utilisées. Ces dernières bénéficient d'une meilleure compréhension des mécanismes de la déformation notamment au niveau de la genèse des différents types de structures (structures différenciées suivant leur genèse) et de leur répartition dans le volume affecté.

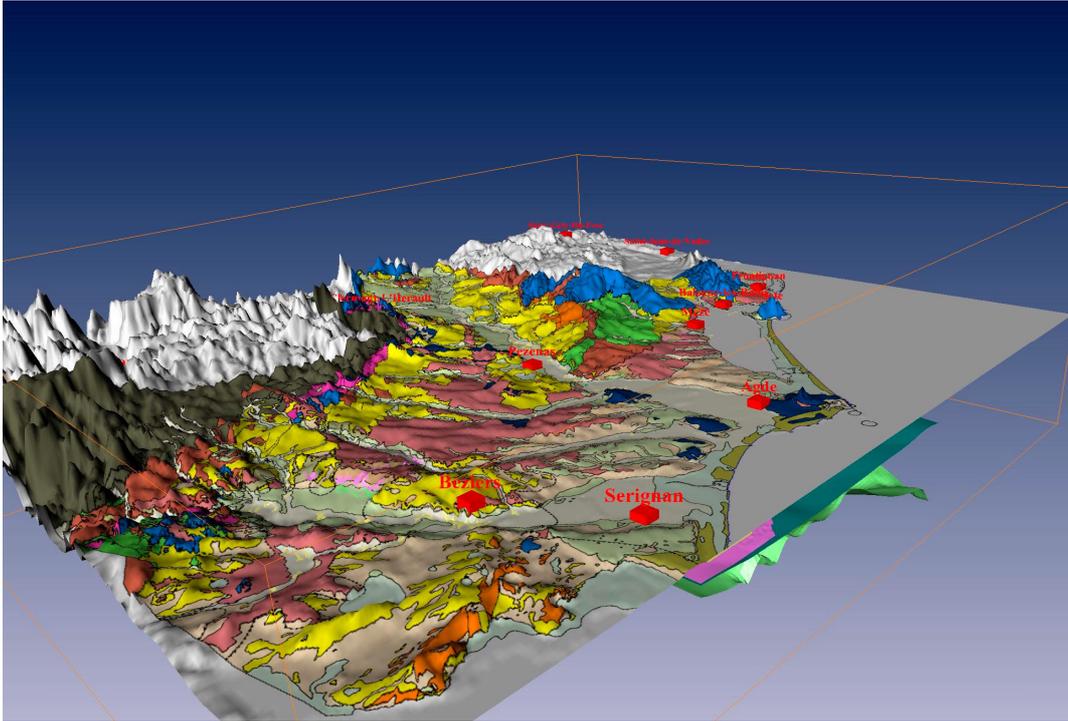
- **en domaine plicatif**, la reconstitution de la géométrie des structures cartographiques est réalisée à partir d'observations ponctuelles dont il faut généralement « tirer » le maximum.
 - levés de surface, au niveau des objets mesurés il n'y a pas de révolution si non que l'utilisation de l'informatique permet la réalisation de traitements statistiques plus nombreux et des relevés plus nombreux (utilisation de boussoles électroniques avec stockage des informations, logiciels de traitement des données pour établissement des diagrammes, des rosaces etc.).
 - en forage, levés géologiques des carottes avec orientations de ces dernières si cela s'avère nécessaire (utilisation de bancs DMT avec déroulé de carottes permettant de conserver une image de ces dernières) et réorientation des carottes, à posteriori, à partir des diagraphies (imagerie de parois) (BHTV, UBI, FMI ou vidéo)
- **en domaine fracturé**, l'objectif reste de reconstituer l'organisation du réseau de fractures en hiérarchisant ces dernières.

Il est ainsi distingué :

- les grandes structures d'importance hectométrique voire plus qui ont une incidence sur la géométrie des couches et qui peuvent constituer des drains pour la circulation des fluides. Il s'agit d'une approche déterministe,
- les petites fractures dont l'analyse, plutôt statistique, conditionne les paramètres de transfert et d'échanges de ces volumes.

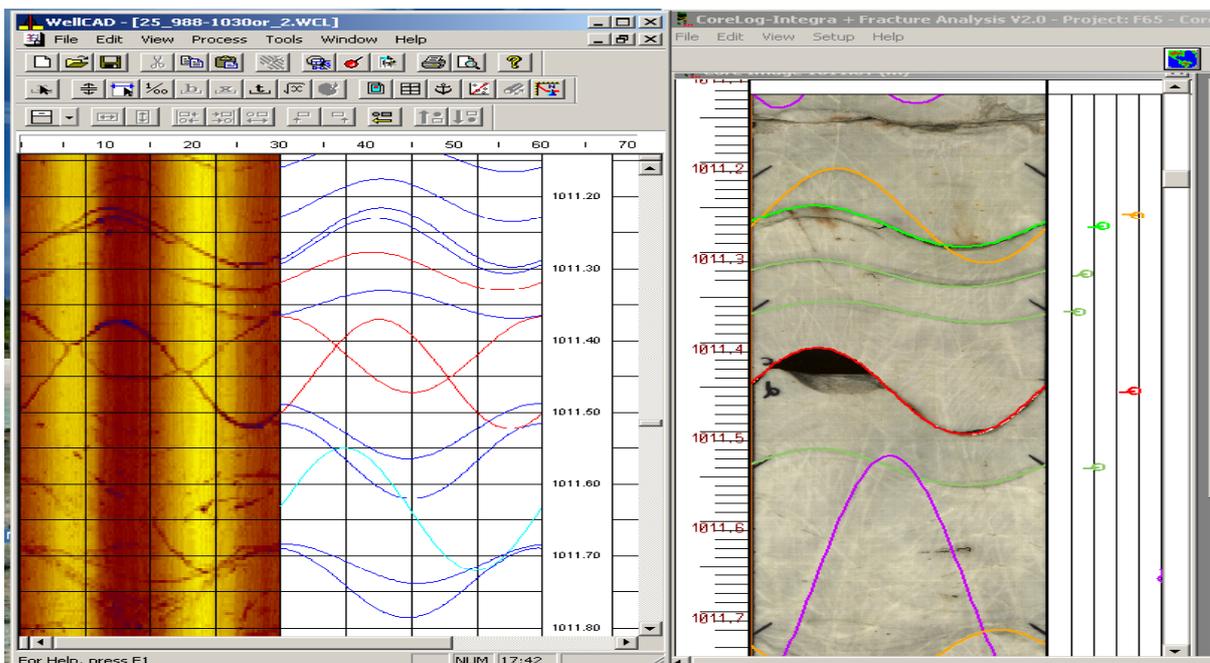
On retrouve un peu les mêmes méthodes que pour le domaine plicatif avec en plus des notions d'espace interfurctural ou de connectivité

- **L'utilisation de données géoréférencées** permet d'aborder les traitements cartographiques de l'information. Il est possible par exemple de faire apparaître uniquement les formations ou les surfaces qui répondent à un certain nombre de critères, que ceux-ci soient géologiques, géographiques ou autres. Cette approche est particulièrement adaptée pour la réalisation d'inventaires lors de la sélection de sites. Elle nécessite initialement une digitalisation des données, procédure qui en autorise ensuite les traitements mathématiques et permet les restitutions des zones retenues.
- **La modélisation géologiques 3 D.** Son rapport est de plus en plus crucial en géosciences. Fondée sur la mise en œuvre d'outils de modélisation tridimensionnelle et de visualisation (Earthvision, GOCAD, Editeur géologique, etc.), les développements récents concernent l'interopérabilité des données géographiques. L'objectif de cette démarche est de parvenir à l'accès à des sources d'informations hétérogènes et la communication entre systèmes d'exploitations et logiciels différents. Là également, et dans la voie de progrès des données géoréférencées, le souhait est de parvenir dans toute appréciation à intégrer des critères qui ne relèvent pas de mêmes systèmes de valorisation, en présentant les résultats de façon visuelle, donc plus accessible.

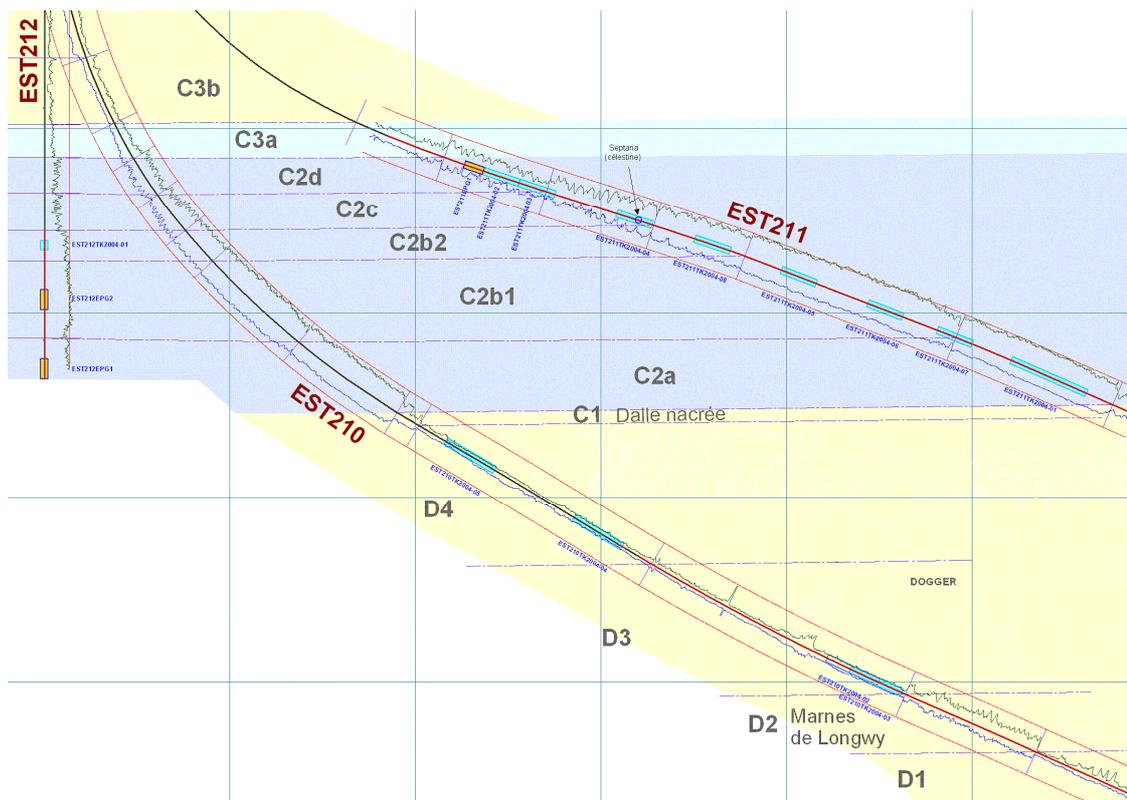


Représentation géologique 3D de l'Hérault (source BRGM)

- **La mise en œuvre des outils graphiques** permet des reconstitutions graphiques très techniques. En reconnaissances, les acquisitions de données géologiques et diagraphiques, relevées selon les 3 dimensions, peuvent être reportées selon les orientations réelles des ouvrages, conduisant ainsi à des représentations géologiques strictes. Les applications suivantes font apparaître les apports des moyens numériques en traitements de données diagraphiques.



Structures reconnues en BHTV et en levé géologique (source ANTEA)



Reports de données relatives à 3 forages orientés sources ANTEA/ANDRA

Indéniablement, l'outil numérique devient un allié incontournable du Géologue.

3. APPROCHES EN HYDROGEOLOGIE

Deux milieux géologiques ont été et sont des voies de progrès des connaissances hydrodynamiques.

Les connaissances des milieux fracturés ont été abordées par les analyses de leurs réseaux structuraux, suscitant des approches statistiques. A partir de celles-ci ont alors été proposés des concepts simplifiés de ces réseaux, eux-mêmes repris dans des schémas hydrauliques possibles. Les comportements hydrodynamiques ont été abordés de façon analytique, puis de façon numérique avec les outils informatiques de plus en plus performants. Les progrès sont donc intervenus dans les moyens de reproduire des réseaux - présumés - d'écoulements de grande complexité.

Pour les milieux à faible perméabilité intrinsèque, milieux dont les propriétés de confinement sont de plus en plus recherchées dans de très nombreux ouvrages, les approches pétrolières ont été transposées : schémas hydrauliques simple ou double porosité, méthodes d'interprétations numériques.. Par ailleurs, les moyens de caractérisations in-situ, et faisant appel aux technologies modernes (équipements informatiques, débitmètres, capteurs,...), permettent d'entreprendre des tests et mesures de valeurs extrêmement faibles. Cette avancée, pour ce type de milieu, a, par contre, un revers : l'investigation concerne un volume de plus en plus petit, et l'hydrogéologue doit être conscient de cette échelle.

Notons également que les technologies de laboratoires autorisent des caractérisations reproduisant les conditions hydrogéologiques réelles des milieux. On arrive par ces approches à percevoir les interférences avec les comportements géomécaniques et géochimiques des milieux sollicités.

4. PROGRES EN GEOCHIMIE

La géochimie, par les techniques d'analyses des laboratoires, et les progrès évidents en connaissances comportementales des éléments chimiques pris individuellement ou interagissant, devient une aide considérable à l'appréhension de l'historique des milieux et aux écoulements qui les ont ou les traversent.

Les progrès en analyses isotopiques fournissent des bases solides de datations des fluides, et donc de leurs historiques. Les mesures physiques (Eh, pH, oxygène dissous, faciès,..) qui établissent l'état d'éventuels déséquilibres, sont complétées des développements entrepris avec les analyses isotopiques (^2H , ^{16}O , ^{34}S , ^{86}Sr , ^3H , ^{36}Cl , ^{34}S ,...), et des géothermomètres que constituent les mélanges et qui renseignent sur les milieux de création de ces fluides.

Ainsi les techniques de prélèvement, et d'analyses très diversifiées fournissent des repères lieux et temps, qui, confrontés aux hypothèses géologiques, hydrogéologiques, climatiques constituent des moyens de validation d'hypothèses que l'Hydrogéologue, et le Projet réclament de plus en plus.

5. DES PROGRES

Le milieu géologique prend une importance croissante : occupation de l'espace , exploitation des ressources, interférences des projets.

Beaucoup de comportements incitent à parvenir à réduire « l'aléa géologique » , et les progrès dans les moyens de connaissance et de reconnaissance du milieu géologique sont réelles, même s'ils ne sont pas toujours perçus.

L'outil informatique a constitué une voie indéniable de progrès - représentations 3D, modélisations numériques, comparaisons, prédictions,...

La base de ces progrès reste, faut-il le dire, la donnée de terrain qui semble reprendre, aux yeux de beaucoup, le goût du vrai.

SESSION 2

Le Jurassique

L'Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris : corrélations des épisodes récifaux entre la Lorraine et la Bourgogne

**Cédric Carpentier¹, Bertrand Martin-Garin^{1,2}, Bernard Lathuilière¹
et Serge Ferry³**

¹ Laboratoire G2R UMR 7566 Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Energétiques,
Université Henri Poincaré Nancy 1 BP 239 54506 Vandoeuvre cedex

² Institut für Geologie, Universität Bern, Baltzerstrasse 1, 3012, Bern, Suisse

³ UMR 5125 Paléoenvironnements et Paléobiosphère, Université Claude Bernard Lyon1, 2
rue Raphaël Dubois F-69622 Villeurbanne cedex.

I. INTRODUCTION

A l'affleurement, l'Oxfordien de Lorraine et l'Oxfordien de Bourgogne sont marqués par l'installation de plate-formes carbonatées récifales [1][2][3][4]. L'évolution verticale des environnements de dépôt dans ces deux localités est relativement similaire et illustre une diminution progressive de la profondeur à long terme. De ce fait, les épisodes récifaux bourguignons et lorrains ont été longtemps considérés comme contemporains [5][6].

Pourtant, les datations effectuées en Bourgogne donnent un âge réparti entre le sommet de la Zone à *Transversarium* (?) et la sous-zone à *Bimammatum* (fig.1b) [7][4][8][9][10] alors que celles effectuées en Lorraine permettent de placer les faciès récifaux les plus développés au sein de la Zone à *Transversarium* voire même au sommet de *Plicatilis* pour le début de l'installation des bioconstructions (fig.1a) [11][12][13]. Outre les divergences dans les datations, dans le détail, les deux régions ne présentent pas la même évolution séquentielle [12]. Par conséquent, les corrélations entre la Bourgogne et la Lorraine s'avèrent complexes.

II. CADRE LITHOSTRATIGRAPHIQUE, PALEOGEOGRAPHIQUE ET GEOGRAPHIQUE

II. 1. Cadre lithostratigraphique

En Lorraine comme en Bourgogne, la mise en place diachrone des faciès coralliens s'effectue par une superposition homologue :

- des faciès marno-calcaires à silicifications correspondant au Terrain à chailles en Lorraine (fig.1a) et au Calcaire à chailles noduleuses en Bourgogne (fig.1b). Ces faciès se sont mis en place sous la limite inférieure d'action des vagues de tempêtes.
- des calcaires à coraux lamellaires pionniers (essentiellement *Microsolenidés*) organisés en biostromes. Ces calcaires bioconstruits correspondent aux Marnes et Calcaires à coraux de Foug en Lorraine (fig.1a) [12] et au Biostrome de base à polypiers lamellaires [14] ou Biostrome inférieur [4] en Bourgogne (fig.1b).
- des faciès carbonatés crayeux à faune corallienne diversifiée d'environnement lagunaire soumis aux tempêtes [15][12]. C'est le Complexe récifal supérieur bourguignon (fig.1b) et les Calcaires coralliens d'Euville lorrains (fig.1a) [12] qui correspondent en partie à l'ancienne Zone supérieure à polypiers.

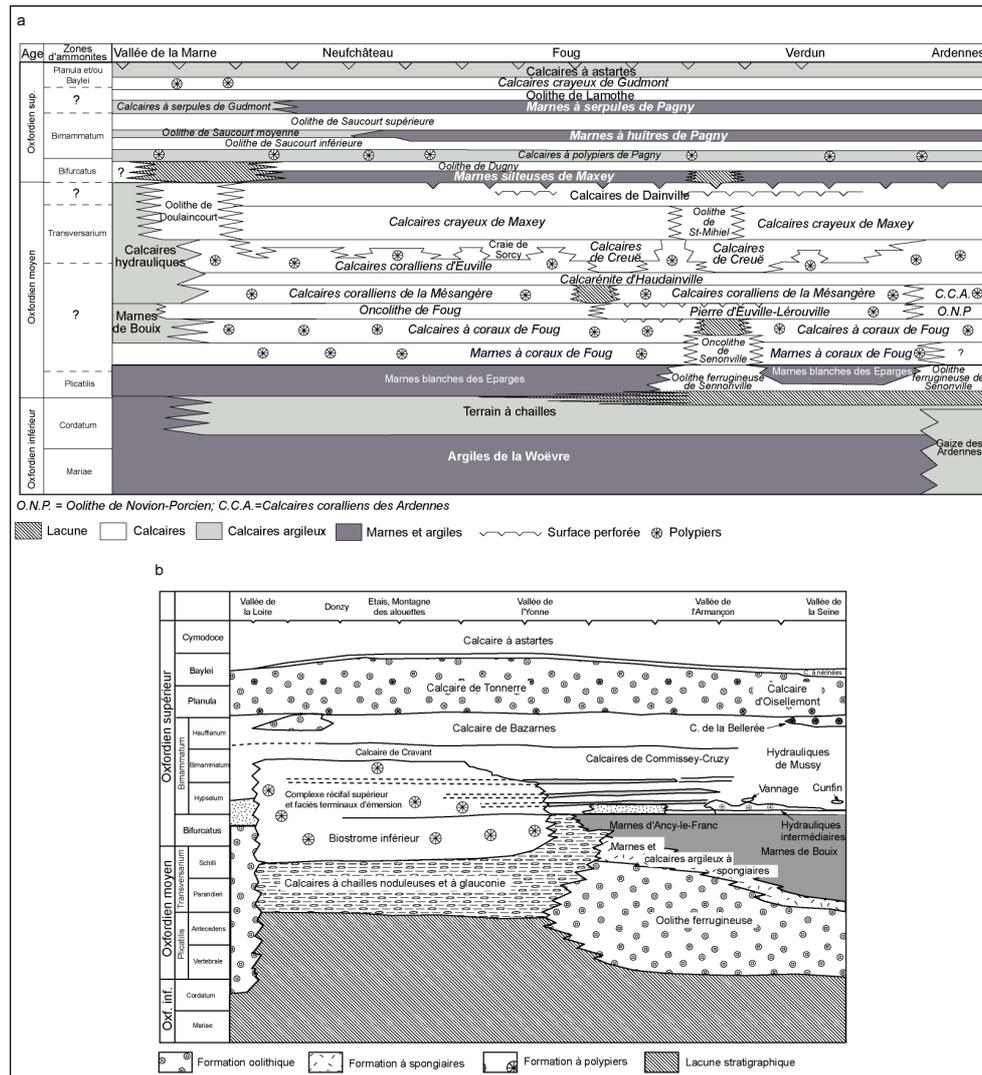


Figure 1 - a) Lithostratigraphie de l'Oxfordien de Lorraine. b) Lithostratigraphie de l'Oxfordien de Bourgogne (modifié d'après Menot [4])

II. 2 Cadre paléogéographique et géographique

A l'Oxfordien, la Lorraine est située entre 30 et 35°N de latitude [16]. Plusieurs plate-formes ou rampes carbonatées peu profondes s'étendent du Bassin de Paris au Jura jusqu'au sud du Massif bohémien (Plate-forme franconienne) (fig.2) [17][18][19]. La plate-forme lorraine est connectée au sud-est avec les environnements de plate-forme externe jurassiens. Ces derniers s'ouvrent vers le sud sur le Bassin dauphinois et la Téthys. Le nord de l'Europe est quant-à-lui le siège d'une sédimentation silicoclastique dont le matériel provient des massifs cristallins émergés tels que le Massif Bohémien, le Massif Rhénan, le Massif Londres-Brabant et le Massif Armoricaïn. Ces deux derniers massifs alimentent épisodiquement le Bassin de Paris [20]. En revanche, le massif des Vosges ne semble pas encore émergé [20]. L'Atlantique central continue son ouverture dont les contrecoups sont ressentis dans le Bassin de Paris [21][22] et jusque dans le bassin du Sud-Est [23] et le Briançonnais [24].

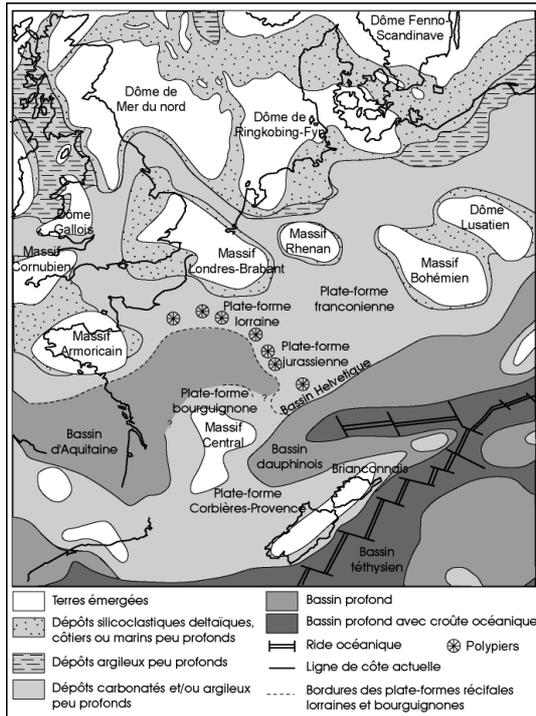


Figure 2 - Carte paléogéographique de l'Europe occidentale à l'Oxfordien (modifié d'après Ziegler [17], Thierry [18] et Enay et al. [19])

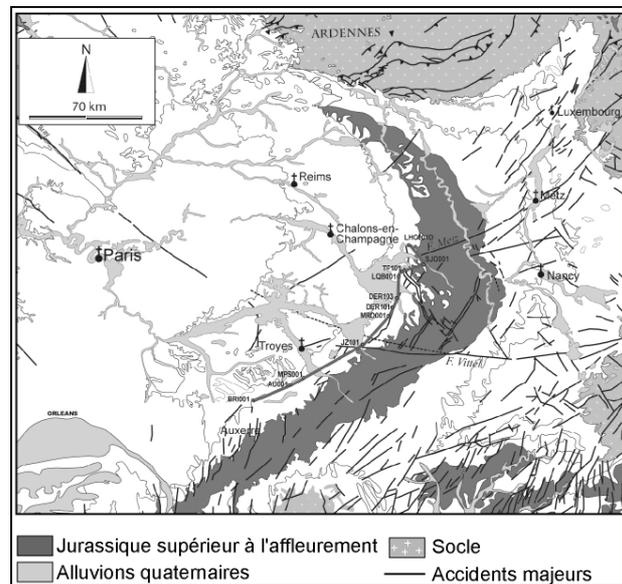


Figure 3 - carte de localisation des affleurements du Jurassique supérieur dans l'est du Bassin de Paris et localisation du transect diagraphique étudié

La zone étudiée en surface se situe le long de la bande d'affleurement du Jurassique supérieur de la bordure Est du Bassin de Paris. Cette bande d'affleurement est organisée selon un arc de cercle orienté nord sud et délimité au nord par le Massif ardennais et au sud par la partie septentrionale du Massif central (fig.3). Les faciès lorrains ont été étudiés en détail sur le terrain alors que les données lithostratigraphiques, biostratigraphiques et séquentielles pour la Bourgogne proviennent de la littérature. L'étude de terrain est accompagnée d'une étude de subsurface élaborée à l'aide des outils diagraphiques. Cette étude a permis d'effectuer des corrélations de proche en proche le long d'un transect orienté nord sud (fig.3) entre les environnements de plate-forme lorrains et les environnements de bassin proches de la Bourgogne.

III. EVOLUTION SEQUENTIELLE DE L'OXFORDIEN DE BOURGOGNE ET DE L'OXFORDIEN DE LORRAINE

L'évolution verticale des environnements de dépôt lors de l'installation de la plate-forme récifale en Lorraine permet de mettre en évidence trois cycles transgressifs-régressifs à moyenne fréquence entre la base de l'Oxfordien inférieur (Zone à Mariae) et le sommet de l'Oxfordien moyen (Sommet de la Zone à Transversarium). Les premiers faciès coralliens des Marnes à coraux de Foug se sont mis en place suite à une discontinuité de chute majeure du niveau marin relatif au toit des Marnes blanches des Eparges. Une émergence partielle de la plate-forme au sommet des Calcaires à coraux de Foug marque un maximum régressif à moyenne fréquence [12]. Au dessus de ce maximum régressif, les Calcaires coralliens d'Euville marquent un ennoyage de la plate-forme, le cortège de haut niveau marin étant matérialisé par l'installation des environnements de lagon peu profond sus-jacents.

Pour l'Oxfordien de Bourgogne, la période comprise entre la base de la Zone à Mariae et la partie supérieure de la Zone à Plicatilis (sous-zone à Antecedens) correspond à un épisode de non dépôt. Chevalier *et al.* [9] proposent une première phase d'envoyage pendant la mise en place des faciès à spongiaires de l'Oxfordien moyen (Zone à Plicatilis, sous-zone à Antecedens à Zone à Transversarium, sous-zone à Parandieri). Le maximum d'envoyage se situe au sein de la sous-zone à Parandieri. Ce dernier est suivi d'une phase de comblement de l'espace disponible et de progradation de la plate-forme pendant l'installation des faciès coralliens et des faciès terminaux d'émergence entre la sous-zone à Parandieri et la Zone à Bimammatum. Néanmoins, Plus au nord-est, dans le secteur de la vallée de la Seine, Lorin *et al.* [25] placent le maximum de rétrogradation de la plate-forme pendant le début de la Zone à Bimammatum. La différence dans le découpage séquentiel entre la vallée de l'Yonne et la Vallée de la Seine semblent indiquer un contrôle structural à l'échelle locale sur l'organisation géométrique des dépôts comme cela a d'ailleurs été envisagé par les auteurs [9][25]. Quoi qu'il en soit, le cadre séquentiel diffère entre la Bourgogne et la Lorraine et indique clairement que ces deux régions ont fonctionné de façon totalement indépendante d'un point de structural pendant l'Oxfordien.

IV. CORRELATIONS

Les outils diagraphiques ont permis de proposer un schéma de corrélation cohérent entre les deux régions (fig.4). Ce schéma montre clairement le diachronisme des différents épisodes récifaux. Les faciès lorrains de plate-forme carbonatée de l'Oxfordien moyen passent latéralement à des faciès argilo-carbonatés dans le bassin. Ces derniers se biseautent en direction de la Bourgogne pour ne former plus qu'un ensemble marneux d'environ 25 m dans le secteur de Latrecey [26] passant latéralement en direction du sud-ouest aux faciès à spongiaires de l'Oxfordien moyen [25] dont l'épaisseur n'excède pas 15 m à Châtel-Censoir [9]. En revanche, l'Oxfordien supérieur, pendant lequel s'est mis en place l'épisode récifal bourguignon, est bien exprimé dans le Bassin et marque une période de comblement. La sédimentation devient plus carbonatée. En Lorraine, les faciès oolithiques de l'Oolithe de Saucourt se sont individualisés à l'aplomb de l'ancienne bordure de plate-forme suite au basculement de cette dernière en direction du nord au passage Oxfordien moyen-Oxfordien supérieur [12]. A la fin de l'Oxfordien, les reliefs sédimentaires sont atténués et les Calcaires de Tonnerre et les Calcaires à astartes bourguignons ont leur équivalent faciologique en Lorraine sous le nom d'Oolithe de Lamothe, Calcaires crayeux de Gudmont et Calcaires à astartes supérieurs.

V. EVOLUTION DES COMMUNAUTES CORALLIENNES ET IMPLICATIONS PALEOCLIMATIQUES

Les associations coralliennes sont relativement proches entre la Bourgogne (Oxfordien supérieur) et la Lorraine (Oxfordien moyen) (fig.5). En outre, en Lorraine, à l'Oxfordien supérieur, la communauté récifale est dominée par des genres eurytopes suggérant un changement dans les conditions trophiques par rapport à l'Oxfordien moyen [27][28]. Plus au nord, en Angleterre, les constructions récifales ont disparu à l'Oxfordien supérieur [29][30]. L'ensemble de ces observations illustre une migration des faunes en direction du sud au cours du temps. Le relais des récifs de l'Angleterre à la Bourgogne peut s'expliquer par l'apparition d'un seuil (Seuil de la Marne) au sud de la Lorraine suite au basculement de la plate-forme au passage Oxfordien moyen Oxfordien supérieur (fig.6) [12]. Ces changements paléogéographiques pourraient être à l'origine de modifications courantologiques à même

d'expliquer l'apparition de faunes à affinités plus froides en Lorraine à la base de l'Oxfordien supérieur.

VI. CONCLUSIONS

Les installations des plate-formes récifales lorraine et bourguignone longtemps considérées comme contemporaines sont en réalité diachrones. Le canevas séquentiel diffère entre ces deux régions suggérant l'existence d'un contrôle structural sur la sédimentation pendant l'Oxfordien dans l'est du Bassin de Paris. Grâce aux données de subsurface un schéma de corrélation a pu être proposé et il permet d'observer le biseau des séries de l'Oxfordien inférieur et moyen depuis la Lorraine vers la Bourgogne. En revanche, l'Oxfordien supérieur correspond à une période de comblement du bassin par une puissante série argilo-carbonatée. La migration des faunes coralliennes diversifiées depuis l'Angleterre vers la Bourgogne au cours de l'Oxfordien et leur remplacement au cours du temps par des formes plus eurytopes suggère un changement climatique au passage Oxfordien moyen-Oxfordien supérieur. Ce changement est probablement à mettre en relation avec des modifications courantologiques suite au basculement de la plate-forme lorraine en direction du nord et l'apparition d'un seuil à l'aplomb de l'ancienne bordure au début de l'Oxfordien supérieur.

Références bibliographiques

- [1] Humbert L., 1971 : Recherches méthodologiques pour la restitution de l'histoire bio-sédimentaire d'un bassin; L'ensemble carbonaté oxfordien de la partie orientale du bassin de Paris. Thèse de Doctorat, Université de Nancy, 364 p.
- [2] Humbert L., 1975 : Dynamique biosédimentaire de la formation et de l'évolution d'une plateforme carbonatée. 9^e Congrès International de Sédimentologie, Nice, 225-233
- [3] Marchand D. & Menot J. C., 1980 : Jurassique supérieur : Ardenne et Lorraine. Vol. I Stratigraphie et Paléogéographie. In: Mégnien (eds.): Synthèse géologique du Bassin de Paris. BRGM, Mem. n°101, Orléans, 204-206
- [4] Menot J. C., 1980b : Jurassique supérieur: Bourgogne. In: Mégnien (eds.): Synthèse géologique du Bassin de Paris. Vol. I Stratigraphie et Paléogéographie. BRGM, Mem. n°101, Orléans, 206-210
- [5] Loreau J. P., 1975 : Les grands traits de la sédimentation sur l'emplacement de l'actuelle bordure sud est du bassin de Paris au Jurassique supérieur. 9^e Congrès International de Sédimentologie, Nice, 274-282
- [6] Collin P. Y., 2000 : Environnements, géochimie et processus de formation de séries condensées au Callovo-Oxfordien : du Bassin de Paris à des considérations globales. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 282 p.
- [7] Menot J. C., 1980a : Formations récifales du Jurassique supérieur de la vallée de l'Yonne. Geobios, Mém. spécial 4, 47-53
- [8] Bernard P., 1988 : La plate-forme carbonatée Niverno-Icaunaise à l'Oxfordien supérieur et au Kimmeridgien. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 294 p.
- [9] Chevalier F., Garcia J.-P., Quesne D., Guiraud M. & Menot J.-C., 2001 : Corrélations et interprétations génétiques dans les formations récifales oxfordiennes de la haute vallée de l'Yonne (sud-est du bassin de Paris, France). Bulletin de la Société Géologique de France, 172, 1, 69-84
- [10] Menot J. C., 1992 : Organisation générale des formations récifales oxfordiennes de l'Yonne et évolution du milieu sédimentaire. Bulletin d'information des géologues du Bassin de Paris, 29, 1, 38-39
- [11] Enay R. & Boullier A., 1981 : L'âge du complexe récifal des Côtes de Meuse entre Verdun et Commercy et la stratigraphie de l'Oxfordien dans l'est du Bassin de Paris. Geobios, 14, 6, 727-771
- [12] Carpentier C., 2004 : Géométries et environnements de dépôt de l'Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris. Thèse de Doctorat, Université Nancy 1, 470 p.
- [13] Carpentier C., Lathuilière B. & Ferry S., 2004 : La plate-forme carbonatée oxfordienne de Lorraine : arguments pour une ouverture vers la Mer germanique. Comptes Rendus Geosciences, 336, 1, 59-66
- [14] Mégnien C., Mégnien F. & Turland M., 1970 : Le récif oxfordien de l'Yonne et son environnement sur la feuille de Vermenton (1/50 000). Bulletin du B.R.G.M., 3, 83-115
- [15] Geister J. & Lathuilière B., 1991: Jurassic Coral Reefs of the northeastern Paris Basin (Luxembourg and Lorraine). International Symposium on Fossil Cnidaria including Archhaeocyatha and Porifera, Münster,

International Symposium on Fossil Cnidaria including Archhaeocysta and Porifera, Excursion A3 guidebook, 1-112

[16] Dercourt J., Zonenshain L. P., Ricou L. E., Kazmin V. G., Le-Pichon X., Knipper A. L., Grandjacquet C., Sborshchikov I. M., Boulin J., Sorokhtin O., Geyssant J., Lepvrier C., Biju-Duval B., Sibuet J. C., Savostin L. A., Westphal M. & Lauer J. P., 1985 : Présentation de 9 cartes paléogéographiques au 1/20 000 000 s'étendant de l'Atlantique au Pamir pour la période du Lias à l'Actuel. Bulletin de la Société Géologique de France, 5, 637-652

[17] Ziegler P. A., 1990: Pangaea Break-up: Jurassic-Early Cretaceous opening of central North Atlantic and western Tethys. In: B.V. (eds.): Geological atlas of western and central Europe, second and completely revised edition. Elsevier, Amsterdam, 91-122

[18] Thierry J., 2000: Early Kimmeridgian (146-144 Ma). In: Dercourt, Gaetani, Vrielynck, Barrier, Biju-Duval, Brunet, Cadet, Crasquin & Sandulescu (eds.): Atlas Peri-Tethys. Commission de la Carte Géologique du Monde, Explanatory notes, Paris, 85-97

[19] Enay R., Cariou E., Debrand Passard S., Menot J. C. & Rioult M. (1980): Middle Oxfordian. In: Enay & Mangold (eds.): Synthèse paléogéographique du Jurassique français. Doc. Lab. Géol. Lyon hors série 5, 181-184

[20] Mégnien C., 1980 : Tectonogenèse du Bassin de Paris : étapes de l'évolution du bassin. Bulletin de la Société Géologique de France, 4, 669-680

[21] Curnelle R. & Dubois P., 1986 : Evolution mésozoïque des grands bassins sédimentaires français ; bassin de Paris, d'Aquitaine et du Sud-Est. Bulletin de la Société Géologique de France, 4, 529-546

[22] Guillocheau F., 1991 : Mise en évidence de grands cycles transgression-régression d'origine tectonique dans les sédiments mésozoïques du Bassin de Paris. Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris, 312, 1587-1593

[23] De Graciansky P. C., Dardeau G., Bodeur Y., Elmi S., Fortwengler D., Jacquin T., Marchand D. & Thierry J., 1999 : Les Terres Noires du Sud-Est de la France (Jurassique moyen et supérieur) : interprétation en termes de stratigraphie séquentielle. Bulletin du Centre de Recherche et d'Exploration-Production Elf-Aquitaine, 22, 1, 35-69

[24] Claudel M. E., Dumont T. & Tricart P., 1997 : Une preuve d'extension contemporaine de l'expansion océanique de la Téthys ligurienne en Briançonnais : les failles du Vallon Laugier. Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris, 325, 273-279

[25] Lorin S., Courville P., Collin P. Y., Thierry J. & Tort A., 2004 : Modalités de réinstallation d'une plateforme carbonatée après une crise sédimentaire : exemple de la limite Oxfordien moyen - Oxfordien supérieur dans le Sud-Est du bassin de Paris. Bulletin de la Société Géologique de France, 175, 3, 289-302

[26] Courville P. & Villier L., 2003 : L'Oxfordien moyen et supérieur de l'est du Bassin de Paris (France). L'exemple de Latrecey (Haute-Marne) : aspects fauniques, paléoenvironnementaux et stratigraphiques. Revue de Paléobiologie, 22, 1, 175-196

[27] Carpentier C., Martin-Garin B., Olivier N., Lathuilière B., Gaillard C., Ferry S., Hantzpergue P. & Geister J., 2002 : Succession des écosystèmes récifaux dans la carrière de Pagny-sur-Meuse (Lorraine) : premières considérations sur l'évolution des environnements de dépôt au passage Oxfordien moyen-Oxfordien supérieur. In: Gaillard & Hantzpergue (eds.): Strati 2002 - 3e Congrès français de Stratigraphie. Docum. Lab. géol. Lyon, 156, 65

[28] Olivier N., Carpentier C., Martin-Garin B., Lathuilière B., Gaillard C., Ferry S., Hantzpergue P. & Geister J., 2004: Coral-microbialite reefs in pure carbonate versus mixed carbonate-siliciclastic depositional environments: the example of the Pagny-sur-Meuse section (Upper Jurassic, northeastern France). Facies, 50, 229-255

[29] Cecca F., Lathuilière B., Marchand D., Gardin S. & Bartolini A., 2001 : Enregistrements paléobiologiques et paléocéologique de fluctuations paléoclimatiques à l'Oxfordien (Jurassique supérieur). Paléodiversité, Crise, Paléoenvironnement, Séance spéciale de la Société Géologique de France, Paris, 19-21

[30] Martin-Garin B., Lathuilière B. & Geister J., 2002 : Récifs, coraux et climats oxfordiens de la Téthys. In: Gaillard & Hantzpergue (eds.): Strati 2002 - 3e Congrès français de Stratigraphie. Docum. Lab. géol. Lyon, 156, 154-155

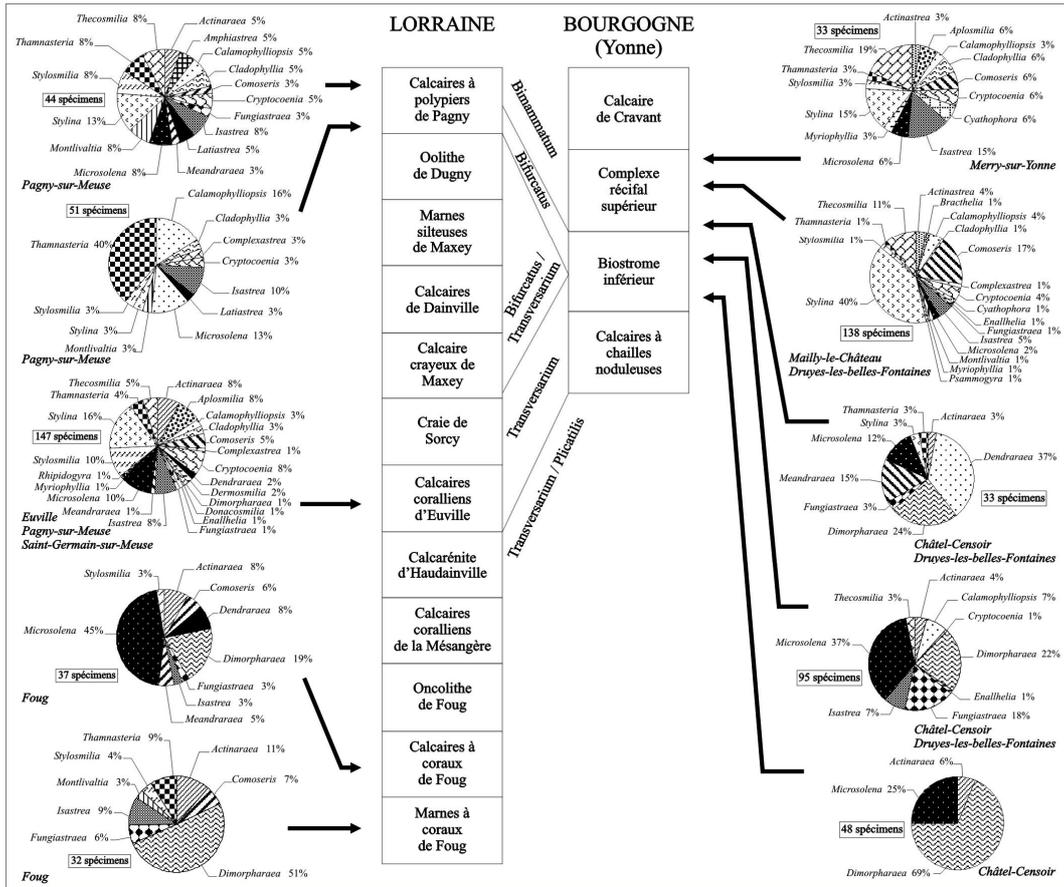


Figure 5 - Composition des communautés coralliennes au cours des différents épisodes récifaux lorrains et bourguignons.

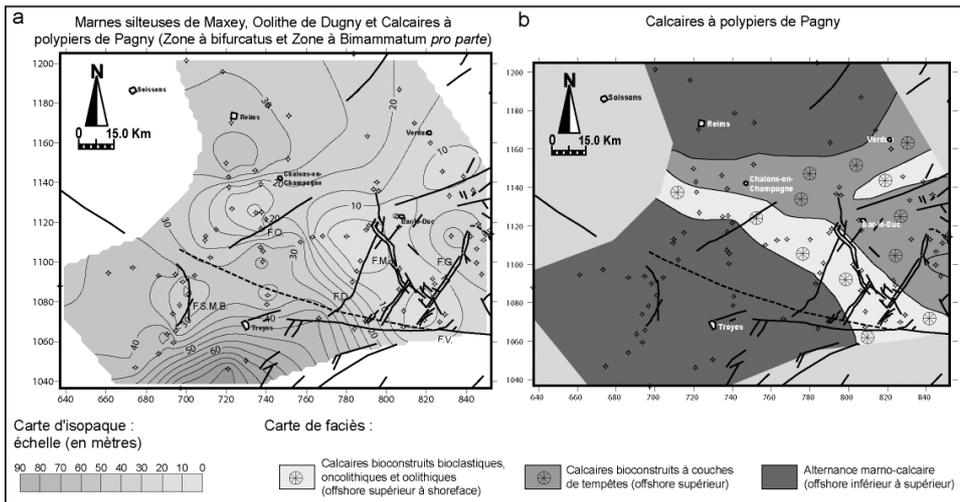


Figure 6 - a) Carte d'isopaques des séries de la base de l'Oxfordien supérieur. Noter l'épaississement des séries en direction de la Bourgogne illustrant le comblement du bassin et l'amincissement au niveau du seuil de la Marne situé à l'aplomb de l'ancienne bordure de plate-forme. b) Carte de faciès montrant la localisation des environnements de dépôt les plus superficiels au niveau du seuil de la Marne.

Apport des investigations multi-échelles pour la construction d'un modèle conceptuel des plateformes carbonatées de l'Oxfordien moyen et supérieur de l'Est du Bassin de Paris

Georges Vigneron, Jacques Delay, Marc Distinguin, Patrick Lebon, Alain Trouiller

ANDRA, Parc de la Croix Blanche, 1-7 rue Jean-Monnet 92298 CHATENAY-MALABRY
CEDEX georges.vigneron@andra.fr

I. INTRODUCTION

Les dépôts de l'Oxfordien moyen et supérieur de l'Est du bassin de Paris, correspondant à la partie régressive du cycle majeur Bathonien inférieur-Oxfordien [1], se présentent sous forme d'une série carbonatée de plus de 300 mètres d'épaisseur. Celle-ci s'organise en différentes plateformes, connues sous les appellations Argovien, Séquanien et Rauracien, et montrant des faciès très variés ; débris coquilliers, sables oolithiques, biohermes, ... [5]. L'Andra a développé à partir des différentes données disponibles une représentation conceptuelle de cette série, à l'échelle d'une zone d'environ 60 x 40 km centrée sur le site de Meuse/Haute-Marne (fig.1). Ce modèle est à la base des modélisations des écoulements régionaux au sein de cette couche potentiellement aquifère et immédiatement sus-jacente à la couche argileuse du Callovo-Oxfordien.

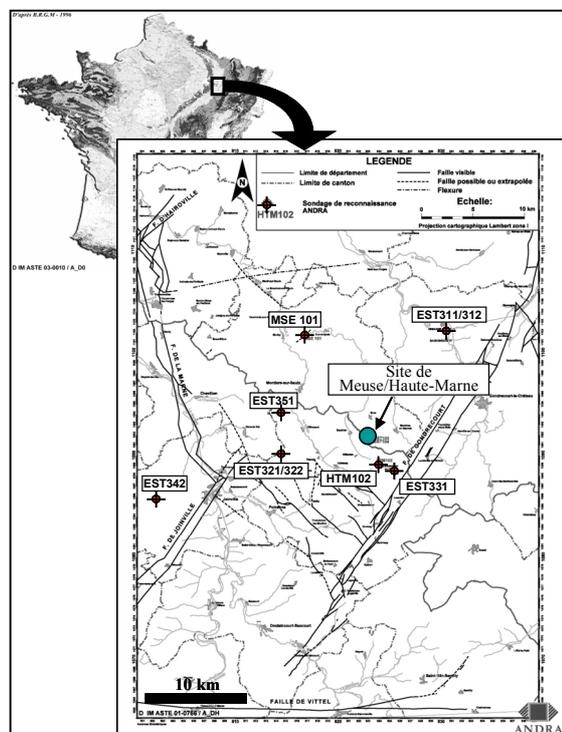


Figure 1 - Localisation du secteur d'étude de l'Andra

II. MODELE DE DEPOT

Le modèle a été construit en tirant partie de la complémentarité des différentes échelles d'investigation : depuis l'échantillon et les diagraphies en forage jusqu'aux données de sismique réflexion 2D et 3D, en passant par les données d'affleurement et les données issues du suivi scientifique du creusement des puits d'accès au laboratoire souterrain [3]. Il s'appuie sur la construction géométrique du modèle global à l'échelle du secteur, complété par une représentation explicite, en 3D, des principales failles (fossé de Gondrecourt, failles de la Marne, accidents secondaires se développant au Sud du site). Cette représentation permet notamment de vérifier, par cohérence entre les différentes données, l'absence de jeux syn-sédimentaires marqués des accidents existants à cette époque.

Le schéma d'organisation stratigraphique construit dans ce cadre géométrique tient compte des faciès de dépôts ainsi que de leurs enchaînements séquentiels [4] (fig.2).

- Au-dessus d'un faciès marno-calcaire, d'une quinzaine de mètres d'épaisseur (ensemble I), permettant la transition entre le Callovo-Oxfordien et les calcaires francs sus-jacents, se développe un ensemble à coraux (madréporaires) et faciès calcaires oncolithiques, sur une épaisseur d'environ 85 mètres (ensemble II). A l'Est, les affleurements montrent des récifs distants de quelques dizaines à quelques centaines de mètres tout au plus, séparés par des calcaires oncolithiques et des calcaires boueux fins. Vers l'Ouest, au niveau de la Marne, ces formations passent latéralement aux faciès marno-calcaires du Bassin de Paris.
- Un ensemble lité, d'abord de texture crayeuse, puis compact, d'environ 70 mètres d'épaisseur (ensemble III) est ensuite distingué. Cette partie litée correspond à des faciès de lagon dont les corps sédimentaires ont des extensions horizontales pluri-kilométriques. Vers le Sud et Sud-Ouest (secteur Poissons/Doulaincourt) cet ensemble passe latéralement à l'oolithe de Doulaincourt qui joue le rôle de barrière hydrodynamique séparant le domaine de lagon de la mer ouverte vers le Sud-Ouest ;
- Enfin, un dernier ensemble, d'environ 120 mètres d'épaisseur, est attribué à l'Oxfordien supérieur /Kimméridgien inférieur (ensemble IV). Dans celui-ci les niveaux récifaux sont rares et dispersés. Les calcaires oolithiques (« oolithe de Saucourt », « oolithe de Lamothe ») alternent avec des calcaires compacts et des calcaires bioclastiques (« calcaires à Astartes »). Vers l'Ouest, au niveau de la Marne, ces calcaires passent à des calcaires fins. L'ensemble est couronné par les calcaires argileux du Kimméridgien inférieur. Dans cette partie, les extensions des corps sédimentaires sont d'ordre pluri-kilométriques.

Cet ensemble est cohérent avec :

- le cadre de connaissances disponibles à l'échelle du bassin [2] (polarité générale des dépôts et notamment la position de la transition vers des faciès plus marins, pourtant tracée à une autre échelle, à partir de données plus anciennes) et à l'échelle plus locale [5], [6], [7], [8] ;
- les modélisations stratigraphiques menées à l'échelle du bassin (modélisation DIONISOS de l'IFP) en appui des modélisations hydrogéologiques en cours [9].

Ce modèle a été conforté par les résultats de la campagne de forages profonds de 2003 [10], postérieure à sa construction.

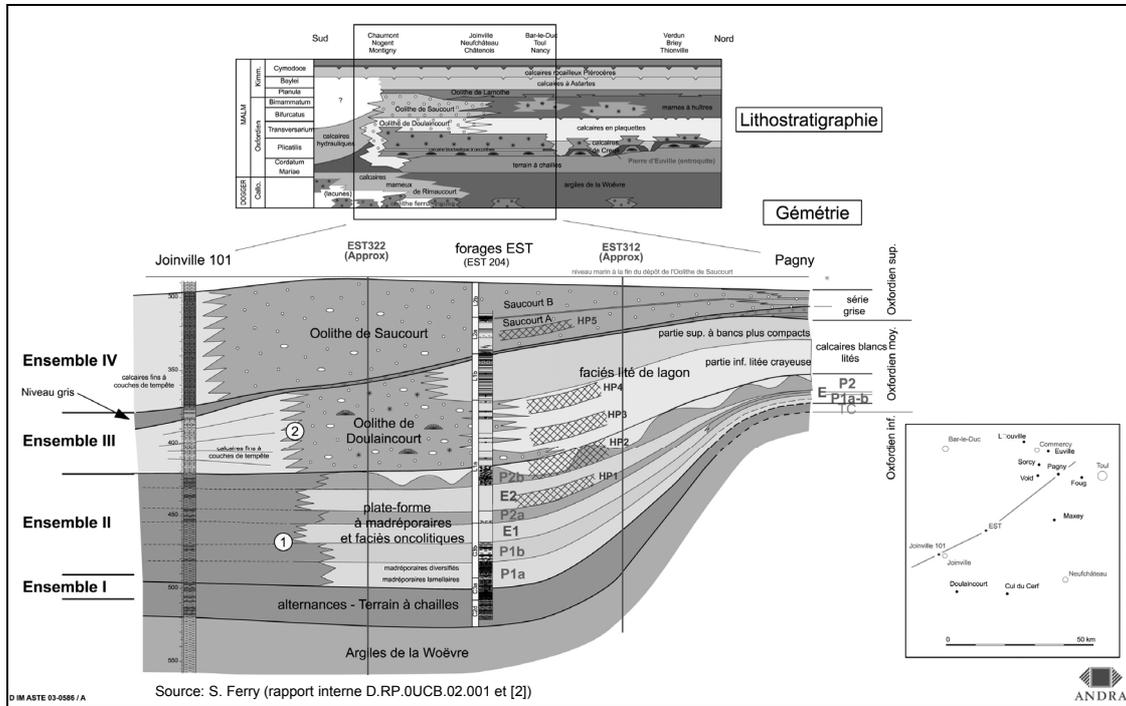


Figure 2 - Organisation spatio-temporelle des faciès de la plate-forme carbonatée oxfordienne

III. EVOLUTION DIAGENETIQUE

A l'échelle du secteur et lorsqu'il se trouve sous couverture, cet ensemble carbonaté est affecté par une forte diagenèse, à l'image de ce qui est observé dans les carbonates du Dogger de l'auréole orientale du bassin de Paris. Cette diagenèse, résultat de circulations de fluides de basse température, est à l'origine d'une recristallisation intense des carbonates dans les pores et les fissures préexistantes. Cet événement majeur, plus récent et masquant en partie les phases diagénétiques précoces [7], est à relier aux phases tectoniques d'âge Crétacé à Cénozoïque (émersion du bassin) ou Oligocène (dernier mouvement important des failles régionales). L'état actuel a donc été acquis il y a au moins 30 millions d'années [11].

En conséquence l'extension des zones soumises à ces phénomènes de diagenèse est de l'ordre de celle du secteur, voire plus importante. Ceci semble confirmé par la valeur de perméabilité moyenne de l'Oxfordien pris dans sa globalité sur le secteur (de 10^{-9} à 10^{-8} m/s), significativement inférieure à celle généralement attribuée à cette formation dans le centre du bassin de Paris (environ 10^{-7} m/s).

IV. RESULTATS DES INVESTIGATIONS HYDROGEOLOGIQUES

Sur le site de Meuse/Haute-Marne et aux alentours, les approches des principaux paramètres ont été réalisées à partir de mesures représentatives d'échelles très différentes : échantillons, tests entre obturateurs, pompage globaux, mesures directes de débits,... La remise en perspective de cet ensemble de mesures permet une description fine des variabilités verticales et horizontales.

Les mesures de porosité montrent, dans les carbonates de l'Oxfordien, des valeurs très cohérentes, quelles que soient les méthodes utilisées. Les valeurs sur échantillons et cuttings se corrélaient de manière satisfaisante avec celles mesurées en diagraphies (notamment avec l'outil de résonance magnétique - CMR) et celles restituées par l'inversion des données sismiques. La formation se présente comme un ensemble assez compact (porosité moyenne inférieure à 10 %) au sein duquel s'individualisent des passées plurimétriques à décimétriques plus poreuses. Ces niveaux ont été définis avec une porosité supérieure à 18%. Celle-ci peut atteindre 26 %. La porosité moyenne au sein de ces passées est de 20%. Conceptuellement, ces niveaux ont été regroupés en 7 horizons poreux (« niveaux Hp ») sur la plateforme du laboratoire.

Sur la totalité de la formation les transmissivités globales sont faibles et restent semblables d'un forage à l'autre : entre 3.10^{-7} et 5.10^{-6} m²/s, illustrant ainsi l'influence de la diagenèse. La quasi-totalité des venues d'eaux rencontrées est à associer aux niveaux poreux. La dispersion des valeurs de transmissivités n'est pas plus importante sur l'ensemble du secteur que sur la plateforme même du laboratoire, ce qui met en évidence le faible impact, à l'échelle de toute la formation, des variations de faciès, même si, d'un forage à l'autre les participations respectives de chacun des horizons poreux peuvent varier. Les deux seules exceptions sont dues à la traversée d'une diaclase ouverte dans le forage EST321 et du niveau poreux (Hp7), proche de la surface dans le forage EST311, traduisant l'influence des perturbations de surface.

Les tests in situ n'ont mesuré que la perméabilité des différents niveaux producteurs rencontrés essentiellement au sein des horizons poreux. Dans la plupart des cas la perméabilité obtenue est comprise entre 10^{-9} m/s et 10^{-8} m/s. Les rares valeurs dépassant 10^{-8} m/s correspondent à des niveaux très peu épais (quelques mètres, voire moins d'un mètre) et non continus à une échelle hectométrique, comme cela été montré sur le site du laboratoire. Pour ces niveaux, il peut s'agir soit d'un niveau de faible épaisseur et donc non échantillonné, soit d'un développement très localisé d'une perméabilité fissurale discrète, ainsi qu'elle a été mise en évidence lors du suivi scientifique des puits d'accès au laboratoire souterrain (faisceaux de joints sub-verticaux fournissant des débits faibles, de l'ordre de quelques l/mn). De telles fissures semblent pouvoir expliquer la charge unique qui existe sur l'ensemble de la formation [12]. Néanmoins, elles ne permettent pas une circulation intense entre horizons poreux, les analyses chimiques des eaux montrant des faciès différents entre les horizons poreux supérieurs et inférieurs et les réponses au creusement des puits étant différentes. Ce type de fissure reste rare au sein de la micro-fracturation existante, fréquemment colmatée par de la calcite.

Les mesures sur échantillons sont cohérentes avec ces approches. Les analyses sur cuttings montrent, jusqu'à une porosité de 18% environ, une nette relation entre perméabilité et

porosité (fig.3). Au-dessus de 18% de porosité, la valeur de $4 \cdot 10^{-9}$ m/s déterminée ici est tout à fait comparable avec celle mesurée par les tests *in situ*.

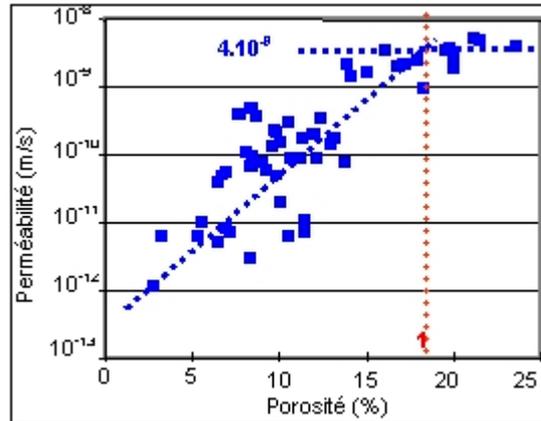


Figure 3 - Porosité et perméabilité des cuttings dans l'Oxfordien calcaire (d'après IFP)

Le suivi hydrogéologique des rabattements dus au creusement des puits d'accès au laboratoire souterrain, à partir d'un réseau de forages dédiés, a permis de consolider, à l'échelle du site, ce modèle des horizons poreux et notamment leurs connections hydrauliques [12]. Des travaux sont actuellement en cours en vue de d'affiner cette modélisation des rabattements. L'objectif est d'accéder à des valeurs à l'échelle pluri hectométrique de la perméabilité des formations se situant entre les horizons poreux.

Les forages EST321 et EST322, proches l'un de l'autre et situés à une dizaine de kilomètres à l'Ouest-Sud-Ouest du site, ont rencontré des venues d'eau très importantes dans l'Oxfordien carbonaté. Ces venues correspondent à des diaclases d'ouverture infra centimétrique à centimétrique. La transmissivité globale, déduite d'essai de pompage, est de $3 \cdot 10^{-3}$ m²/s, soit de trois ordres de grandeur supérieure à celle des autres forages. Ces forages sont situés au milieu d'une zone dans le prolongement du réseau de failles secondaires qui se développe entre le fossé de Gondrecourt et les failles de la Marne. Il est donc susceptible d'exister, dans cette région, une fracturation diffuse pouvant affecter la productivité des forages [10].

V. ORGANISATION SPATIALE DES NIVEAUX POREUX

Les études menées et les observations en puits montrent que les niveaux poreux sont, dans le détail, sous contrôle stratigraphique. Ils semblent correspondre, dans la majorité des cas, à une intensification de la transformation crayeuse secondaire qui affecte certains faciès de dépôt primaires, préférentiellement les faciès fins et homogènes [4]. Ce contrôle stratigraphique explique la variabilité spatiale mise en évidence pour certains de ces horizons à partir des diagraphies différées et des traitements en « impédance acoustique » des données géophysiques [12]. Au plan géométrique, ces horizons apparaissent donc globalement stratiformes (ce qui explique leur corrélation entre forages proches) et pourraient être décrits comme des strates « nuageuses » superposées, plus ou moins connectées mais hétérogènes dans le détail, ce qui correspond à l'allure observée sur les données sismiques inversées [12]. La continuité de ces horizons peut donc, en grand et à l'échelle du secteur, être déduite de la répartition des faciès sédimentaires correspondants. Il devient alors possible de regrouper les horizons poreux en trois ensembles en terme de répartition et de variabilité.

- Hp1 et Hp2, situés dans l'ensemble lithologique II (fig.4), montrent une variabilité importante, d'ordre hectométrique, contrôlée par les récifs entre lesquels la porosité se développe. Les extensions horizontales de ces horizons peuvent être considérées comme contraintes par celle de la plate-forme correspondante.
- Les horizons Hp3 et Hp4 (Ensemble III, 0) montrent des variabilités pluri-kilométriques. Leur extension semble liée à celle des faciès fins de lagon de cette partie supérieure de l'Oxfordien moyen : grossièrement depuis Void, au Nord-Est jusqu'à une ligne passant approximativement à l'Ouest des forages MSE101 et HTM102 et à l'Est du forage EST321, ce dernier ayant clairement rencontré à ce niveau les faciès de barrière, fortement cimentés et peu poreux.
- Les horizons de l'Oxfordien supérieur (Hp5 à Hp7), se corrélent mal, même si dans cet ensemble un à deux horizons poreux au moins sont systématiquement reconnus aux forages. La constance, à cette échelle, de l'organisation des faciès, permet en première approche de considérer, pour cet intervalle, que les caractéristiques moyennes mesurées sur le site en terme d'horizons poreux peuvent être extrapolées sur l'ensemble du secteur.

VI. REPRESENTATION CONCEPTUELLE

La connaissance des différentes plateformes qui se sont succédées durant l'Oxfordien moyen et supérieur et donc la reconstitution du schéma paléogéographique, permettent de construire le modèle conceptuel de l'Oxfordien carbonaté en terme de faciès mais également en terme d'extension des horizons poreux (0). A la base, les termes correspondant à la mise en place de la première plate-forme carbonatée sont toujours très peu perméables sur l'ensemble du secteur.

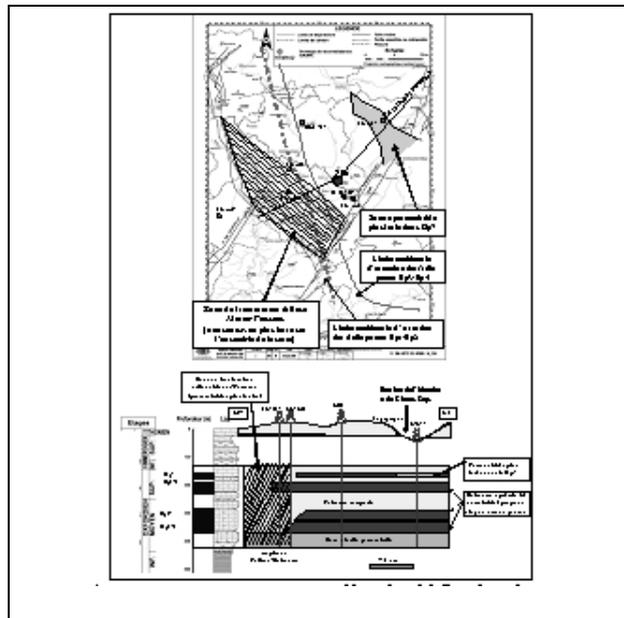


Figure 4 - Représentation conceptuelle de l'Oxfordien carbonaté. Extension des principaux éléments (en haut) et coupe synthétique (en bas)

Au-dessus, les horizons poreux Hp1 à Hp4 existent dans toute la partie Nord-Ouest du secteur.

Dans l'Oxfordien supérieur, des horizons poreux existent systématiquement même s'ils ne semblent pas pouvoir toujours être corrélés stratigraphiquement. Ils peuvent donc être considérés comme continus, ou quasi-continus, sur le secteur. L'horizon le plus superficiel (Hp7) est affecté d'une perméabilité plus forte à l'aplomb des vallées afin de tenir compte des altérations dues aux perturbations de surface. Enfin, les résultats des forages EST321/EST322 permettent de définir une zone à fracturation diffuse, englobant les failles de direction N150° reconnues en surface dans la région de Poissons et jusqu'aux failles de la Marne. Dans cette zone, des perméabilités plus fortes sont affectées à l'ensemble des formations.

VII. CONCLUSION

Les travaux de l'Andra apportent un éclairage particulier sur une formation carbonatée singulière, par ses porosités et perméabilités basses, dans une zone par ailleurs peu explorée à l'échelle du Bassin de Paris. La compréhension de l'architecture de la formation et de l'organisation des zones plus poreuses et perméables a demandé la mise en œuvre d'une palette complète d'outils d'investigations permettant d'avoir accès à des échelles très différentes. Cette mise en œuvre a nécessité l'implication d'équipes pluridisciplinaires (géologues, sédimentologues, diagraphistes, hydrogéologues, géophysiciens, ...).

La continuité d'approche dans les échelles permet d'illustrer l'importance de l'échelle de l'affleurement (échelle métrique à décimétrique). Cette dernière est un lien irremplaçable entre les échantillons et les données de forages, d'une part, permettant l'accès à des données ponctuelles, et les outils sismiques d'autre part, fournissant une aide précieuse à l'extrapolation des données à une échelle kilométrique (fig.5).

Cette échelle métrique à décimétrique fait souvent défaut lors d'études sur des formations sous couverture, les affleurements étant situés en bordure du bassin. Le suivi du creusement des ouvrages du laboratoire souterrain offre à l'Andra l'occasion d'accéder à cette échelle, sur le site même, dès le creusement des puits d'accès et sur des formations non perturbées par les altérations de surface.

Références bibliographiques

- [1] Guillocheau F., Robin C., Allemand P., Bourquin S., Brault N., Dromart G., Friedenberg R., Garcia J.-P., Gaultier J.-M., Gaumet F., Grosdoy B., Hanot F., Le Strat P., Mettraux M., Nalpas T., Prijac C., Rigollet C., Serrano O. & Grandjean G., 2000 – Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin : 3D stratigraphic constraints. *Geodin. Acta* 13, pp.189-246.
- [2] Mégrien Cl. (coordinateur), 1980 - Synthèse géologique du bassin de Paris. 3 volumes. *Mémoires du BRGM* n°101, 102 et 103.
- [3] Oudin T & Yven B., 2004 – Mise à jour du modèle géologique 3D du secteur Meuse/Haute-Marne. *Recherches pour le stockage des déchets radioactifs. Bilan des études et travaux 2003*, pp 76-81, Andra.
- [4] Ferry S. & Trouiller A., 2003 – Modèle sédimentaire de l'Oxfordien calcaire de l'Est du Bassin de Paris. *Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Bilan des études et travaux 2002*, pp. 59-64, Andra.

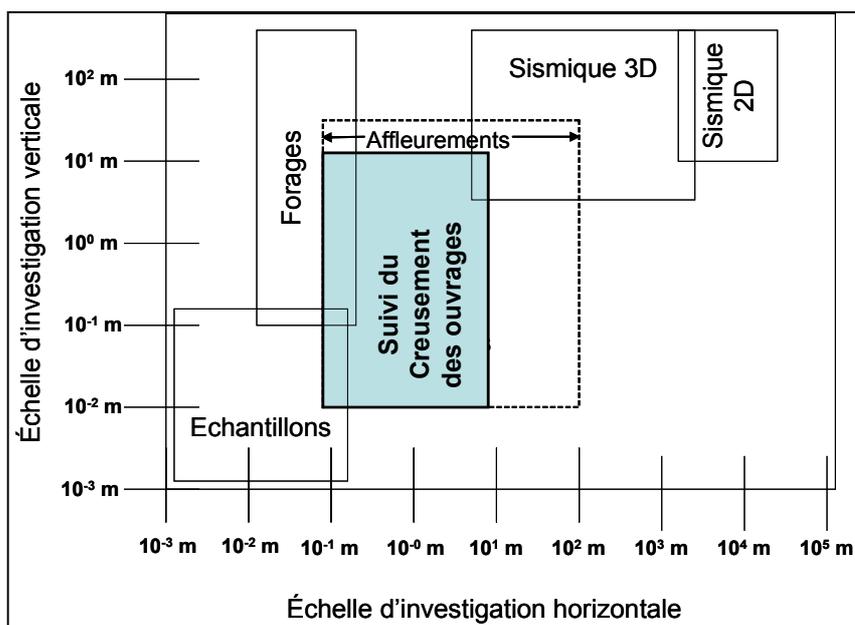


Figure 5 - Echelles d'investigations.

- [5] Humbert L., 1971 – Recherche méthodologique pour la restitution de l'histoire bio-sédimentaire d'un bassin - L'ensemble carbonaté oxfordien de la partie orientale du bassin de Paris. Thèse d'état Univ. Nancy, n°AO5096, 364 p. 120 pl. HT.
- [6] Hilly J. & Haguenaer B., 1979 – Lorraine – Champagne – Collection Guides géologiques régionaux. Masson Ed.
- [7] Vincent B., 2001 – Sédimentologie et géochimie de la diagenèse des carbonates. Application au Malm de la bordure Est du bassin de Paris. Thèse Univ. Dijon, 306 p. 2 annexes.
- [8] Carpentier C., 2004 - Géométries et environnements de dépôt de l'Oxfordien. - Thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy, 470 p.
- [9] Benabderrahmane H., Grataloup S. & Le Gallo Y., 2004 – Modèle hydrogéologique régional. *Recherches pour le stockage des déchets radioactifs. Bilan des études et travaux 2003*, pp. 82-88, Andra
- [10] Delay J., 2004 – Principaux résultats des forages scientifiques profonds. *Recherches pour le stockage des déchets radioactifs. Synthèse du bilan des études et travaux 2003*, Andra (à paraître).
- [11] Buschaert S., 2001 – Origine, âge et processus physico-chimiques des circulations de fluides dans les fractures : exemple de socle sous couverture (Vienne) et de formations riches en argiles (Gard, Est). Thèse Univ. Nancy-I, 260 p.
- [12] Delouvrier J. & Delay J., 2004 – Multi-level groundwater pressure monitoring at the Meuse/Haute-Marne Underground research laboratory, France. *Recherches pour le stockage des déchets radioactifs. Bilan des études et travaux 2003*, pp. 376-380, Andra.
- [13] Curial A. & Yven B., 2003 – Estimation de la variabilité de la porosité dans les formations carbonatées du Malm. *Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Bilan des études et travaux 2002*, pp. 65-70, Andra.

Problématique de gestion des nappes libres du Jurassique à l'étiage ; cas de la Champagne berrichonne et du Poitou

Pascal Billault¹ Frédéric Verley²

¹ Agence de l'eau Loire Bretagne Agence de l'eau Loire-Bretagne Av. de Buffon - BP 6339
45063 ORLEANS Cedex 02 pascal.billault@eau-loire-bretagne.fr

² DIREN Centre Av. de Buffon 45062 ORLEANS cedex 2
Frédéric.VERLEY@centre.environnement.gouv.fr

I. CONTEXTE GENERAL

Les faciès calcaires des formations du Jurassique moyen et supérieur favorisent la présence de sols peu épais et séchant sur les plateaux du Poitou et de Champagne berrichonne du Cher et de l'Indre ; le développement de l'agriculture céréalière intensive, en lieu et place de l'élevage dans ces régions, a conduit à un essor considérable de l'irrigation lors des années 1980 à 1990. Ceci n'a pu se produire que grâce à la présence d'importantes nappes d'eau souterraine contenues dans les calcaires fissurés du Dogger et de l'Oxfordien.

Les sécheresses exceptionnelles du début des années 90 ont néanmoins mis en évidence que le système avait trouvé ses limites et que ces nappes pouvaient, dans certaines circonstances, ne plus satisfaire tous « leurs clients », usagers économiques ou milieu naturel. La succession d'hivers secs, avec très peu de recharge des nappes, et d'étés secs avec beaucoup de pompage, a en effet mis à mal la pensée que ces nappes étaient inépuisables et bon nombre de rivières se sont ainsi retrouvées à sec ou en rupture d'écoulement sur tout ou partie de leur cours.

Qualifiées d'hyper-réactives, tant elles sont sensibles aux moindres aléas climatiques, ces nappes présentent une capacité de stockage malheureusement fort réduite dans le temps puisque la restitution aux cours d'eau est également très rapide. Il s'agit de nappes à cycle annuel bien marqué où les niveaux de hautes eaux plafonnent, ne laissant pas de place à un stock complémentaire ; les hautes eaux d'une année donnée peuvent en outre être très basses comme en témoigne la figure 1 où les hautes eaux de 1990 et 1992 sont au niveau ou même plus basses que les étiages de 1999 et 2000. On note également sur ce graphe une variabilité interannuelle importante du niveau d'étiage, de l'ordre de 5 mètres par rapport à une amplitude maximum de 20 mètres.

L'hyper-réactivité présente toutefois un avantage : celui de pouvoir bénéficier de recharges tardives si les conditions climatiques sont favorables ; il n'est en effet pas rare d'observer des recharges très significatives en fin de printemps voire même en été. Ces recharges sont bien entendu très précieuses puisqu'elles décalent dans le temps la courbe de tarissement et diminue d'autant le risque d'un étiage précoce et souvent sévère (cf figure 2).

Cette période du début des années 90 fut tendue dans l'histoire de la police des eaux et a amené à réfléchir aux meilleures conditions de gestion de ces ressources, puissantes mais fugaces, dont certaines ont d'ailleurs été classées « Nappes Intensément Exploitées » dans le SDAGE du bassin Loire Bretagne ; cette nomination s'accompagne de préconisations pour la mise en place de structures et d'outils de gestion.

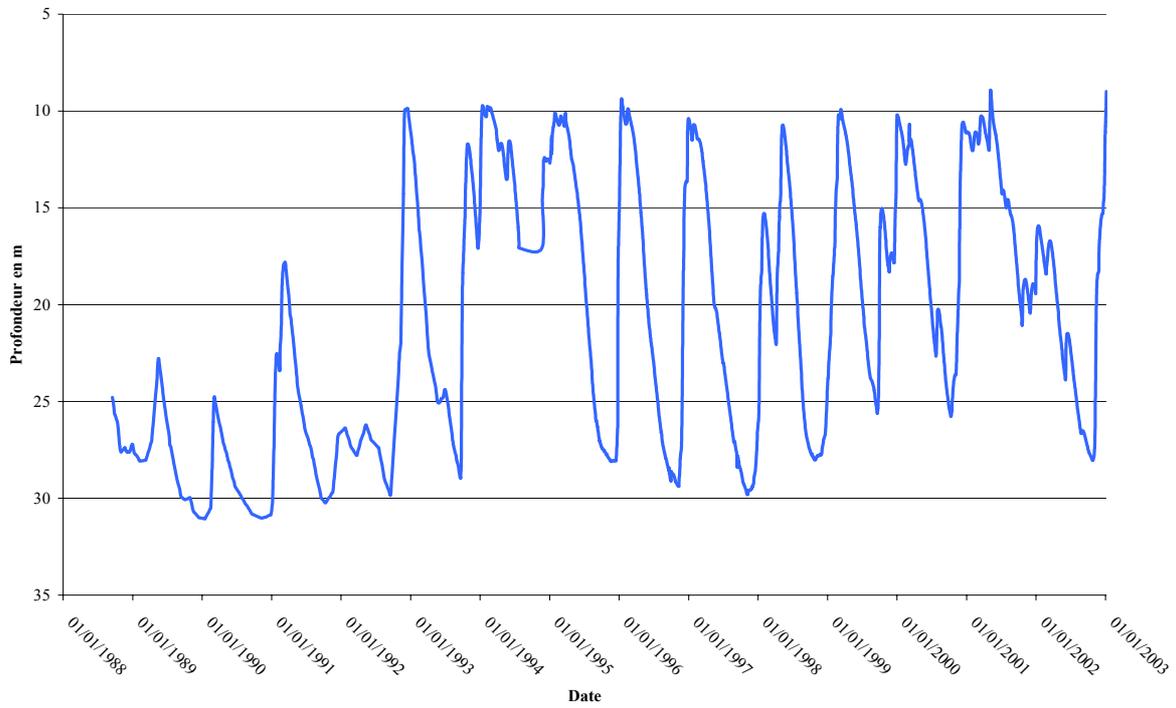


Figure 1 - Chronique piézométrique de Plainpiéd (18)

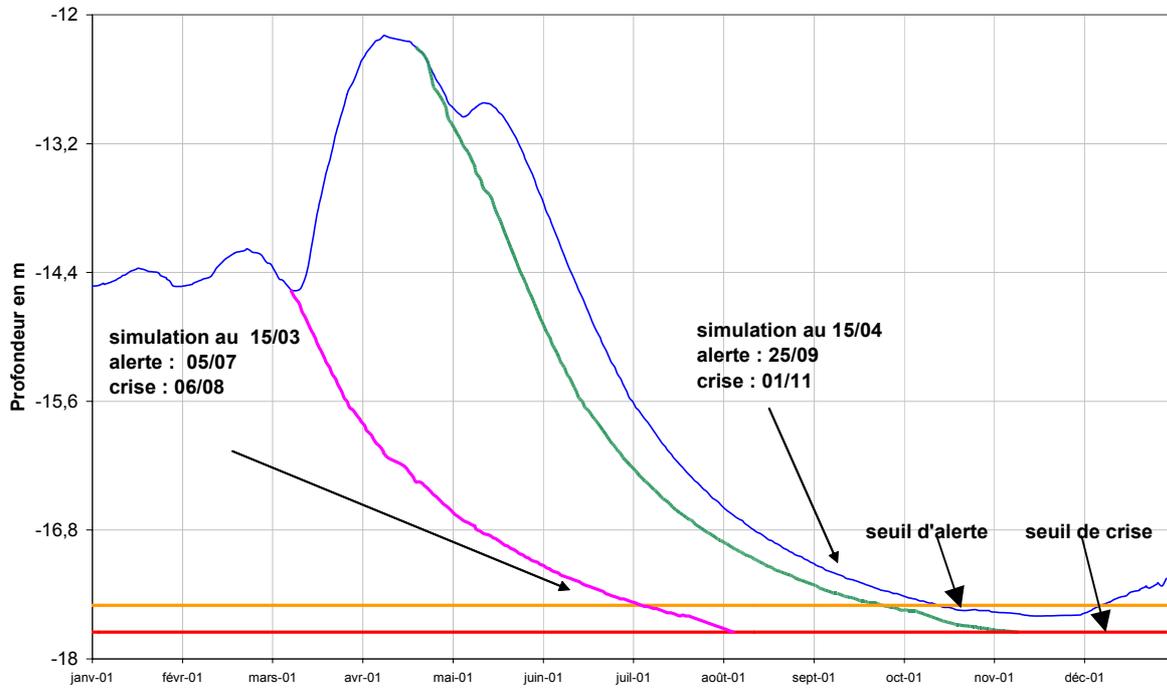


Figure 2 - Impact des recharges tardives sur l'étiage ; piézomètre de Rians (18)

II. PRINCIPES DE GESTION

Au vu des objectifs de la loi sur l'eau de 1992, la gestion équilibrée de la ressource en eau doit permettre de respecter un débit objectif d'étiage dans les cours d'eau qui constituent un usager à part entière de la nappe d'eau souterraine qui les alimentent ; ces débits objectifs ont d'ailleurs été définis pour les cours d'eau principaux et approuvés dans le SDAGE en 1996.

Les règles de gestion adoptées dans les années 1990 par les services de police des eaux consistaient essentiellement à des restrictions temporaires de pompage pour les irrigants ce qui a eu pour effet de pénaliser principalement ceux qui avaient une capacité de pompage ou une ressource limitée ; l'impact de ces mesures sur le milieu naturel fut en outre très insuffisant.

La mise en œuvre de règles de gestion plus efficaces pour le milieu naturel passe par l'acceptation du principe de liaison nappe-rivière par les usagers : il faut en effet qu'ils admettent que même s'il subsiste encore une bonne hauteur d'eau dans le puits ou le forage ils peuvent être contraints à réduire leurs prélèvements pour conserver un débit d'alimentation du cours d'eau suffisant.

Plus concrètement cela se traduit par la mise en évidence de corrélations nettes entre niveaux des nappes et débits ou hauteurs des rivières (cf figure 3) et par la détermination de différents seuils piézométriques corrélés aux objectifs de débit fixés en rivière et leurs seuils d'alerte.

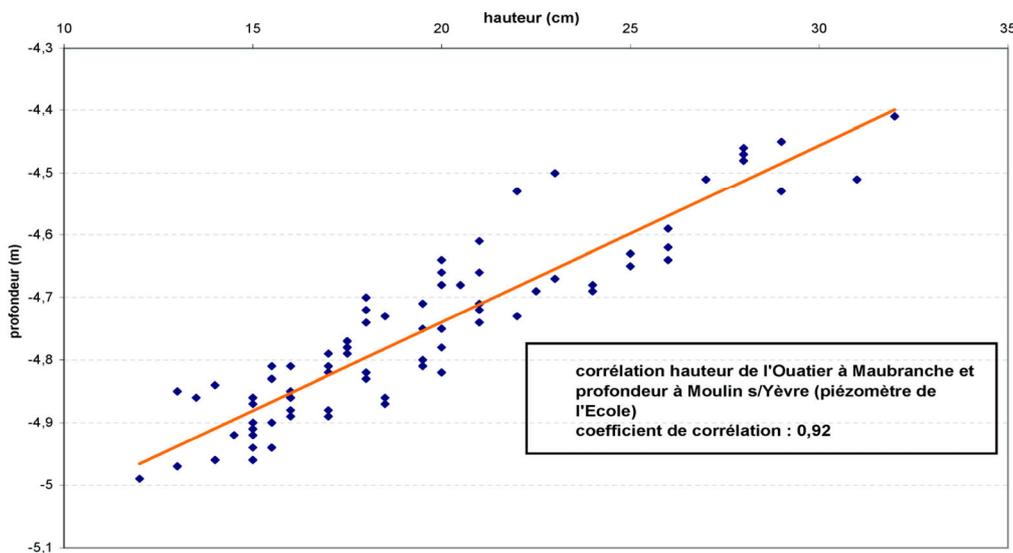


Figure 3- Corrélation hauteur nappe et rivière dans le bassin de l'Ouatier (18)

Pour illustrer nos propos nous nous appuyerons sur le dispositif de gestion expérimental mis en place dans les bassins du Colin et de l'Ouatier, rivières de 1^{ère} catégorie piscicole, affluents de l'Yèvre dans le Cher ; cette démarche engagée en collaboration avec les services de l'état, la chambre d'agriculture et la profession agricole est transposable à tous les bassins versants de ce même contexte hydrogéologique et existe déjà également dans les bassins du Clain et de la Sèvre Niortaise en Poitou- Charentes.

Une fois les objectifs de hauteur ou débits fixés sur la rivière drainante (débit minimum biologique, débit objectif d'étiage, débit de seuil d'alerte, débit de crise), la corrélation permet d'établir sur des piézomètres considérés comme représentatif du bassin versant les seuils piézométriques correspondants ; en l'occurrence deux seuils ont été établis sur le piézomètre de Rians (figure 2). L'ajout de quelques centimètres de marge de sécurité permet d'améliorer l'anticipation des mesures à prendre.

Pour atteindre ces objectifs un volume prédéterminé est attribué aux irrigants ; il s'agit la plupart du temps du fruit de la négociation entre les acteurs concernés : le quota irrigation est souvent un compromis entre l'offre de la ressource et la demande des irrigants calculée par le produit de la surface irriguée (non maîtrisable en interannuel) et du besoin agronomique moyen de la culture, 2300 m³/ha en l'occurrence sur ce bassin expérimental ; ce volume est ensuite réparti par périodes (décades ou semaines) sur la campagne potentielle d'irrigation.

Les seuils d'alerte constituent le garde-fou du système : si le volume attribué est trop important, les restrictions interviennent plus rapidement en saison. Le franchissement des 2 seuils entraîne ipso facto une réduction de 15 % puis 30 % du volume alloué restant à consommer.

La prise en compte de seuils piézométriques, mesure très récente dans le domaine de la gestion des ressources en eau dans notre région, permet en outre de s'affranchir de tous les épiphénomènes de remontées de débits de rivière liés à des épisodes pluvieux peu significatifs ou à des manœuvres de petits barrages en amont de la station hydrométrique ; ils assurent un complément indispensable aux seuils hydrométriques sur les rivières.

Ce dispositif devient également très rapidement un formidable outil de communication : grâce aux courbes de tarissement caractéristiques du réservoir, peu influencées, il permet de fournir aux usagers, longtemps à l'avance, les estimations des premières dates de franchissement des seuils d'alerte, sous réserve de recharge tardive éventuelle. Les prévisions sont d'ailleurs mises à jour 2 fois par semaine sur le site internet de la DIREN pendant la période des besoins c'est-à-dire de mai à août.

En revanche dans ce contexte hydrogéologique on ne peut pas attribuer un volume garanti en début d'année, au moment où se décident les assolements ; la campagne d'irrigation est donc aléatoire et les règles de gestion interviennent pour tenter de garantir un écoulement suffisant dans les cours d'eau exutoires.

III. CONCLUSION

La mise en œuvre très récente de la gestion volumétrique dans les nappes des calcaires du Jurassique en Champagne berrichonne ou dans le Poitou est un progrès indéniable ; le fonctionnement même de ces nappes très réactives ne permet toutefois pas de gestion souple et prévisionnelle à moyen terme. Leur vidange très rapide vers les cours d'eau leur confère une faible capacité de stockage dans le temps et les étiages peuvent être très sévères, notamment lorsqu'ils sont accentués par des prélèvements estivaux importants pour l'irrigation.

Les dispositifs de gestion actuellement en place méritent sans aucun doute d'être affinés et l'observation des quelques années passées doit permettre de mieux appréhender le volume global attribué aux irrigants, même si des économies d'eau substantielles ont pu être observées.

L'introduction de seuils d'alerte piézométriques constitue une avancée certaine puisqu'ils permettent une meilleure anticipation de l'étiage des cours d'eau drainants et une communication plus claire sur les mesures de restrictions adoptées.

SESSION 3

Une ressource ultime, les aquifères profonds

Approche par la géochimie de l'hydrodynamisme de la nappe de l'Albien dans le Bassin de Paris

Y. Raoult¹, J. Boulègue², Ph. Olive³, J. Lauerjat²

¹ UMR Sisyphe, UPMC, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France. actuellement
BURGEAP yraoult@excipe.com

² Laboratoire de Géochimie et de Métallogénie, UPMC, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex
05, France

³ Centre de Recherches Géodynamiques, UPMC, BP 510, 47 av. de Corzent, 74203 Thonon
cedex, France.

I. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les aquifères du Crétacé inférieur dans le bassin de Paris constituent une réserve profonde de très grande qualité qui s'étend sur une superficie de plus de 80 000 km². Le Crétacé inférieur comprend plusieurs formations sableuses regroupées sous la dénomination de deux réservoirs principaux : à la base, l'aquifère du Néocomien et au-dessus, l'aquifère de l'Albien. Les affleurements du Crétacé inférieur forment une auréole sur le pourtour oriental du bassin de Paris [1, 2]. Ils sont également connus à l'W, mais sur des surfaces réduites. L'aquifère multicouche de l'Albien est constitué de trois niveaux sableux séparés par des argiles intercalaires [3] : les sables Verts, de 40m d'épaisseur au maximum dans le centre du Bassin et comportant des intercalations argileuses, les sables de Drillons, de 40 m d'épaisseur, et les sables de Frécambault, en moyenne de 50 m. Les argiles intercalaires sont souvent peu épaisses, donnant une certaine homogénéité à la nappe. Au toit de la formation albienne, les argiles du Gault et les marnes de Brienne, constituent une assise semi-perméable continue sur l'ensemble du bassin de Paris qui sépare l'aquifère Albien de la Craie et maintient l'eau de l'Albien sous pression.

II. PIEZOMETRIE DE L'AQUIFERE DE L'ALBIEN

Plusieurs campagnes dans le Bassin de Paris ont permis l'acquisition des données permettant d'établir une carte piézométrique actualisée. Les valeurs en Ile de France sont récentes, pour la plupart de 1995, ce qui est important car cette zone du Bassin est la plus influencée par les prélèvements. Pour le reste du Bassin, nous disposons de données moins récentes mais qui peuvent être utilisées, dans une approche régionale. En effet, la piézométrie n'a pas varié dans ces régions, de façon significative depuis les années 70. La carte piézométrique de l'aquifère captif de l'Albien (99 points) est très différente de celle reconstituée pour 1930 (26 points, Figure 1) car les prélèvements sont passés d'environ 7Mm³/an en 1930 à 35Mm³/an en 1939 [4]. Le phénomène important y est l'absence de cône de dépression piézométrique au droit de Paris (+ 126 m en 1841) ce qui modifie considérablement l'allure des isopièzes au centre du Bassin. Il existe une zone centrale au Nord de l'Aube qui correspond aussi au maximum de subsidence où le gradient de charge est pratiquement nul, ce qui implique l'absence de circulation horizontale dans l'aquifère de l'Albien dans cette zone.

III. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSES

L'échantillonnage a été réalisé en plusieurs campagnes pendant les années 1996 à 1998. Soixante douze échantillons d'eau ont pu être prélevés dont : 49 forages et 13 sources dans la nappe de l'Albien, 7 forages dans le Néocomien, 1 forage dans le Jurassique (Argovien) et 2 puits dans la nappe libre cénomanienne. Les échantillons pour l'analyse du ^{14}C du carbonate total dissous (ΣCO_2) sont réalisés en précipitant sur place les carbonates sous forme de calcite et withérite. Les activités du ^{14}C et les $\delta^{13}\text{C}$ sont mesurés au Centre de Recherches Géodynamiques (Université de Paris VI). Les mesures du pH, de l'Alcalinité et de la température sont effectuées sur place. Les anions sont dosés par chromatographie ionique ; les cations et les traces à l'absorption atomique flamme et four au Laboratoire de Géochimie et de Métallogénie (Université de Paris VI).

IV. LES ISOTOPES DU CARBONE

La mesure de l'activité en ^{14}C du carbone minéral total dissous permet d'estimer le temps de séjour de l'eau souterraine depuis son infiltration. L'"âge" apparent de l'eau augmente lorsque l'activité ^{14}C mesurée diminue. Les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ permettent de prendre en compte une éventuelle participation de roches carbonatées. Néanmoins, cet effet est limité car l'eau de l'aquifère de l'Albien circule dans des sables non carbonatés. Une carte représentant la répartition spatiale de l'activité du ^{14}C dans les eaux de l'Albien captif a été établie à partir de nos mesures et de celles de Guillaume [5]. Globalement l'activité ^{14}C diminue des affleurements vers le centre du Bassin en suivant les gradients de charge des lignes d'écoulement. Il existe donc une circulation horizontale au sein de l'aquifère Albien et une recharge par ses affleurements. De fortes valeurs d'activité, et donc des âges récents, sont mesurées à l'Ouest, ce qui démontre la recharge de l'Albien dans cette région par drainance à partir de l'aquifère libre sus-jacent du Cénomani. A l'Est, on observe à proximité des affleurements, des activités inférieures à 5 pcm qui sont en contradiction avec la piézométrie actuelle qui indique une ligne d'écoulement vers la région parisienne. Le $\delta^{13}\text{C}$ (ΣCO_2) des eaux de l'Est nous indique que certaines eaux peuvent avoir eu des contacts avec une roche carbonatée, ce qui diminue l'activité du ^{14}C . Néanmoins, tout ne peut pas être expliqué par ce processus. La piézométrie avant 1930, montre il existait toute une zone dans le Centre et à l'Est du Bassin où le gradient de charge était quasiment nul, et donc une circulation horizontale dans l'aquifère pratiquement inexistante. La lithologie argileuse de l'Albien dans cette région à faibles transmissivités (inférieures à $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$), favorise donc une circulation de l'eau très lente.

V. LA CHIMIE DE L'EAU

Les éléments dissous ayant un comportement chimique conservatif dans l'aquifère captif de l'Albien, tels que les chlorures, nous apportent des informations hydrodynamiques. En effet leurs variations sont attribuables uniquement aux caractéristiques de la recharge en fonction du temps et à l'augmentation de la concentration par dissolution de silicates (sans doute négligeable pour les seuls chlorures). Ainsi dans le cas de Cl les variations observées donnent deux informations : (i) la concentration en chlorure, en début de captivité, peut avoir varié au cours du temps en fonction notamment des paléoclimats. Cette explication est plausible car les eaux de l'Albien peuvent avoir des temps de résidence supérieurs à 30 000 ans dans le centre du Bassin. (ii) la seconde cause de variation est un mélange d'eau par un apport d'un aquifère sus ou sous-jacent avec des concentrations en éléments dissous significativement différentes de l'Albien. Les prélèvements que nous avons effectués dans le Néocomien montrent, pour une même zone, des concentrations plus élevées que dans l'Albien en Cl, Na

et F notamment. Les concentrations de ces éléments ont d'autant plus tendance à augmenter dans le Bassin de Paris que les aquifères sont profonds [6 ; 7 ; 8].

Une large zone homogène à faible concentration en chlorure s'étend sur deux lignes d'écoulements Sud et SW jusqu'à Paris. Ainsi, cette ligne d'écoulement n'est pas modifiée par des apports provenant des aquifères sus ou sous-jacents. Par contre, on note une augmentation de ces concentrations à proximité des affleurements du Sud. Le maximum correspond à une zone où très localement les sables albiens peuvent être en contact avec les calcaires du Portlandien (absence de Crétacé basal). La limitation spatiale de ce panache de plus fortes concentrations peut être expliquée, car localement la circulation se dirige vers les affleurements qui représentent un exutoire potentiel. Au SW, la même situation se reproduit. En région parisienne les concentrations plus élevées sont à mettre en relation avec une drainance ascendante du Néocomien à travers les semi-perméables de l'Aptien et du Barrémien. A l'Est du Bassin, proches des affleurements, se dessinent quelques petites zones à faible concentration en chlorure, mais les eaux de cette zone sont globalement plus concentrées en chlorure que les eaux du Sud (Cl supérieur à 0.2 mmol/l). Les eaux de l'Albien ou de l'Albo-aptien peuvent être en contact avec les calcaires du Néocomien à l'Est et avec ceux du Portlandien au NE, ce qui peut expliquer les concentrations trouvées dans l'Est. Entre Paris et les affleurements de l'Est, le très faible nombre de points d'observation nous incite à la prudence dans l'interprétation hydrodynamique, néanmoins quelques points existent. Notamment, le forage de Crouy-sur-Ourcq, au centre du Bassin, qui présente des eaux albiennes avec une concentration élevée en chlorure (19.19 mmol/l). On retrouve ces fortes concentrations en chlorure dans la vallée de la Somme près d'Amiens. Il faut noter que, pour cette région, la salinité des eaux albiennes issues des tests DST des forages pétroliers est également très importante [9]. Ces fortes concentrations sont également observées dans cette région pour les eaux du Néocomien. Le tracé piézométrique actuel de l'Albien nous indique que les eaux issues de l'Est devraient se diriger pour une partie vers la région parisienne. Le comportement conservatif des chlorures devrait nous permettre d'observer des concentrations plus élevées en Cl en Ile de France, ce qui n'est pas le cas. La contradiction apparente est levée par la piézométrie avant 1930. En effet, on voit là que la ligne d'écoulement issue de l'Est se dirige vers le Bassin de la Somme et non la région parisienne. Ainsi pour comprendre l'hydrodynamisme et la chimie des eaux prélevées actuellement dans l'Est du Bassin, nous sommes amenés à réfléchir à partir de la piézométrie avant 1930. Ceci est en accord avec les résultats des activités ^{14}C , vus précédemment.

Fort de ces résultats obtenus à partir de la concentration des chlorures nous allons maintenant étudier les informations apportés par l'alcalinité. L'alcalinité d'une eau résulte de l'altération des silicates et des carbonates. Les lignes d'écoulements captives du Sud et de l'W vers Paris présentent des alcalinités inférieures à 3meq/l, voire à 2 meq/l. Ces alcalinités mesurées en partie captive restent faibles le long de la ligne d'écoulement du Sud vers Paris. On retrouve donc là le fait que la composition de l'eau y est acquise par la seule altération des silicates, comme suggéré par $\delta^{13}\text{C}$ (ΣCO_2). Il existe des relations simples entre l'alcalinité et le pH. Ainsi on trouve une augmentation du pH et de l'alcalinité le long de cette ligne d'écoulement des affleurements vers Paris. L'augmentation de l'alcalinité est due à l'altération de silicates présents dans les sables de l'Albien (l'albite ou l'anorthite par exemple) comme le montre la bonne concordance des mesures avec les courbes théoriques en milieu fermé, silicaté, avec une PCO_2 initiale fixée. D'après Kloppmann [10], la pression partielle de CO_2 en système fermé est comprise entre $10^{-1.5}$ et 10^{-1} atm. Les eaux en contact avec une roche carbonatée comme les eaux de la Craie présentent des alcalinités nettement supérieures. On remarquera néanmoins, que certaines eaux de la nappe libre du Sud semblent pouvoir être influencées par des eaux carbonatées : alcalinité et concentration en calcium notamment, un peu plus fortes. Ce type d'eau ne semble pas participer à la recharge de la partie captive. On peut donc émettre

l'hypothèse que l'ensemble de la nappe libre ne participe pas à la recharge de la partie captive. La morphologie vallonnée des affleurements albiens dans le Sud favorise en effet, le drainage local des eaux de surface par de multiples ruisseaux. Comme nous l'avons vu précédemment, localement au Nord d'Auxerre par exemple, les affleurements albiens représentent un exutoire de l'Albien captif plutôt qu'un impluvium [11, 12].

VI. CONCLUSION

La ligne d'écoulement du Sud vers Paris est le principal axe de circulation et de recharge de la région parisienne. Cette ligne d'écoulement de direction S-N, jusqu'à la grande banlieue parisienne, ne présente pas d'apport des aquifères sus et sous-jacents. La recharge de l'aquifère s'effectue sur des zones très localisées au niveau des affleurements du Sud (région de Sancerre), mais aussi par drainance à partir des sables Cénomaniens sus-jacents à l'W et par l'anticlinal du pays de Bray au NW. Nous observons, un hydrodynamisme plus complexe dans la vallée de la Seine et la région parisienne avec notamment des apports de l'aquifère du Néocomien. Les affleurements de l'Albien de faibles altitudes peuvent être localement des exutoires de la nappe captive. La chimie de l'eau et l'activité ^{14}C montrent que la région Est de l'aquifère captif de l'Albien doit être interprétée avec la carte piézométrique antérieure à la mise en exploitation importante de la nappe. En effet, cette région présente un faible écoulement qui se vidange lentement vers la vallée de la Somme. Cette étude nous a permis de montrer et préciser un certain nombre de processus hydrodynamiques et présente une vision cohérente à l'échelle locale comme à l'échelle régionale de l'hydrogéologie de l'aquifère de l'Albien. Sur le plan méthodologique, elle montre comment appliquer cette approche à des aquifères complexes. Ce travail a constitué la base d'une modélisation hydrodynamique de l'Albien à l'échelle du Bassin [13].

Remerciements : étude réalisée avec le concours financier de la S.A.G.E.P., de SUEZ-LYONNAISE et de l'Agence de l'Eau Seine Normandie

Références bibliographiques

- [1] MEGNIEN, C., Hydrogéologie du centre du bassin de Paris, Mém. B.R.G.M. n°98, 532 pp, Orléans, France, 1979.
- [2] VERNOUX, J.F., P. MAGET, H. AFZALI, R. BLANCHIN, M. DONSIMONI and VAIRON J., Synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du bassin de Paris, B.R.G.M., Rapp. DSGR/IDF R39702, pp. 93, Paris, France, 1997.
- [3] LAUVERJAT, J., Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de l'Albien dans le centre de Paris. Ph.D. dissertation, 211 pp., Faculté des Sciences de Paris, Paris, France, 1967.
- [4] LAUVERJAT, J., Evolution de la nappe de l'Albien dans le centre du Bassin de Paris, paper presented at 114^{ème} Congr. Nat. Soc. Sav., Géol. Bassin Parisien, Paris, 157-168, 1989.
- [5] WEI H.F., E. LEDOUX and Gh. DE MARSILY, Regional modelling of groundwater flow and salt and environmental tracer transport in deep aquifers in the Paris Basin, J. Hydrol., 120, 341-358, 1990.
- [6] GOUZE, P., Modélisation des transferts de masse liés aux circulations dans les aquifères sédimentaires, Application à l'aquifère du Dogger du Bassin de Paris et aux écoulements thermo-convectifs dans les réservoirs gréseux, Ph.D. dissertation, 231 pp, Université de Paris VI, France, 1993.

- [7] MATRAY, J.M., M. LAMBERT, J. Ch. FONTES, Stable isotopes conservation and origin of saline waters from the middle Jurassic aquifer of the Paris Basin, *Appl. Geochem.*, Vol.9, pp. 297-309, 1994.
- [8] CASTRO, M.C., A. JAMBON, Gh. DE MARSILY and P. SCHLOSSER, Noble gases as natural tracers of water circulation in the Paris Basin, 1. Measurements and discussion of their origin and mechanisms of vertical transport in the basin. *Water Resour. Res.*, Vol. 34, N°10, 2443 - 2466, 1998.
- [9] DIRECTION DES CARBURANTS, Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe albienne dans le Bassin de Paris, Service de Conservation, Rapp. SG-RJM, pp. 63, France, 1965.
- [10] KLOPPMANN, W., L. DEVER and W.M. EDMUNDS, Residence time of Chalk groundwater in the Paris Basin and the North German Basin : a geochemical approach, *Appl. Geochem.*, Vol. 13, 593-606, 1998.
- [11] BLAVOUX B. et PANETIER J.M., Etude hydrogéologique et isotopique de la région Joigny Toucy (Yonne). L'alimentation par drainance de la nappe captive albienne. Rapport interne. Université de Paris VI, Laboratoire de géologie dynamique- C.T.G.R.E.F. Antony, 22 p., 1977.
- [12] MELLOUL, A., Connaissance hydrogéologique des grands aquifères profonds en milieu poreux et à données peu nombreuses. Méthodologie d'étude basée sur les paramètres géochimiques et isotopiques, Ph.D. dissertation, 266 pp., Université de Neuchâtel, Suisse, 1979.
- [13] RAOULT, Y., De nouvelles idées pour de vieilles eaux. Ph.D. dissertation, 119 pp., Université Pierre et Marie Curie, France, 1999.

La nappe de l'Albien - Néocomien. Sauvegarde et mise en valeur d'une ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable de secours

Philippe Verjus

DIREN Ile de France – Comité Technique Albien 79 rue Benoît Malon
94257 Gentilly cedex Philippe.VERJUS@ile-de-france.ecologie.gouv.fr

I. INTRODUCTION

Suite à des difficultés d'application du SDAGE de 1996, il est apparu nécessaire de réviser partiellement ce dernier sur le point particulier de la gestion du système aquifère Albien-Néocomien.

Ainsi, en septembre 1998, le comité de bassin Seine Normandie, sur demande de la Ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement, a demandé à sa commission des programmes et de la prospective de proposer des actions afin de définir des critères précis et les modalités d'accès aux nappes de l'Albien et du Néocomien en vue de garantir une gestion durable de ces nappes, et de réviser le S.D.A.G.E. en conséquence.

Afin de répondre à ces objectifs, la Commission a mis en place un groupe de travail "Albien", réunissant les principaux acteurs politiques, professionnels, associatifs et administratif.

Ce groupe a constitué une instance de réflexion et concertation. Il s'est appuyé sur un comité technique "Albien", réunissant les principaux services compétents en matière d'hydrogéologie, de police et de gestion de l'eau.

Le comité technique "Albien" a conçu et conduit un programme d'étude de connaissance et de modélisation de l'Albien.

Une fois les connaissances fondamentales acquises, les études ont été orientées, de façon à proposer des règles de gestion patrimoniales, justes et solidaires de la nappe sachant que la vocation première de la nappe est la fourniture d'eau potable d'ultime secours.

II. LES ATOUTS DE L'ALBIEN-NEOCOMIEN COMME RESSOURCE STRATEGIQUE POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE SECOURS

Le système aquifère de l'Albien et du Néocomien du bassin parisien se présente selon une structure en forme de cuvette centrée sur l'Ile-de-France et affleurant à la périphérie: à l'est (Argonne), au sud-est (Champagne humide, Puisaye), au nord-ouest (embouchure de la Seine), au nord (Boulonnais, Pays de Bray). L'Albien est séparé du Néocomien sous-jacent par les argiles aptiennes, semi perméables, d'épaisseur variable, plus importante au centre. Les deux réservoirs sont en communication en périphérie et en équilibre hydraulique par drainance à travers ces argiles au centre du domaine. Ils ne forment donc qu'un seul système aquifère. La profondeur de ce dernier croit des affleurements vers le centre où elle atteint 800 m pour l'Albien et 1000 m pour le Néocomien. Il concerne une aire de l'ordre de 84 000 km² au total. L'albien est formé d'intercalations d'argiles et de sables épais de 50 à 100 m en Ile de France. Il est séparé de la craie sus jacente par les argiles du Gault qui maintiennent la nappe

captive. Au mur, les argiles et marnes aptiennes isolent le Néocomien de l'Albien dans la zone centrale du bassin parisien.

Les zones d'affleurements sont moyennement productives car constituées de couches peu épaisses de sables argileux ou de marne. Elles ne contribuent à l'alimentation météorique de l'aquifère qu'à hauteur de 0,003% du volume de ce dernier, qui est de l'ordre de 400 milliard de m³. La zone centrale de l'aquifère est en revanche davantage transmissive, la nappe captive y est productive. Sa recharge est toutefois conditionnée par les affleurements. On peut donc exploiter la nappe de l'albien soit modérément au rythme de sa recharge naturelle, soit comme une mine aquatique, en puisant alors sur le stock d'eau.

En raison de leur protection naturelle, les eaux sont de bonne qualité.

Le système aquifère de l'Albien et du Néocomien présente donc, de part ses caractéristiques, un ensemble d'atouts propres à le désigner comme ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable de secours:

☞ La nappe ne peut être exploitée en régime normal qu'à de faibles débits ce qui est incompatible avec des usages massifs.

☞ En revanche le volume du réservoir géologique offre un stock d'eau important exploitable temporairement.

☞ Elle est présente sous tout le bassin parisien partout où des populations potentielles à secourir sont présentes

☞ Elle est, sauf dans certains secteurs, d'assez bonne qualité en tant qu'eau potable de secours

☞ Elle est totalement protégée des pollutions de surface, ce qui, en cas de crise extrême, seraient susceptibles d'anéantir les ressources utilisées par le système de distribution classique d'eau potable

III. CONDITIONS NECESSAIRES A UNE BONNE UTILISATION DE L'ALBIEN POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE SECOURS AUJOURD'HUI

III.1. La ressource est-elle juridiquement protégée ?

En 1996, le SDAGE du bassin Seine-Normandie a apporté un début de réponse au problème de la protection de cette ressource. Il a considéré le système aquifère comme ressource d'importance stratégique pour l'alimentation de secours en eau potable de l'Ile de France tout en limitant le volume total de prélèvements à 18 millions de m³ par an dans l'Albien et le Néocomien sur tout le bassin.

Cependant, pour que la nappe soit effectivement utilisable pour le secours, il est nécessaire qu'elle puisse être exploitée le moment venu. Il faut donc qu'il y est suffisamment de forages disponibles. Des forages nouveaux doivent pour cela être autorisés, ce qui implique de repenser le volume global exploitable de la nappe dans cet objectif.

La protection juridique de l'aquifère résulte également du classement en zone de répartition de la nappe de l'Albien (ZRE) par le décret en Conseil d'Etat n° 2003-869 du 11 septembre 2003 relatif à l'extension des zones de répartition des eaux et modifiant le décret n° 94-354 du 29 avril 1994 pris en application des art. 8.2 et 9.2 de la loi sur l'eau.

L'effet de ce classement est d'abaisser le seuil d'autorisation de 80 m³/h à 8 m³/h pour tout nouveau captage situé dans le périmètre de la zone de répartition. Ce périmètre est celui de l'extension totale des nappes de l'Albien et du Néocomien, hors zones à surface libre et hors

zones ou les limites du système aquifère ne sont pas connues avec précision (et ou le système n'est à fortiori pas exploité). Le zonage proposé englobe en totalité les départements de Paris, Hauts de seine, Val de marne, Seine Saint Denis, Val d'Oise, Yvelines, Essonne, Seine et marne, Oise, Seine maritime, Eure et en partie ceux de l'Eure et Loire, Loiret, Yonne, Aube, Marne, Aisne et Somme (fig.1).

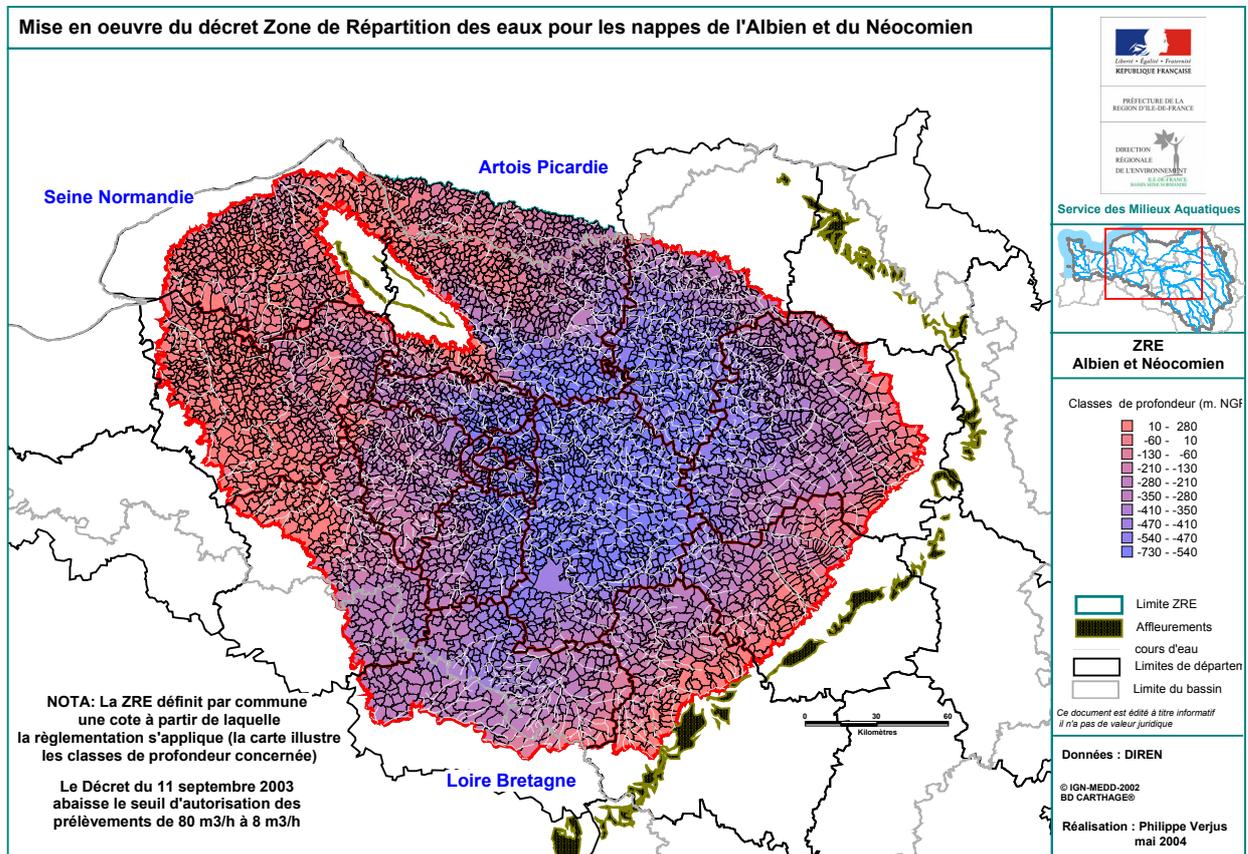


Figure 1 - Etendue de la zone de répartition des eaux.

III.2 L'usage de la ressource dans son ensemble est-il partagé de façon suffisamment solidaire et patrimoniale pour ne pas remettre en cause l'objectif recherché ?

La gestion future de l'Albien-Néocomien devait nécessairement être envisagée sur l'ensemble du bassin parisien.

L'augmentation générale des prélèvements que l'on constatait récemment dans l'ensemble du bassin, bien au-delà de l'Île de France, est difficile à concilier avec la ressource renouvelable des nappes de l'Albien et du Néocomien qui est très limitée. En effet, les débits pluviométriques qui les alimentent aux affleurements sont extrêmement faibles. C'est pourquoi il convenait à l'évidence que des règles communes soient adoptées à l'échelle du bassin parisien.

L'enjeu général est d'établir à l'échelle du bassin une organisation solidaire, juste et patrimoniale de la gestion future des nappes de l'Albien et du Néocomien. L'objectif est de permettre à tous un meilleur accès à la ressource qui constitue un potentiel particulièrement

remarquable d'alimentation de secours ultime des populations en cas de crise majeure affectant la distribution d'eau de surface.

III.3 Y-a-t-il une bonne distribution des forages pour desservir effectivement la population ?

Actuellement, cela n'est pas le cas, seul quelques secteurs privilégiés pourraient disposer de l'eau de secours de l'Albien en cas de crise majeure affectant la distribution classique d'eau potable.

Il est donc nécessaire d'implanter de nouveaux captages pour pouvoir effectivement distribuer l'eau de secours. La répartition homogène des points de prélèvements par zones d'égales densité de population à desservir peut être considérée dans les grandes lignes comme préfigurant un dispositif cible de réseau de forages de secours.

En régime de routine, hors situation de crise, ces forages devront pouvoir être exploités pour un usage économique. Cependant, les débits unitaires correspondants, seront très faibles, de l'ordre de 10 à 15 m³/h., compte tenu de la faible recharge de la nappe.

En période de crise, les forages seront exploités à leur débit maximaux, de l'ordre de 150 m³/h, ce qui permet d'assurer la fourniture de 20 l/j/habitant d'eau de secours à 180 000 habitants par forage en moyenne.

III.4 Conditions hydrogéologiques : la ressource est-elle suffisante?

Ces conditions ont été étudiées notamment grâce à la mise en œuvre d'un modèle mathématique hydrogéologique. L'étude de modélisation des nappes de l'Albien et du Néocomien avait deux objectifs principaux:

☞ :Objectif n°1: Evaluation des capacités des réservoirs Albien et Néocomien à fournir, en cas de crise majeure conduisant à l'abandon de l'alimentation en eau potable à partir des sources d'approvisionnement classiques de l'Île de France, les ressources de substitution nécessaires à l'alimentation des populations durant quelques mois.

☞ Objectif n°2 : Evaluation des conséquences d'exploitation de débits supplémentaires à ceux prélevés actuellement, en dehors de toute situation de crise, en vue de tester une mise en valeur des nappes compatible et complémentaire avec l'objectif précédent, par l'implantation et l'exploitation modérée de nouveaux forages.

Il a été possible de répondre par calcul à la faisabilité des deux objectifs précédents en simulant l'effet d'accroissements de débits sur :

- la piézométrie des aquifères,
- la capacité de ces derniers à fournir les débits simulés.

Les scénarios simulés, sont typiquement décomposés en deux étapes:

Etape n°1 :

Simulation de cinq états initiaux de référence en régime permanent résultant de l'exploitation hors situation de crise. Les états initiaux considérés sont:

- l'état actuel (dénommé " 22 Mm³/an");
- deux états initiaux simulés correspondants à deux scénarios d'implantation de nouveaux forages et d'augmentation des prélèvements de 5 et 10 Mm³/an en Ile de France (dénommés scénarios en routine à 27 et 32 Mm³/an)
- deux états initiaux simulés correspondants à deux scénarios d'implantation de nouveaux forages et d'augmentation supplémentaire par rapport aux scénarios précédents des prélèvements de 2,5 et 5 Mm³/an hors Ile de France (soit pour le bassin une augmentation des prélèvements de 7,5 et 15 Mm³/an et dénommés scénarios en routine à 29,5 et 37 Mm³/an).

Ces quatre dernières simulations dites en routine à 27, 29,5 , 32 et 37 Mm³/an répondent à l'objectif (n°2) de tester une mise en valeur des nappes par la mise en place de dispositifs simulés de prélèvements supplémentaires.

Etape n°2 :

Simulation, à partir des cinq états initiaux de référence précédents, de pompages intensifs. Cette simulation répond à l'objectif (n°1) de tester la possibilité de prélever massivement sur les nappes, en situation de crise.

La capacité des nappes à fournir l'eau de secours s'apprécie par deux critères fondamentaux:

- capacité des nappes à fournir effectivement les débits espérés
- importance des rabattements correspondants à ces prélèvements

Les simulations de première et deuxième étape, permettent de quantifier l'objectif fixé par le SDAGE de préserver et valoriser une ressource jugée stratégique pour l'alimentation en eau de secours en cas de crise majeure affectant la distribution courante d'eau potable.

IV. PRINCIPAUX RESULTATS DE LA MODELISATION DU SYSTEME AQUIFERE

Quels sont les grandes conclusions des simulations effectuées grâce au modèle?

IV.1 Conclusions relatives au fonctionnement du système aquifère (Fig. 2)

- ☞ confirmation que les deux nappes de l'Albien et du Néocomien ne constituent qu'un seul système aquifère
- ☞ l'exploitation directe du néocomien ne présente guère d'intérêt pratique, par rapport à celle de l'Albien (nappe plus profonde et moins transmissive)

IV.2 Conclusions relatives à la densité des forages de secours à mettre en œuvre

☞ à volume de prélèvement donné, la densité des points de prélèvement supplémentaires n'a pas beaucoup d'influence ni sur les rabattements prévisibles ni sur la capacité du système aquifère à fournir les débits souhaités.

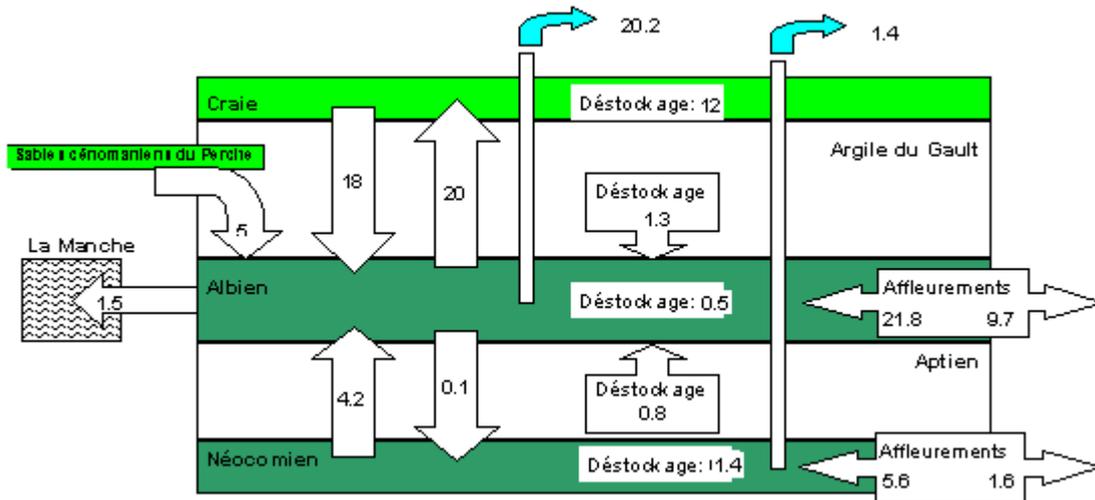


Figure 2 - Echanges au sein du système aquifère en régime permanent à 22 Mm³ de prélèvement soit la situation actuelle (d'après Hydroexpert/BRGM).

Les simulations de nouveaux forages de secours ont été faites pour des variantes de ratios d'un forage par zone de 120 000, 180 000 ou de 240 000 habitants. Le ratio moyen d'un forage exploité en période de crise au débit de 150 m³/h par zone de 180 000 habitants peut donc être considéré comme représentatif, car il correspond à un bon compromis entre les possibilités des nappes et des forages courants à l'Albien, et la répartition géographique souhaitable des forages de secours.

IV.3 Conclusions relatives aux potentialités d'exploitation supplémentaire du système en période normale et en période de crise.

Il est possible d'exploiter davantage en temps normal le système aquifère, dans des limites raisonnables, c'est à dire sans remettre en cause la possibilité de prélever massivement l'eau d'ultime secours nécessaire pour faire face à des situations de crise majeure.

La contre partie de la mise en valeur du système aquifère par un développement modéré de son exploitation dans la perspective d'un usage principal en secours est naturellement une baisse piézométrique.

L'ordre de grandeur des rabattements prévisibles est le suivant :

Hypothèses d'exploitation supplémentaire aux 22 Mm ³ /an prélevés actuellement	+ 7, 5 Mm ³ /an(1)		+ 15 Mm ³ /an(1)	
Volume annuel prélevé correspondant	29,5 Mm ³ /an		37 Mm ³ /an	
Rabattements :	En Ile-de-France	Hors Ile-de-France	En Ile-de-France	Hors Ile-de-France
- induits en période normale	25 à 35 m	0 à 35 m	35 à 60 m	5 à 50 m
- supplémentaires induits en période de crise (20l/ha/j pendant 3 mois) touchant tout le bassin	10 à 50 m	5 à 10 m	5 à 50 m	5 à 10 m

(1) Les hypothèses d'exploitation ne concernent que la surface captive de la nappe.

Le niveau altimétrique d'installation des équipements de pompage des puits actuels et futurs devra tenir compte de ces rabattements, de façon à rendre effectivement possible les prélèvements, notamment face à une situation de crise.

V. CONCLUSION : VERS UNE GESTION DE L'ALBIEN AU SERVICE DU SECOURS ULTIME EN ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Les études menées par le Comité Technique Albien, sous l'égide du Groupe Albien du Comité de Bassin a permis de modifier le SDAGE Seine Normandie. Ce dernier ouvre désormais la possibilité technique et juridique de mettre en valeur l'Albien tout en assurant sa sauvegarde à long terme :

« A l'intérieur du périmètre tel que défini sur la carte de l'annexe I, la nappe de l'Albien et la nappe sous-jacente du Néocomien doivent être exploitées de manière à assurer impérativement leur fonction de secours pour l'alimentation en eau potable. Les prescriptions suivantes sont applicables aux prélèvements :

1. pour permettre une meilleure répartition des forages afin d'assurer la fonction de secours, le volume annuel prélevable dans le système aquifère de l'Albien et du Néocomien est porté de 22 millions de m³ à 29 millions de m³ compte tenu des rabattements acceptables induits par une augmentation des prélèvements en routine. Ce volume supplémentaire est réparti par département en fonction de la population à secourir en cas de crise à l'exception du département de la Seine Maritime pour lequel le volume est minoré pour se prémunir des risques d'invasion d'eau salée.

2. les demandes de nouveaux prélèvements sont soumises à l'avis de la Mission déléguée de Bassin compte tenu de la nécessité d'une coordination et d'une planification de la ressource en eau au niveau interrégional.

3. les nouveaux prélèvements ne pourront être accordés que dans la mesure où leur localisation géographique s'inscrit de manière cohérente dans les zones d'implantation préférentielle des nouveaux forages de secours telles que figurées sur la carte de l'annexe II. En cas de concurrence entre deux projets pour l'implantation d'un forage sur un secteur géographique donné, la priorité est donnée à l'alimentation en eau potable. S'il s'agit de projets industriels, la priorité est donnée à celui qui justifie de la nécessité d'utiliser une eau d'une telle qualité non disponible par ailleurs, à des coûts raisonnables, compte tenu des autres ressources et des technologies existantes de traitement de ces eaux et dont l'implantation satisfait au mieux la fonction de secours.

4. les nouveaux prélèvements doivent être compatibles avec les volumes maximaux fixés par département et le débit en exploitation courante de chacun des nouveaux forages indiqués dans le tableau de l'annexe III.

5. le niveau des pompes des forages actuels et futurs doit être tel que l'ouvrage soit opérationnel à tout moment pour faire face à une alimentation de secours, pendant une durée de trois mois, au débit de 150 m³/h ou à défaut de pouvoir atteindre ce débit, au débit maximal exploitable connu lors des essais de pompage. Les forages actuels et futurs exploitant ces nappes doivent impérativement pouvoir être raccordés sous 24 heures aux

dispositifs de distribution d'eau potable de secours ultime quels qu'ils soient. Les ouvrages existants devront être mis en conformité avec ces prescriptions dans un délai de 5 ans à compter de l'approbation de la modification du S.D.A.G.E..

6. les volumes de prélèvement autorisés sont révisés si le niveau piézométrique de référence calculé à partir des piézomètres représentatifs en Ile-de-France descend en dessous de la cote 31 m NGF avant le 31 décembre 2008.

7. les autorisations de prélèvement des forages existants ne peuvent être révisées à la hausse. En cas d'abandon d'un forage, le volume autorisé peut être reporté sur de nouveaux ouvrages implantés conformément à la carte de l'annexe II.

8. le modèle de gestion des nappes de l'Albien et du Néocomien construit pour élaborer les présentes prescriptions est mis à jour régulièrement en fonction des données acquises (nouveaux forages réalisés, évolution des prélèvements et de la piézométrie notamment).

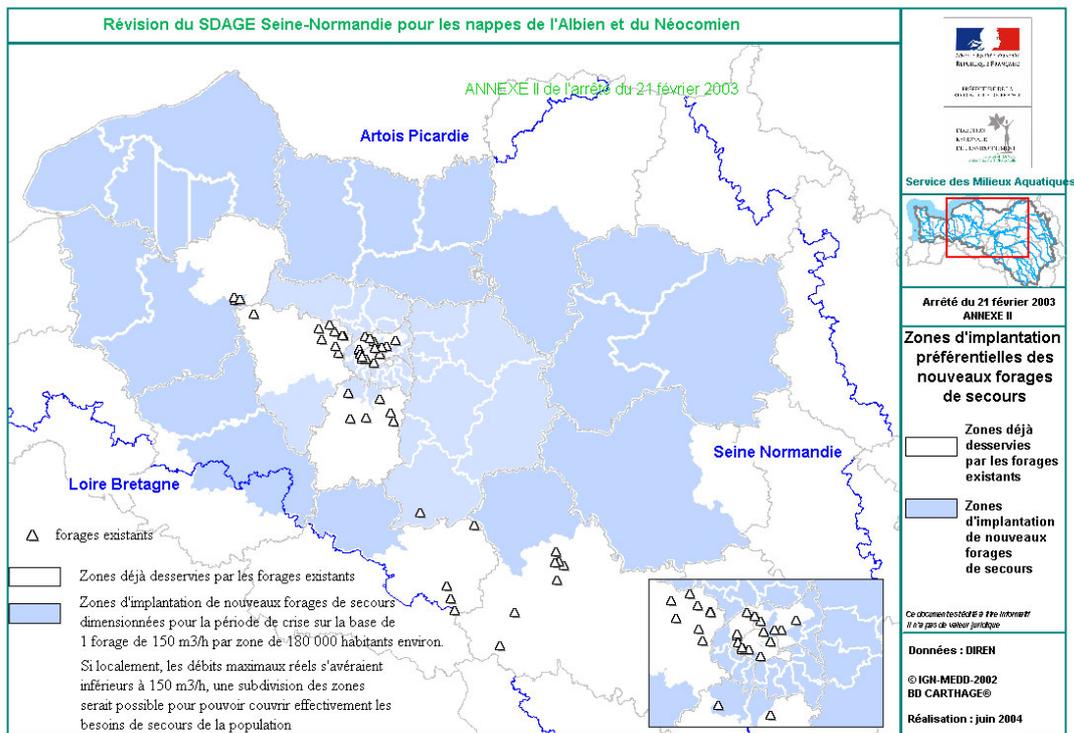


Figure 3 - Périmètre et prescriptions du SDAGE

Tableau 1: Volumes maximaux autorisables par département

Département	Volume actuel prélevé (en m3/an)	Volume annuel supplémentaire pour une augmentation du volume global de 7 Mm3/an (en m3/an)	Volume total (en m3/an)	Nombre de nouveaux forages	Débit moyen en routine par nouveau forage (en m3/an)
PARIS (75)	225 000	515 000	740 000	4	129 000
SEINE-ET-MARNE (77)	174 000	853 000	1 027 000	8	107 000
YVELINES (78)	8 010 000	119 000	8 129 000	1	119 000
ESSONNE (91)	3 552 000	257 000	3 809 000	2	129 000
HAUTS-DE-SEINE (92)	3 866 000	892 000	4 758 000	5	178 000
SEINE-SAINT-DENIS (93)	3 453 000	386 000	3 839 000	4	97 000
VAL DE MARNE (94)	0	877 000	877 000	7	125 000
VAL D'OISE (95)	0	790 000	790 000	6	132 000
EURE ET LOIR (28)	0	291 000	291 000	2	146 000
LOIRET (45)	1 110 000	41 000	1 151 000	1	41 000
YONNE (89)	1 249 000	74 000	1 323 000	1	74 000
AUBE (10)	0	187 000	187 000	1	187 000
MARNE (51)	0	404 000	404 000	3	135 000
AISNE (02)	0	121 000	121 000	1	121 000
OISE (60)	0	548 000	548 000	4	137 000
EURE (27)	496 000	259 000	755 000	2	130 000
SEINE MARITIME (76)	76 000	309 000	385 000	5	62 000

(1) pour les départements de l'Aisne, la Marne, l'Aube, l'Yonne, le Loiret et l'Eure et Loir, le volume départemental correspond aux seules zones recoupées par le périmètre tel que défini à l'annexe cartographique. En dehors de ce périmètre, et en particulier dans les zones d'affleurement, les règles de gestion du SDAGE ne sont pas applicables.

Programme d'études et de modélisation de la nappe des sables du Cénomanien

Pascal Billault,¹ Noelle Doucet,² Marc Boisson²

¹ Agence de l'eau Loire Bretagne Agence de l'eau Loire-Bretagne Av. de Buffon - BP 6339
45063 ORLEANS Cedex 02 pascal.billault@eau-loire-bretagne.fr

² SOGREAH 66 rue de Nantes 44230 ARTHON-EN-RETZ

I. CONTEXTE GENERAL

La nappe du cénomanien est l'un des grands réservoirs stratégiques d'eau souterraine au niveau national ; elle concerne 4 régions (Basse Normandie, Centre, Pays-de-la-Loire et Poitou-Charentes) et 10 départements (Cher, Eure-et-Loir, Indre, Indre-et-Loire, Loir-et-Cher, Loiret, Maine-et-Loire, Orne, Sarthe et Vienne) (figure1).

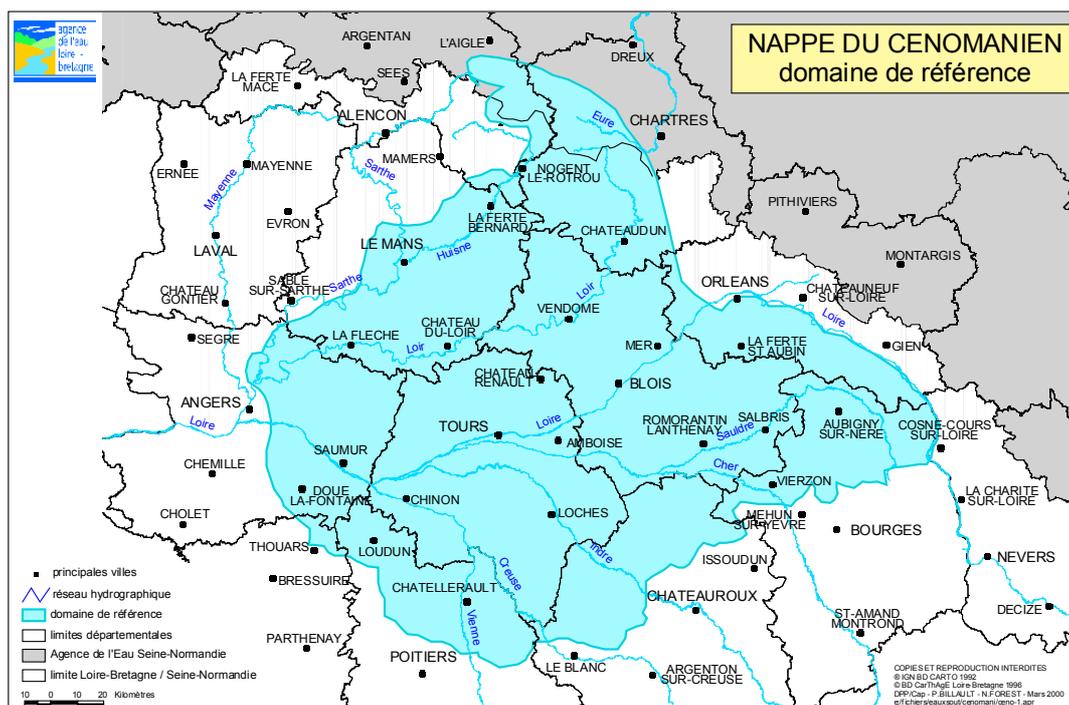


Figure 1 - Cadre général de la nappe des sables du Cénomanien

Cette nappe, essentiellement captive, est actuellement exploitée pour l'alimentation en eau potable, l'industrie et l'irrigation à raison d'environ 80 millions de m³ par an ; sa réalimentation naturelle pourrait apparaître cependant insuffisante au regard de cette exploitation car son niveau ne cesse de s'abaisser d'environ 50 cm / an dans sa partie centrale, c'est-à-dire en Indre-et-Loire et Loir-et-Cher (figure 2). Dans tout son domaine de captivité elle fournit une eau généralement indemne de pollution ce qui lui confère son caractère de

ressource stratégique classée comme telle dans le SDAGE du bassin Loire Bretagne (nappe à réserver en priorité à l'AEP).

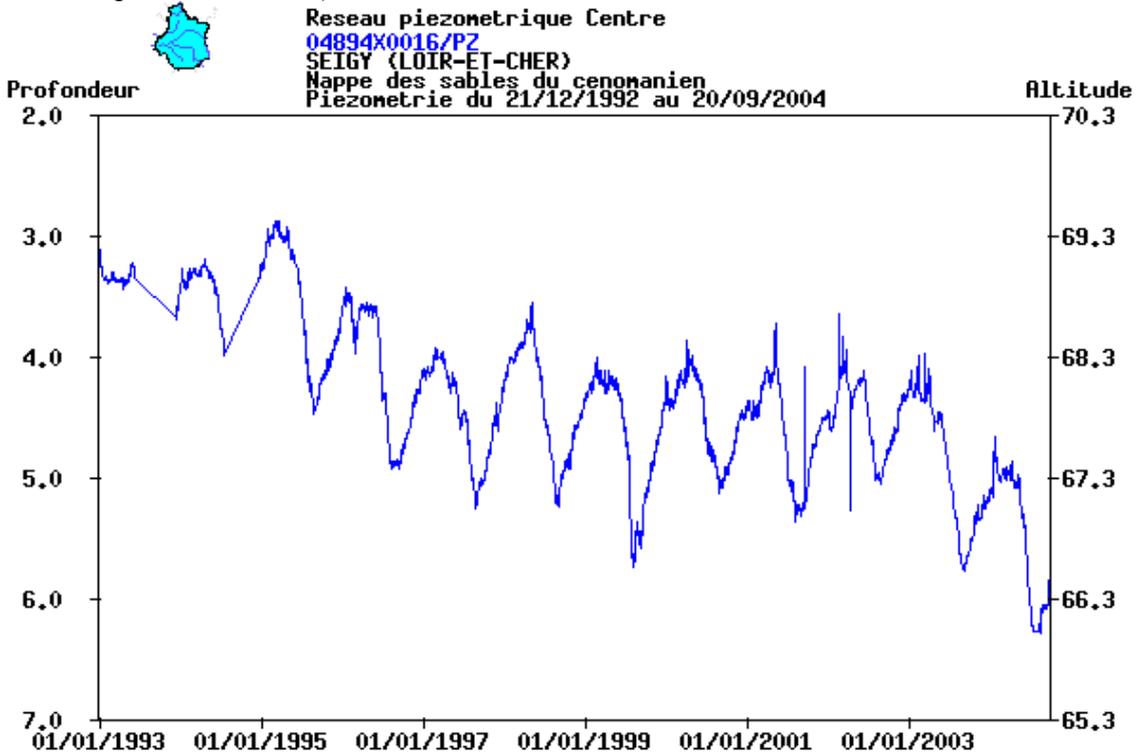


Figure 2 - Baisse piézométrique à Seigy (41) – source BRGM

Un comité de gestion de cette nappe a été créé ; composé d'élus, d'administrations et d'utilisateurs il a décidé d'engager un programme d'études sur l'ensemble de la nappe pour construire un modèle mathématique qui permettra de simuler son fonctionnement ; le comité pourra s'appuyer sur les résultats obtenus pour établir les règles de gestion les mieux adaptées pour cette ressource et ses usagers.

II. LA DEMARCHE

Jamais la nappe du céno manien n'avait fait l'objet d'une approche globale : la démarche se veut donc exemplaire pour s'assurer que les résultats qui découleront de la modélisation du fonctionnement de la nappe et des différents scénarios d'exploitation puissent effectivement être mis en application ; il apparaît notamment possible que les pompages dans la partie centrale puissent être restreints. L'étude doit aider à définir l'ampleur géographique et la proportion de ces restrictions.

C'est pourquoi un partenariat a été établi entre les collectivités territoriales principalement concernées, l'Etat et l'agence de l'eau Loire Bretagne. L'agence assure la maîtrise d'ouvrage du programme d'études avec une participation financière des départements d'Indre-et-Loire, Loir-et-Cher, Maine-et-Loire et Sarthe et des régions Centre et Pays de la Loire ; ce programme est réalisé par SOGREAH sous le contrôle d'un comité de pilotage très élargi associant plusieurs services techniques départementaux et notamment les hydrogéologues concernés. Pour ce qui concerne la mise en œuvre d'une éventuelle politique de restrictions de pompage, des dispositions financières spécifiques sont déjà adoptées par l'agence puisque la réalisation d'ouvrages exploitant une ressource alternative (retenue artificielle ou forage) sera financée à 50 % au lieu de 20% habituellement.

III. LE PROGRAMME ET SES PREMIERS RESULTATS

Le programme d'études vise à préciser les caractéristiques du réservoir, les différents termes du bilan et enfin à modéliser le fonctionnement de la nappe pour tester divers scénarios de gestion. Il comprend ainsi :

- une campagne piézométrique synchrone du cénonanien
- deux campagnes piézométriques de la craie séno-turonienne sus-jacente
- une campagne piézométrique des aquifères adjacents
- la réalisation d'un modèle géologique en 3D
- la constitution d'une base de données sur les forages et prélèvements d'eau au cénonanien
- la réalisation de pompages d'essai
- la réalisation de jaugeages sur les cours d'eau situés en domaine de nappe libre
- le recueil de données génériques existantes (météo, hydrodynamisme, réserves utiles des sols)
- la modélisation et la simulation de scénarios
- l'établissement de règles techniques de gestion à proposer au comité de gestion

III.1 Piézométrie

En matière de piézométrie synchrone de référence l'étude s'appuiera sur les cartes hautes eaux et basses eaux du cénonanien de 1994 et celle de basses eaux de 2003 (figure 3) ; ce sont les seules cartes piézométriques couvrant l'ensemble de cette nappe.

On distingue globalement un écoulement dirigé vers le centre de la partie captive puis vers un exutoire général situé dans la région angevine ; on remarque toutefois que dans la partie nord, le cénonanien affleurant est repris par drainage vers les cours d'eau et n'alimente pas la partie captive.

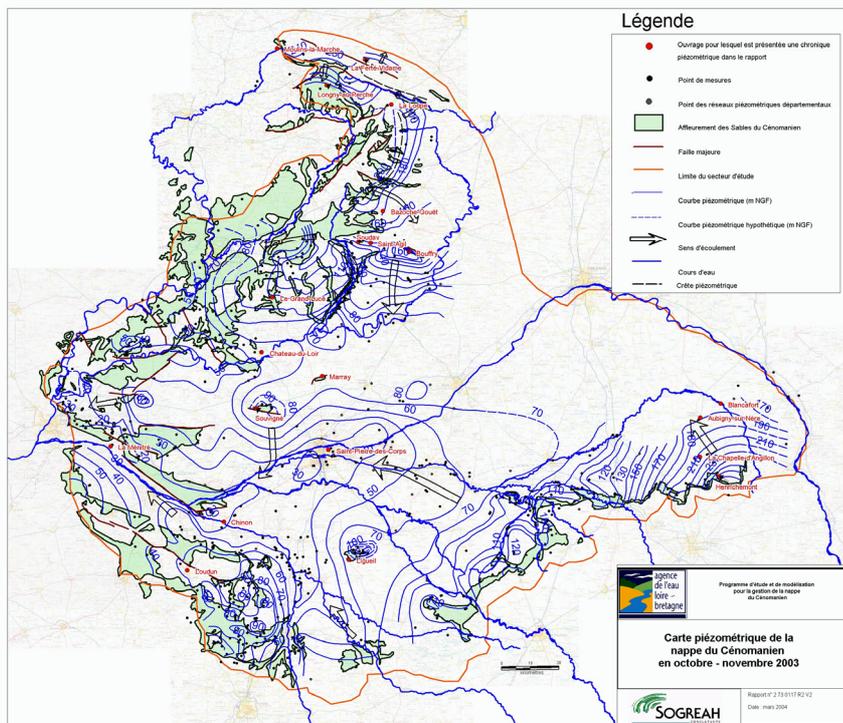


Figure 3 - Carte piézométrique basses eaux 2003

La réalisation des cartes piézométriques du Séno-turonien a essentiellement pour objectif d'estimer la charge hydraulique existante sur les marnes à Ostracées, toit du cénonanien considéré comme imperméable. La comparaison entre les piézométries des deux aquifères permet de dresser une carte de différence de charges (figure 4) afin de mettre en évidence les zones potentielles de drainage verticale.

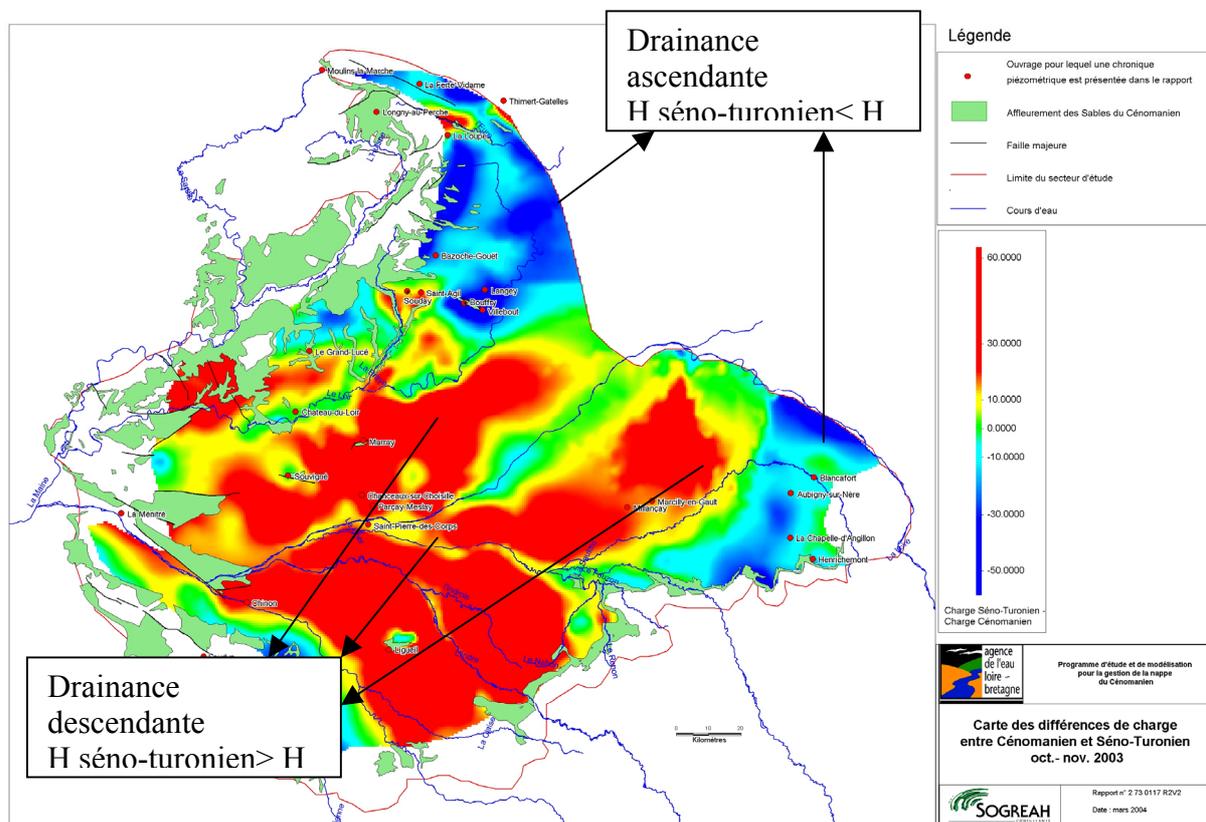


Figure 4 - Différences de charge entre Cénonanien et Séno-turonien

On observe ainsi dans une large zone centrale une différence de charge importante, comprise entre 30 et 60 mètres, favorisant largement une drainance descendante pour alimenter l'aquifère cénonanien ; le calcul de l'intensité de cette dernière dépendra bien entendu de la valeur de la perméabilité verticale qui sera retenue.

III.2 Géologie

Un modèle géologique en 3D va être réalisé dans le cadre de cette opération ; dans un premier temps les travaux réalisés par Claude Mégny en 1980 dans l'atlas du bassin de Paris ont été repris et largement utilisés pour réaliser la base de données sur les forages.

Pour la modélisation hydrodynamique, ce modèle va être complété et affiné par les travaux actuellement en cours du BRGM qui consistent à retraiter de manière homogène environ 2000 logs de forages existants sur le domaine d'étude.

En outre, pour combler le déficit d'information lié au manque de forage dans la région solognote du Loiret et Loir-et-Cher, 80 kilomètres de profils sismiques vont également être retraités et interprétés.

III.2.1 Base de données forages et prélèvements

Compte tenu du contexte de baisse régulière du niveau piézométrique, l'exploitation de la nappe par forage est un des termes importants qui mérite une attention toute particulière. La difficulté réside dans la connaissance de l'exhaustivité des ouvrages du domaine, de la détermination de l'aquifère réellement capté par ceux-ci et dans l'établissement d'une correspondance fiable avec les fichiers de déclarations des prélèvements d'eau à l'agence de l'eau : rien de très simple !

Le croisement des diverses bases de données sur les ouvrages existants dans les services de l'état avec celle de la banque du sous sol (BSS) et de l'agence de l'eau a permis de construire la base résultante des prélèvements d'eau dans le cénomanien avec leur géolocalisation.

Les principaux résultats peuvent être résumés ainsi :

- les ouvrages pour irrigation représentent près de la moitié des forages (figure 5)
- l'alimentation en eau potable représente près de 80 % des prélèvements (figure 6)
- le volume global prélevé avoisine 80 millions de m³/an et est sensible aux variations climatiques (figure 7).

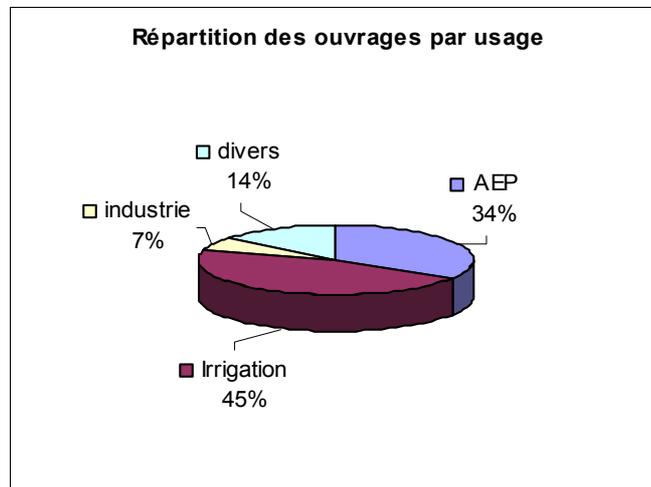


Figure 5 - Répartition des ouvrages

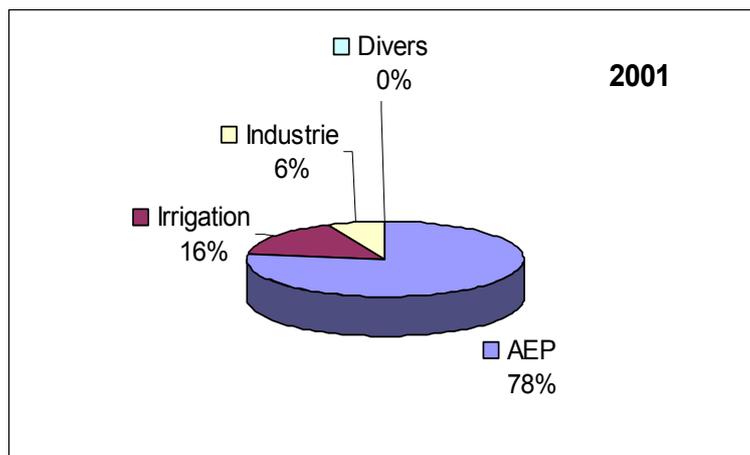


Figure 6 - Répartition des prélèvements

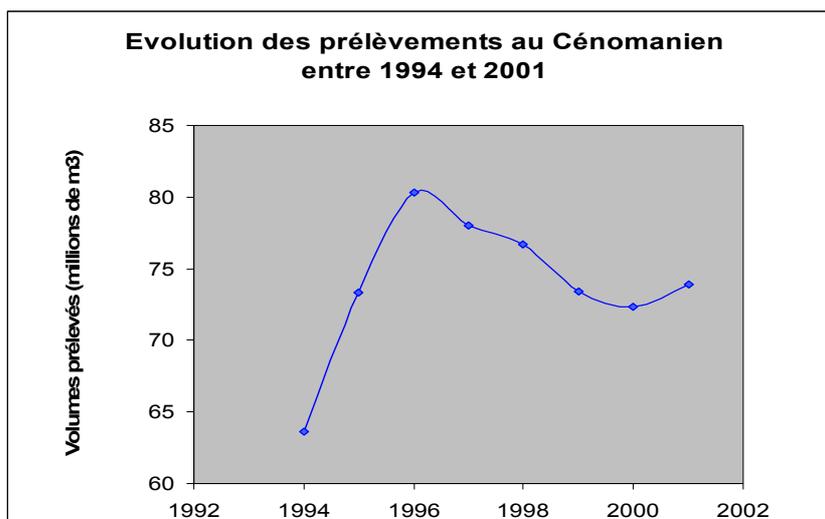


Figure 7 - Evolution des prélèvements référencés

La valeur de 1994 est à considérer avec précaution car les compteurs volumétriques sur les forages d'irrigation étaient encore peu répandus à cette date.

IV. CONCLUSION

La nappe des sables du Cénomaniien est l'un des grands réservoirs d'eau souterraine stratégiques du bassin de Paris, notamment pour l'alimentation en eau potable ; son exploitation déjà intensive dans la partie centrale de son domaine de captivité est à l'origine d'une baisse marquée de son niveau piézométrique dans la région tourangelle et la vallée du Cher.

Un comité de gestion regroupant les principaux acteurs économiques et politiques a été mis en place pour engager un programme d'études et de modélisation visant à proposer les règles de gestion permettant une exploitation optimale de cette ressource. Ce comité aura pour tâche d'établir des règles concertées et de les mettre en œuvre dès la fin du programme d'études prévue lors du deuxième semestre 2005.

Il est d'ores et déjà fort possible que certains prélèvements à fort impact soient reconvertis vers une autre ressource, souterraine ou superficielle ; des dispositions spécifiques d'aide financière pour ces travaux sont déjà adoptées à l'agence de l'eau et seront opérationnelles dès les premières décisions politiques.

Inventaire et évaluation des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes de l'Albien et du Néocomien

Jean François Vernoux

BRGM SGR Ile de France 7, rue du Théâtre 91884 MASSY jf.vernoux@brgm.fr

I. INTRODUCTION

Du point de vue de la protection des aquifères, et notamment ceux de l'Albien et du Néocomien, les forages profonds qui recoupent ces aquifères représentent un danger de pollution potentielle. Sur le bassin Seine-Normandie, les ouvrages concernés sont les forages d'eau profonds, les forages de recherche et d'exploitation d'hydrocarbures, les forages géothermiques et les forages pour le stockage de gaz.

Le groupe de travail du Comité de bassin Seine-Normandie chargé des études sur l'Albien et le Néocomien a élaboré en 1999 un cahier des charges pour l'inventaire et l'évaluation des risques dus aux forages profonds. L'étude a été réalisée par le BRGM dans le cadre d'une convention avec l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Elle a été financée par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, la DIREN Ile-de-France et le BRGM [1].

L'objectif global de l'étude est d'évaluer les facteurs de risque générés par les forages profonds sur la qualité des aquifères, d'en déduire des zones de risque potentiel de pollution et d'établir des propositions pour protéger ces aquifères.

II. METHODOLOGIE ET DONNEES DE BASE

Les aquifères profonds de l'Albien et du Néocomien constituent, au niveau du bassin parisien, d'importantes réserves en eau de qualité globalement très bonne [2], parfaitement protégées des pollutions de surface et mobilisables comme ressource d'ultime secours en cas de pollution majeure des ressources en eau « classiques ».

Par ailleurs, le bassin de Paris se caractérise par l'existence de plus de 3000 forages profonds qui traversent les horizons de l'Albien et du Néocomien pour atteindre des réservoirs jugés intéressants pour l'exploitation géothermique, l'exploitation pétrolière ou le stockage de gaz (Figure 1).

Dans ce contexte, il peut se produire localement, via les ouvrages existants, des transferts de flux entre réservoirs superposés distincts. La mise en communication entre réservoirs (par exemple entre le réservoir géothermique du Dogger et le réservoir aquifère de l'Albien) est rendue possible lorsque les ouvrages présentent des anomalies (de conception ou de comportement dans le temps avec parfois des percements de tubage...) [3].

L'évaluation du risque de contamination d'un niveau aquifère donné est la combinaison du risque lié à l'ouvrage et du risque hydrogéologique (Figure 2). Le terme de risque n'est pas employé ici au sens habituel de superposition d'un aléa avec un enjeu même si l'on peut faire certains parallèles. Le risque lié à l'ouvrage peut être assimilé à une probabilité d'occurrence : s'il n'existe aucun bouchon entre le réservoir source potentielle de pollution et l'aquifère et si l'ouvrage est en trou nu au droit de ce même aquifère, alors la probabilité de contamination est forte. De la même façon, l'enjeu est indirectement pris en compte : si le forage n'a pas de bouchon ni de cimentation, mais qu'il n'atteint pas l'Albien, alors le risque vis à vis de l'Albien est nul. Enfin un forage exploité ne va pas présenter le même risque qu'un forage abandonné, dans la mesure où il est contrôlé.

Le risque hydrogéologique est lié au contexte hydrogéologique particulier du secteur dans lequel se situe cet ouvrage, il est fonction des caractéristiques relatives des différents horizons géologiques

présents. La zone d'étude concerne la partie captive des aquifères du Crétacé inférieur (Albien et Néocomien) sur le bassin Seine-Normandie.

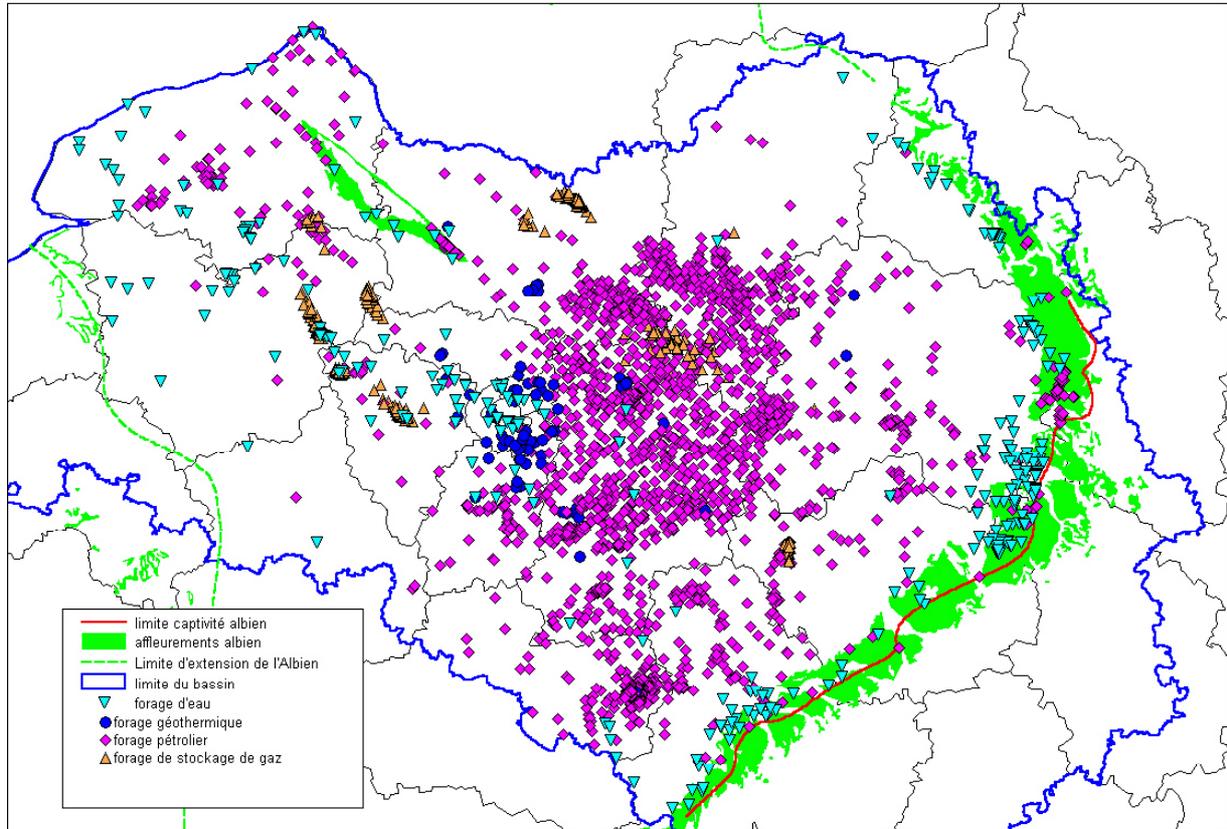


Figure 1 - Délimitation de la zone d'étude et forages pris en compte

III. CARACTERISATION DU RISQUE LIE AU FORAGE

L'exploitation des données issues des fichiers du Bureau Exploration-Production des Hydrocarbures, de la DRIRE Ile-de-France, de Gaz de France et du BRGM ainsi que le dépouillement des rapports de fin de sondage et des rapports d'abandon a permis de constituer une base de données de 3482 forages dont 2590 forages pétroliers, 119 forages géothermiques, 435 forages de stockage de gaz et 338 forages d'eau.

Les forages pétroliers, géothermiques et de stockage de gaz se répartissent en 32 % de core-drill, 22 % de forages d'exploration et 45 % de forages d'exploitation. Près de 75 % de ces forages sont abandonnés et cela concerne en priorité les forages pétroliers. L'information sur le bouchage a été recherchée dans les rapports d'abandon et les rapports de fin de sondage archivés dans les DRIRE et au BEPH. Elle concerne presque uniquement les forages d'exploration et d'exploitation. On retrouve près de 1300 forages abandonnés autre que les core-drill et les forages d'eau. Pour tout ce qui concerne l'architecture (cuvelages, cimentations) et l'abandon (bouchons de ciment) de ces forages, l'information est présente dans la base pour 70 à 80 % d'entre eux.

Une deuxième étape a conduit à mettre au point un outil de calcul du risque lié aux forages à partir des informations contenues dans la base. L'outil prend en compte les modalités de réalisation du forage, les modalités d'exploitation du forage avant abandon et les modalités d'abandon du forage (tableau 1). Il prend également en compte la non-exhaustivité de l'information contenue dans la base.

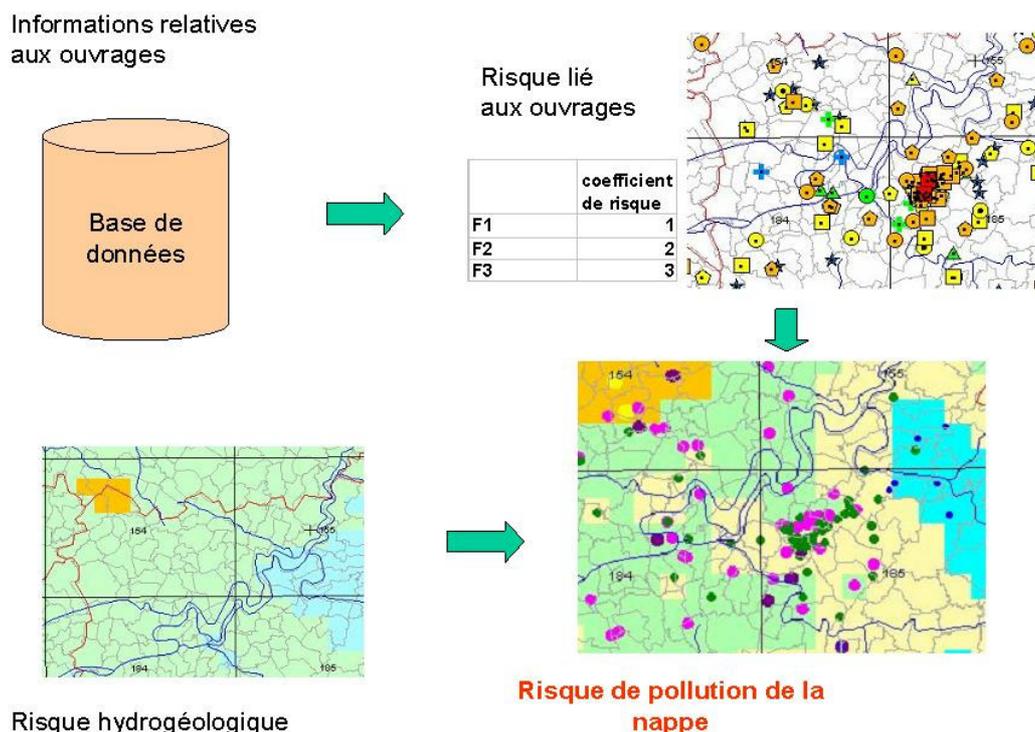


Figure 2 – Principe d'évaluation du risque de pollution d'un niveau aquifère

Cet outil a permis de traiter la quasi-totalité des forages abandonnés identifiés sur la zone d'étude et d'établir une cartographie du risque lié à ces forages vis à vis des nappes de l'Albien et du Néocomien. Cette cartographie a pour but d'identifier les forages présentant un risque *a priori* élevé.

réalisation du forage	exploitation du forage	abandon du forage
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Date de création de l'ouvrage ➤ Pertes ➤ Boues utilisées ➤ Cimentation des cuvelages ➤ Diamètre du cuvelage 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Période de mise en exploitation ➤ Durée d'exploitation ➤ Perforations du cuvelage ➤ Fluide exploité ➤ Pressions ➤ Tubing ➤ Incidents d'exploitation 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Date de bouchage ➤ Informations sur le bouchage ➤ Dépose des équipements de pompage et de complétion ➤ Modalités de bouchage (comparaison « bouchage 2000 ») ➤ Pourcentage de forage bouché ➤ Incidents de bouchage

Tableau 1 – Critères pris en compte pour le calcul du risque lié aux forages

Parmi ces critères, certains sont plus importants que d'autres en terme de risque. Cette importance sera reflétée par la valeur affectée au coefficient de risque. Parmi l'ensemble des critères pris en compte, la position des bouchons par rapport aux aquifères est le plus important. C'est donc celui pour lequel le coefficient aura le poids le plus important. Le critère relatif à la position des bouchons par rapport aux aquifères a été défini à partir des recommandations émises par la chambre syndicale de l'exploration-production d'hydrocarbures pour la fermeture des puits pétroliers [4]. Ce document donne en

particulier les règles de mise en place des barrières d'isolation : barrière d'isolation primaire (BIP), barrière d'isolation secondaire (BIS), barrière de surface (BSU).

Le coefficient de risque calculé pour chaque forage a été pondéré en prenant en compte l'hétérogénéité de l'information présente dans la base (figure 4). On n'observe pas de différence majeure en terme de risque lié aux forages pour l'Albien par rapport au Néocomien.

On a pu ainsi élaborer des cartes de risque lié aux forages vis à vis des nappes de l'Albien et du Néocomien. Il s'agit bien d'un risque potentiel et non pas d'une pollution avérée sachant que ce risque a été calculé de manière automatique à partir des données techniques de forage disponibles dans le cadre de l'étude.

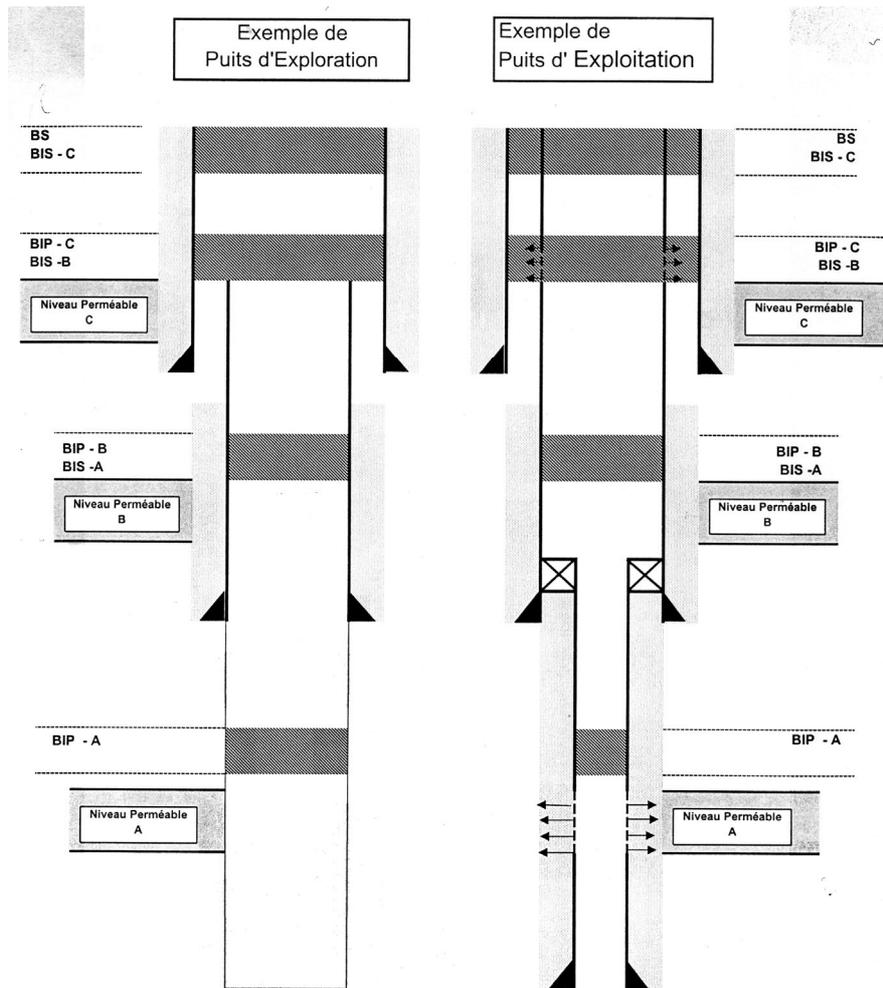


Figure 3 - Principe de bouchage d'un forage

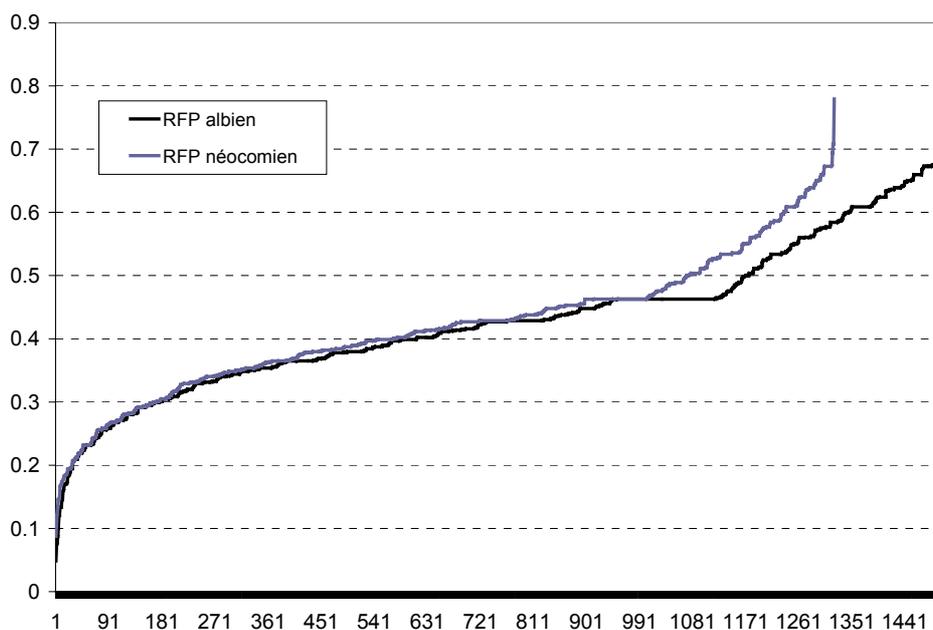


Figure 4 - Risque pondéré lié aux forages pour l'Albien et le Néocomien

IV. CARACTERISATION DU RISQUE HYDROGEOLOGIQUE

Un autre volet de l'étude, concernant la caractérisation du « risque hydrogéologique », prend en compte les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe et les enjeux liés à son exploitation (productivité, qualité).

Le risque est évalué par analyse multi-critères. Les critères pris en compte ne sont pas purement hydrodynamiques mais intègrent également la productivité et la qualité de l'aquifère qui ne sont pas homogènes sur l'ensemble du bassin. Nous avons ainsi considéré que dans les secteurs où l'aquifère était peu productif et où l'eau présentait une forte salinité, le « risque hydrogéologique » était plus faible.

Les paramètres pris en compte sont les suivants :

- Perméabilité verticale des niveaux argileux situés au-dessus et au-dessous de l'aquifère
- Epaisseur des niveaux argileux situés au-dessus et au-dessous de l'aquifère
- Transmissivité de l'aquifère
- Différence de pression par rapport aux aquifères sus et sous-jacents
- Salinité de la nappe
- Présence de failles

Les cartes de « risque hydrogéologique » ont été élaborées à partir de grilles des paramètres pris en compte pour chacun des aquifères et en affectant les poids associés à chaque critère. Certaines de ces grilles sont issues d'un modèle de gestion des aquifères [5].

V. RISQUE DE POLLUTION DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE PAR LES FORAGES

Le croisement du « risque hydrogéologique » et du risque lié aux forages a conduit à l'élaboration de cartes de risque de pollution de l'Albien et du Néocomien par des anciens forages abandonnés. Il ne s'agit en aucun cas d'une image figée de la « vulnérabilité » de la nappe, encore moins de son degré de pollution, mais d'un outil pour orienter les efforts à mener par la suite et pour définir des priorités d'actions. Par ailleurs ces cartes résultent d'une analyse multi-critères sur la base d'une méthodologie mise au point au cours de l'étude, à partir de données hétérogènes et non-exhaustives et dont les résultats n'ont pu être calés sur des données observées.

Les cartes font apparaître des différences plus marquées entre l'Albien et le Néocomien que les cartes de risque lié aux forages (figure 5). Ces différences sont liées à celles mises en évidence lors de la caractérisation du risque hydrogéologique.

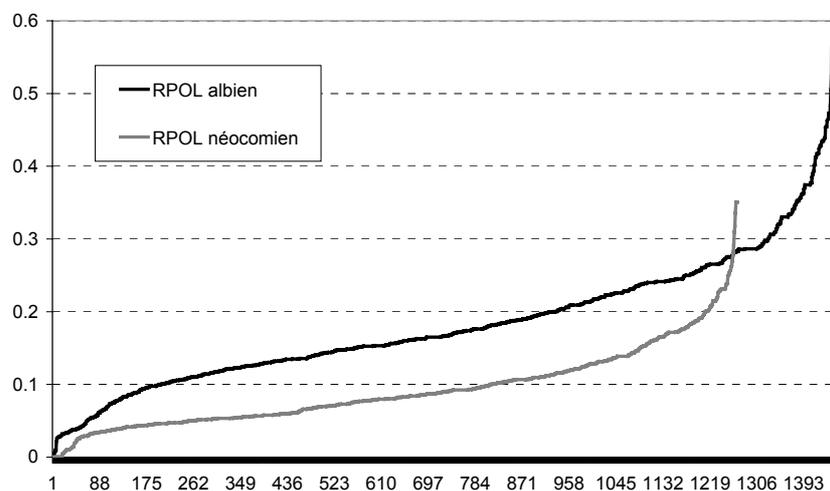


Figure 5 - Risque de pollution pour l'Albien et le Néocomien au droit des forages abandonnés

VI. CONCLUSION

L'évaluation des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie présentée ici vise à identifier les forages présentant un risque à priori élevé, en particulier vis à vis des nappes profondes de l'Albien et du Néocomien, considérées comme une ressource stratégique. Ce risque a été estimé par un traitement automatique des caractéristiques techniques des forages.

Ce travail a d'abord conduit à regrouper dans une base de données, l'information technique relative à près de 3500 forages. Cette information concerne en particulier l'architecture des forages (cuvelages, cimentations) et les modalités techniques d'abandon (bouchons de ciment). La méthode de traitement des données a été définie au cours de l'étude par un comité d'experts et pourrait être appliquée à d'autres secteurs présentant la même problématique.

Le traitement de ces informations a permis de cartographier les forages abandonnés susceptibles d'entraîner une pollution des nappes d'eau souterraine, en fonction du risque qu'ils présentent. Globalement la majorité des forages présentent un risque faible à moyen vis à vis des nappes de l'Albien et du Néocomien et on n'observe pas de différences majeures entre les deux aquifères. Environ un quart des forages présentent un risque jugé important. Une analyse au cas par cas de ces forages permettra de vérifier si ce risque est avéré ou non. Enfin, les forages peu renseignés, pour lesquels le risque calculé est donc sous-estimé, sont clairement identifiés et peuvent faire l'objet dans une étape ultérieure d'un complément d'information.

En tant que ressource, les aquifères de l'Albien et du Néocomien ne présentent les mêmes enjeux sur l'ensemble du bassin. La prise en compte de ce paramètre peut permettre de définir des priorités pour les actions à mener suite à cette étude. Une analyse multi-critère des paramètres hydrodynamiques des aquifères de l'Albien et du Néocomien et de l'exploitabilité de la ressource (productivité, qualité) a permis de cartographier un « risque hydrogéologique » indépendant des ouvrages, qui, combiné au risque lié aux forages a abouti à des cartes de risque de pollution de la nappe par les forages.

Il en ressort que dans les secteurs les plus favorables à l'exploitation des aquifères de l'Albien et du Néocomien, le risque de pollution est globalement faible, mais cette approche globalisante ne doit pas masquer la nécessité de revenir aux forages eux-mêmes afin d'analyser les résultats issus des calculs.

Références bibliographiques

- [1] Vernoux J.F., V. Bretteville, L. Denis, H. Fabris, T. Pointet, T. Souadi, P. Vigouroux (2003) - Inventaire et évaluation des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie, rapport final, BRGM/RP-52102-FR
- [2] Vernoux J.F., Maget P., Afzali H., Blanchin R., Donsimoni M., Vairon J. (1997) - Synthèse hydrogéologique du Crétacé Inférieur du bassin de Paris, rapport BRGM R39702.
- [3] Vernoux J.F., M. Degouy, H. Machard de Gramont, R. Galin (2002) - Etude bibliographique sur le suivi des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-51312-FR.
- [4] Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production de Pétrole et de Gaz Naturel (1998) – Fermeture des puits pétroliers, recommandations, 15 pages.
- [5] Agence de l'eau Seine-Normandie (2000) – Réalisation d'un modèle de gestion des aquifères de l'Albien et du Néocomien, rapport Hydroexpert RP00M040, 15/06/2000. *nord de Paris*.

SESSION 4

**Les apports de la télédétection.
Relations nappes - rivières.**

Téledétection spatiale : nouvelles perspectives en sciences de l'ingénieur et en géologie Exemple du bassin de Paris

Jean-Paul Deroin

Institut EGID BORDEAUX 3, 1 allée Fernand Daguin 33607 Pessac cedex France

deroin@egid.u-bordeaux.fr

Résumé. *La télédétection aérospatiale est une discipline en évolution rapide. Les domaines d'utilisation se diversifient en raison de nouvelles possibilités telles que la stéréoscopie, l'interférométrie, la haute résolution spectrale, la réalisation de modèle numérique de terrain, etc. Les images satellitales, notamment à partir de chroniques multitemporelles, sont largement utilisées en climatologie, agriculture, géologie, évaluation et prévention des risques, etc. Néanmoins, l'imagerie aux échelles moyennes à petites reste un atout considérable et encore incomplètement exploité pour l'étude des structures tectoniques globales telles que les grands bassins sédimentaires. Un exemple est ici donné sur le Bassin de Paris à partir des données récentes de la mission SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission).*

Abstract. *Remote sensing is an advanced and very evolutive discipline. The applications of space imagery are now divided in numerous topics, due to new characteristics such as stereoscopy, interferometry, high spectral resolution or hyperspectral imagery, digital elevation model capability, etc. Satellite imagery are widely applied to Earth sciences such as climatology, agriculture, geology, and particularly to hazard assessment. Nevertheless, middle to large-scale approaches should be frequently developed for geological mapping and especially for the survey of large-scale structures such as sedimentary basins. Data from the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) acquired on the Paris Basin illustrate the capability of the new sensors in Earth observation.*

I. INTRODUCTION

L'observation de la Terre à partir des capteurs embarqués sur des satellites, des plates-formes spatiales ou bien des navettes et des stations internationales s'est considérablement diversifiée au cours des dernières années. Les images à petites échelles disponibles dans les années 70 et au début des années 80 ont fait place à des données numériques exploitables à des échelles plus grandes [1]. En outre, des possibilités techniques nouvelles ont progressivement vu le jour telles que l'emploi du domaine infrarouge très important en géologie, l'infrarouge thermique, la stéréoscopie, l'utilisation de radars multifréquence et/ou multipolarisation, l'interférométrie réalisée à partir des données radar, ou plus récemment la couverture systématique du globe par un modèle numérique de terrain à haute résolution. L'application de ces différentes techniques et imageries au Bassin de Paris a été synthétisée par ailleurs [2 à 4].

Bien qu'un grand espoir ait été placé dans l'utilisation des images radar au milieu des années 90, celles-ci n'ont pas l'impact sociétal qu'elles mériteraient. La faute sans doute à la difficulté de lecture qui rend l'image radar souvent obscure pour les non-spécialistes. Les techniques de traitement et les formats d'image sont aussi un frein à une plus large diffusion des images radar qui restent employées par une communauté restreinte et qui a du mal à se

diversifier comme en témoigne le récent congrès de l'Agence Spatiale Européenne de Salzbourg en Autriche.

Depuis une vingtaine d'années, les techniques de traitement d'images satellitales se sont à la fois « démocratisées » grâce au développement de la bureautique, mais aussi complexifiées en raison de la nécessité de la mise en œuvre de nouvelles procédures : prétraitements, calibration, corrections atmosphériques, corrections géométriques nécessaires avant toute insertion dans un système d'information géographique, etc.

II. LES DONNEES DISPONIBLES

Ce chapitre synthétise les principaux programmes spatiaux susceptibles de fournir des données exploitables par la communauté des géologues *lato sensu*, notamment ceux dont les préoccupations touchent l'ingénierie : grands ouvrages, hydrogéologie, etc. Quatre grandes catégories d'information spatiale peuvent être définies : (1) les données optiques acquises dans le domaine visible et infrarouge du spectre électromagnétique ; (2) les données radar acquises dans les hyperfréquences ; (3) les produit dérivés de l'imagerie satellitale et (4) les données des capteurs non imageurs.

I.1. Les données optiques

I.1.1. La filière Landsat

La NASA a lancé en 1972 ERTS 1 (*Earth Resources Technology Satellite*) rapidement renommé Landsat 1. Les premières données ont été très largement diffusées et utilisées par la communauté internationale, malgré le manque de moyens en traitement numérique. Pour la première fois, une cartographie des grandes unités géomorphologiques était permise à une résolution spatiale moyenne (80 m), mais en fait suffisante pour le suivi des structures à l'échelle du bassin ou de la chaîne, comme montré sur le bassin de Paris par de nombreux auteurs [e.g. 5 à 8]. Jusqu'en 1983, le programme Landsat fut uniquement expérimental et orienté vers la recherche. Deux autres lancements eurent lieu durant cette période : Landsat 2 en 1975 et Landsat 3 en 1978, équipés comme Landsat 1 du capteur MSS (*MultiSpectral Scanner*). MSS a considérablement alimenté les recherches scientifiques et a constitué le premier grand capteur spatial utilisé, entre autres, pour la réalisation de la carte des linéaments de la France [9]. En 1983, sous l'impulsion de la politique libérale de Ronald Reagan la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) prit le contrôle opérationnel du système Landsat, orientation confirmée par le *Land Remote-Sensing Commercialization Act* de 1984. Les Landsat 4 (1982) et Landsat 5 (1984) furent lancés dans le cadre de cette nouvelle mission, puis l'accident de la navette Challenger en 1986 interrompit le programme pour de nombreuses années (ainsi du reste que les autres projets spatiaux des États-Unis d'Amérique). En 1993, Landsat 6 fut perdu dès sa mise en orbite. Les données du capteur TM (*Thematic Mapper*) à bord des Landsat 4 et 5 constituèrent la première grande révolution dans l'utilisation des images spatiales. Tout d'abord, la résolution de 30 m permit d'étendre le champ d'application de la télédétection à des domaines tels que l'urbanisme, tout en améliorant aussi la perception des bancs lithologiques et des failles dans le domaine de la géologie. Le domaine spectral fut étendu au moyen infrarouge, au SWIR (*short-wave infrared*), c'est-à-dire à l'infrarouge lointain, ainsi qu'au domaine de l'infrarouge thermique (à une résolution de 120 m seulement). La cartographie des sols et des formations géologiques en zone subaffleurante s'en est trouvé grandement améliorée. Le *Land Remote-Sensing Policy Act* de 1992 renversa la situation et un nouveau programme Landsat non

commercial fut lancé avec pour objectif la mise en œuvre de Landsat 7 ; il fut convenu d'une sorte de *partage de l'Empire* entre la NASA obtenant la maîtrise du segment-espace (système orbital) et la NOAA conservant la maîtrise du segment-sol (stations de réception et traitement). Landsat 7 fut lancé en 1999 et fournit depuis cette date des données d'une qualité exceptionnelle – particulièrement pour le géologue – grâce au capteur ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). L'amélioration réside dans l'adjonction d'un canal panchromatique à 15 m de résolution spatiale, couvrant le domaine du visible et du proche infrarouge. Chaque scène correspond à plus de 30 000 km² (contre seulement 3 600 km² pour SPOT). Les données sont désormais fournies sur l'ensemble de la scène, la notion de quart de scène employée initialement (et commercialement) pour Landsat 4 et 5 étant abandonnée en raison d'une amélioration des capacités de stockage et de traitement numérique. Néanmoins, il ne faut pas perdre de vue qu'une scène Landsat 7 a une taille généralement comprise entre 600 et 700 Mo (400 Mo « seulement » pour une scène Landsat 5).

I.1.2. La filière SPOT

SPOT, *Système pour l'Observation de la Terre*, est à l'origine un programme français auquel se sont joint la Suède et la Belgique. Il a démarré en 1977 sous l'impulsion du CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) associé au constructeur Matra. L'Agence Spatiale Européenne n'avait pas retenu ce système fondé sur l'imagerie optique à haute résolution spatiale. Les trois premiers satellites de la filière SPOT lancés en 1986, 1990 et 1993 sont équipés des mêmes capteurs HRV (*Haute Résolution Visible*). Ce capteur fonctionne en deux modes : l'un, panchromatique à 10 m de résolution, l'autre, multispectral à 20 m de résolution. Si cette configuration représente déjà une amélioration par rapport au système Landsat 5 (lancé en 1984), la nouveauté de SPOT réside principalement dans la possibilité de visée latérale à $\pm 27^\circ$ par rapport à la verticale, ce qui permet d'observer les images en stéréoscopie et de créer des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Seul SPOT 2 est encore opérationnel en 2004. Les communications avec SPOT 3 ont été perdues dès 1997 alors que SPOT 1, doyen des satellites opérationnels – il l'était encore 16 ans après son lancement – a été mis en veille, puis il a été décidé de le détruire dans le cadre de la contribution du CNES à l'élimination des *space debris* (déchets spatiaux) qui « encombrant » les orbites disponibles autour de la Terre. Les trois premiers satellites SPOT ont fourni une archive considérable, couvrant l'ensemble du globe. La possibilité de programmer rapidement (en quelques heures) des acquisitions a porté le système au premier plan des satellites opérationnels pouvant être mobilisés rapidement après des catastrophes naturelles (crues, séismes, ouragans, éruptions volcaniques, etc.) ou bien lors de conflits (première guerre d'Irak en 1991 notamment). Sa résolution spatiale en a fait également un outil idéal pour la classification de l'occupation des sols et particulièrement le suivi des quotas de cultures dans le cadre de la PAC (*Politique Agricole Commune*). Malheureusement, le domaine spectral considéré (visible-proche infrarouge) n'est pas optimal pour les applications cartographiques en géologie.

Le lancement de SPOT 4 en 1998 a représenté une évolution importante du système satellital français. Une version améliorée du capteur HRV, nommée HRVIR (*High-Resolution Visible and InfraRed*), a été mise en opération, caractérisée par l'ajout d'un canal spectral dans l'infrarouge moyen intéressant pour étudier l'humidité des surfaces. En plus de HRVIR figure l'instrument VEGETATION à 1 100 m de résolution spatiale et une fauchée de 2 200 km (largeur de la surface balayée en une fois). Il permet une couverture rapide du globe et cartographie la biomasse sur un cycle de huit jours. Le dernier de la lignée des SPOT, SPOT 5, a été lancé en 2002. Outre HRVIR et VEGETATION, il renferme deux nouveaux capteurs optiques. D'une part, HRG (*Haute Résolution Géométrique*) qui permet des

acquisitions à 5 m de résolution et l'élaboration de produits à 2,5 m ; d'autre part, HRS (*Haute Résolution Spatiale*) qui permet la réalisation de modèles numériques de terrain grâce à une visée avant-arrière, ce qui signifie qu'une seule orbite d'acquisition est nécessaire (il fallait deux images différentes acquises sur deux orbites avec SPOT 1-4, ce qui pouvait entraîner des problèmes de modification des états de surface et des conditions climatiques).

I.1.3. EOS (*Earth Observation System*)

Le programme EOS de la NASA constitue l'élément principal d'une mission plus large nommée MTPE (*Mission to Planet Earth*) de l'USGCRP (*United States Global Change Research Program*). Dès le début des années 80, des appels d'offres furent lancés pour identifier des instruments et des équipes scientifiques. En 1990, la NASA annonça la sélection d'une trentaine d'instruments devant être développés dans le cadre de EOS. Des limitations drastiques de budget conduisirent à ne retenir finalement que 17 instruments. Parmi les instruments disponibles sur les deux plates-formes Terra (1999) et Aqua (2002), les capteurs ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) et MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) sont les plus utiles aux géologues. ASTER fournit des données ayant une meilleure résolution spectrale que SPOT (avec une fauchée de 60 km comme lui) et même que Landsat, avec possibilité de stéréoscopie (avant-arrière). La résolution spatiale varie de 15 m (optique), 30 m (SWIR) à 90 m dans l'infrarouge thermique. Ces données sont particulièrement pertinentes en zone aride. MODIS, au contraire, est un capteur dédié aux observations régionales avec au mieux 250 m de résolution dans le visible. Il regroupe 36 canaux du visible à l'infrarouge thermique avec une très large gamme d'utilisation pour la cartographie des nuages et des océans, celle des surfaces terrestres (et de leur température) à petite échelle, le suivi des neiges et des glaces marines, la détection des microorganismes marins, etc.

I.1.4. ENVISAT-MERIS

La plate-forme européenne ENVISAT lancée en 2002 dispose d'un capteur optique-infrarouge comparable au MODIS de la plate-forme Terra. Il s'agit de l'instrument MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) qui acquiert des données dans le visible et le proche infrarouge avec une fauchée de 1 150 km. Mais contrairement à son homologue américain, les données MERIS sont très faiblement diffusées sur Internet et leur utilisation reste faible par rapport au ASAR (*cf.* congrès ESA de Salzbourg, septembre 2004). Une image MERIS du bassin de Paris est publiée dans [4].

I.1.5 Les données hyperspectrales

La haute résolution spectrale ou hyperspectrale est un domaine théoriquement très prometteur car la détection des caractéristiques biophysiques des surfaces n'est permise que si cette résolution est grande (de l'ordre de 10 nm). En outre, il convient de disposer de bandes spectrales nombreuses et contiguës. Actuellement, aucun système satellital ne remplit de telles conditions et la contiguïté ne pourra jamais être obtenue en raison des absorptions atmosphériques. Cependant, il existe des capteurs aéroportés tels que AVIRIS, CASI, GERIS, SFSI, etc. Les résultats sont encourageants, notamment dans le domaine minier (minéralisations, mais aussi détection d'éventuelles contaminations). Une synthèse de ce domaine spécifique de la télédétection a été faite par Carrère [10].

I.1.6 Les données à très haute résolution spatiale.

Des données à 1 m sont disponibles sur le satellite IKONOS. Une résolution de 0,61 m est obtenue avec Quickbird. Ces deux satellites font partie d'une nouvelle génération de capteurs placés sur des systèmes commerciaux ou CRSS (*Commercial Remote Sensing System*). De

telles données coûtent cher et leur utilisation en géologie n'est pour le moment pas probante. En revanche, pour la géologie de l'ingénieur ces systèmes permettent d'acquérir des images à haute résolution dans les zones dépourvues de photographies aériennes.

I.2. Les données radar

De manière générale, les données radar sont plus difficiles à exploiter que les données optiques. Néanmoins, il convient d'employer les données radar lorsque l'on recherche des informations sur l'humidité des sols, la rugosité ou sur la pente. En outre, étant indépendante des conditions atmosphériques, les images radar d'amplitude permettent l'acquisition de données même sous un couvert nuageux dense. Ceci est très important dans le cas du suivi des inondations ou des cyclones tropicaux, par définition toujours accompagnés de vastes couvertures nuageuses qui rendent inopérables les systèmes optiques.

I.2.1. ERS (*European Remote Sensing Satellite*)

Suite à l'échec de la mission américaine SEASAT qui ne fonctionna que trois mois en 1978 mais néanmoins illustrée sur la bassin de Paris par [11], et à la diffusion confidentielle des données du radar russe Almaz (1987-1991), ERS a représenté le véritable départ du radar et plus particulièrement celui des capteurs de type SAR (*synthetic aperture radar* ou radar à ouverture synthétique). Deux satellites ERS ont été lancés par l'Agence Spatiale Européenne en 1991 et 1995. Hormis le *Wind Scatterometer*, l'*Along-Track Scanning Radiometer* et un altimètre radar, ERS était équipé du capteur radar AMI (*Active Microwave Instrument*). AMI fonctionnait en bande C (soit 5,66 cm et 5,3 GHz), avec un angle d'incidence de 23° par rapport à la verticale. Cette faible incidence engendre des effets de recouvrement (*lay-over*) importants et rend l'image difficile à exploiter en zone montagneuse. Les domaines d'application d'ERS – particulièrement du capteur AMI – pour les ressources naturelles ont été synthétisés dans une publication spéciale [12]. ERS 2 possédait les mêmes capteurs que ERS 1 (dont AMI) avec en plus le capteur GOME (*Global Ozone Monitoring Experiment*) qui s'est révélé très important pour faire un suivi global de la concentration en ozone dans l'atmosphère. Une application des données ERS à la géologie et l'hydrogéologie du Bassin de Paris est donnée dans [13].

I.2.2. Les missions SIR (*Shuttle Imaging Radar*)

En 1981, 1984 puis 1994 (avec deux campagnes en avril et septembre-octobre) les navettes spatiales américaines ont permis l'acquisition de données radar en bande X (SIR-C/X-SAR uniquement), C et L. L'intérêt de ces missions consiste en l'acquisition simultanée de données dans des bandes de fréquence différentes (de 3,1, 5,8 et 23,5 cm respectivement). De remarquables résultats ont été publiés dans le domaine de la géologie et de l'hydrogéologie. L'inconvénient est la période très limitée d'acquisition de même que la couverture qui n'est pas globale, mais limitée aux secteurs visibles depuis les orbites de la navette spatiale, soit environ 60° de latitude nord ou sud.

I.2.3. ENVISAT-ASAR

Outre le système canadien RADARSAT lancé en 1995 et purement commercial, le capteur ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) à bord d'ENVISAT est le seul capteur radar actuellement opérationnel. Comme AMI, le capteur ASAR fonctionne en bande C ; cependant, il est caractérisé par la multipolarisation et également par un angle d'incidence variable de 15 à 45°, ce qui permet d'obtenir des configurations intéressantes en géologie (autour de 40°).

I.3. Les produits dérivés de l'imagerie satellitale

L'interférométrie est un domaine qui s'est développé grâce aux capteurs EMI de ERS. Cependant, le capteur SAR de JERS et d'autres SAR ont été utilisés pour créer des interférogrammes. Il s'agit d'une technique dont les bases théoriques sont connues depuis longtemps et les applications pionnières au radar satellital remonte à la première mission du genre, SEASAT en 1978 [14]. La physique du signal est également très particulière et le traitement des données radar permet d'obtenir des informations très précises sur les MNT (interférométrie) voire dans certains cas sur les mouvements verticaux d'ampleur centimétrique de la surface (interférométrie différentielle). Nous renvoyons à Fruneau *et al.* [15] pour les précisions méthodologiques concernant l'interférométrie avec une belle application sur Paris.

I.4. Les données des capteurs non imageurs

Malgré le grand intérêt que représente l'utilisation des techniques spatiales pour imager la Terre, la majorité des satellites mis en orbite correspond à des satellites de télécommunication. Ci-dessous sont brièvement décrits quelques-uns des systèmes les plus connus de positionnement.

I.4.1. ARGOS

Le système ARGOS est développé par le CNES. Il a été largement utilisé à partir des plateformes NOAA depuis 1978. Il s'agit d'un système de positionnement à partir de balises ayant une précision de 350 m. A partir de 1988, l'«*ARGOS World Service*» a procuré une localisation cinq fois par jours dans un rayon de 2500 km autour d'une base.

I.4.2. DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*)

Outre les capteurs imageurs HRVIR et VEGETATION, le satellite SPOT 4 est équipé du capteur DORIS qui a été également installé sur les SPOT 2 et 3, TOPEX/Poseidon et ENVISAT 1. Il s'agit d'un système de positionnement sous forme de balises, qui a de nombreuses utilisations notamment dans le domaine des courses transatlantiques et de l'exploration des zones inhabitées. Comme ARGOS, DORIS est développé par le CNES.

I.4.3. Le programme COSPAS-SARSAT

A partir des concepts français (S&RSAT) et russe (COSPAR), un programme de développement commun a été établi dès 1979. La NOAA et le ministère de la Défense du Canada sont également associés, ainsi que d'autres partenaires, plusieurs dizaines de pays ayant désormais rejoint ce programme. Il consiste à détecter des signaux de détresse (et non à faire du simple positionnement comme avec ARGOS). La mise en œuvre des moyens de secours est considérée dans le programme. Les satellites géostationnaires de type NOAA, GOES et Meteosat Second Generation sont équipés de ce système.

I.4.4. Le programme NAVSTAR-GPS (*Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System*)

NAVSTAR-GPS, généralement simplifié en GPS, a été lancé par la NASA en 1978. Les premiers satellites furent cependant retardés en raison d'une adaptation nécessaire suite à la mise en œuvre de la navette spatiale en 1981. L'inclinaison orbitale des satellites a été alors revue de 63 à 55°, afin de permettre l'utilisation de la navette pour la mise en orbite à une altitude de 20 200 km. C'est lors de la *Air Navigation Conference* de Montréal en septembre 1991 que le système GPS a été ouvert à la communauté scientifique avec une précision d'environ 100 m. Plus tard en 1995, Bill Clinton a décidé de donner accès librement au GPS avec une résolution décimétrique qui est toujours disponible en 2004.

I.4.5. Le programme GLONASS (*Global Orbiting and Navigation Satellite System – Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*)

GLONASS était initialement conçu comme le concurrent russe du GPS. Les orbites, les fréquences employées et les formats de données étaient identiques. Les premiers satellites furent mis en orbite par l'URSS en 1982, puis onze autres lancements de 1983 à 1994 permirent à chaque fois de mettre trois satellites en orbite. Finalement, il n'y avait que 16 satellites opérationnels (sur 24 requis) en 1996 et le programme n'a pas été inscrit dans les priorités de la politique spatiale russe. Il est probable que la constellation de satellites sera reprise pour constituer un système amélioré.

I.4.6 Le système GALILEO

Le 26 mai 2003, la Commission européenne et l'Agence Spatiale Européenne sont convenues d'étudier les conditions de mise en place d'un système de navigation globale européen. La constellation sera composée de 27 satellites situés à 23 616 km d'altitude et répartis sur trois orbites inclinées à 56° par rapport à l'équateur. Le système GALILEO est à vocation principalement civile, la multiplication des bandes permettant néanmoins de réserver des modes d'acquisition à des utilisateurs non civils. La précision du positionnement sera améliorée par rapport au GPS grâce à un nombre de satellites plus élevé (27 au lieu de 21) et un signal de meilleure qualité. Cependant, d'ici 2008 date prévue pour la mise en service de GALILEO, le GPS aura également subi des améliorations. C'est ALENIA Telespazio en Italie qui est chargé de la construction des satellites. Un appel d'offres européen arrivé récemment à échéance (dead-line au 8 octobre 2004) propose d'évaluer les apports du système GALILEO dans différents domaines dont ceux de l'énergie, de l'environnement et des transports.

II. LA MISSION SRTM : UN EXEMPLE DE NOUVELLES DONNEES DISPONIBLES

La mission SRTM, *Shuttle Radar Topographic Mission* ou mission topographique radar à bord de la navette spatiale, a été réalisée conjointement par la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), la DLR (*Deutsche Luft- und Raumfahrt*) et l'ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*). Entre le 11 et le 22 février 2000, la mission de la navette spatiale américaine Endeavour a été dédiée à la réalisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) sur l'ensemble des terres émergées. Pour la première fois, un MNT global, ou plus précisément restreint à la zone entre 60°N et 57°S, a été obtenu à haute résolution, c'est-à-dire avec un pas de 1 à 3 secondes d'arc, soit environ 30 m de résolution optimale. Deux antennes fonctionnant respectivement en bande C et en bande X (fréquences de 5,3 et 9,6 GHz respectivement) ont acquis simultanément des données. Comme pour la mission SIR-C/X-SAR de 1994, la NASA a traité les données en bande C (soit 119 millions de km²) alors que la DLR a traité celles acquises en bande X (58 millions de km²). À l'issue de la mission, deux types de produits ont été créés ; d'une part, des modèles numériques de terrain interférométriques obtenus à partir des données acquises par les deux antennes avec des angles de vue différents ; d'autre part, des données « image ». Le *World Geodetic System* (WGS84) a été utilisé comme datum. La mission et ses objectifs ont été décrits en détail par Rabus *et al.* [16].



Figure 1 - Modèle numérique de terrain SRTM centré sur la région de la vallée de la Seine en amont de Paris (environ 80 x 100 km).
Les gris sombres caractérisent des hauteurs plus importantes.

En septembre 2004, les premières images SRTM détaillées sur la France ont été mises à disposition sur Internet (<http://glcf.umiacs.umd.edu>). La figure 1 présente un exemple sur le bassin de Paris. L'image du relief apparaît particulièrement originale, notamment lorsqu'on la compare au représentation synthétique de l'Institut géographique national (IGN). Le trait le plus remarquable correspond aux alignements WNW-ESE qui matérialisent les zones d'affleurement des sables et grès de Fontainebleau. Notamment, ces alignements sont clairement visibles au sud de la Brie près de Melun, ainsi qu'entre l'Essonne et le Loing. On note la présence d'un linéament Fontainebleau-Etrechy. Certaines rivières comme l'Yvette, la Remarde ou les hautes vallées de l'Orge et de la Bièvre apparaissent beaucoup plus linéaires qu'à la lecture des cartes géologiques. Il est certain que ce type de données peut alimenter les discussions relatives à l'origine des fameux Grès de Fontainebleau et contribuer à l'analyse morphostructurale du bassin. Toujours dans l'Oligocène, d'autres linéaments apparaissent sur les données SRTM du Bassin de Paris dans la région de Villers-Cotterets et de Poissy, et plus généralement entre Paris et l'Eure. En outre, l'anticlinal du pays de Bray est remarquablement illustré. On s'aperçoit clairement que les zones les plus basses de l'anticlinal correspondent au Crétacé inférieur (essentiellement Wealdien) et non au Jurassique supérieur. La faille bordant l'anticlinal du Bray au nord-est se prolonge en direction du sud-est. La basse vallée du Grande Morin en aval de Crécy-en-Brie semble alignée sur le prolongement hypothétique de

l'anticlinal à environ 45 km de l'Oise. On perçoit aussi des effets morphologiques de l'axe du Bray vers Orry et Survilliers.

III. CONCLUSION

La télédétection aérospatiale devrait se diversifier encore considérablement dans les prochaines années. Outre l'imagerie désormais classique et disponible à des résolutions spatiales variant de 1 à 1 000 m, des produits dérivés tels que les MNT sont très intéressants pour les études de sites comme pour les études géologiques et géomorphologiques régionales. Si la confrontation de ces MNT avec les données bibliographiques est intéressante, l'utilisation de ces mêmes MNT dans des zones peu connues sera génératrice de résultats encore plus spectaculaires. Ils sont déjà intégrés dans l'analyse de grands sites sensibles (barrages, lacs glaciaires, volcans, littoraux, etc.). Mais si aucun contrôle au sol n'est nécessaire pour l'élaboration de ces données, il n'en demeure pas moins que la connaissance géologique régionale repose avant tout sur les données recueillies sur le terrain, et depuis plus de deux siècles pour ce qui concerne le Bassin de Paris. La télédétection spatiale est ainsi une discipline privilégiée pour associer les technologies les plus modernes et les connaissances fondamentales du terrain.

Références bibliographiques.

- [1] Chorowicz J., Deroin J.-P., 2003 – *La télédétection et la cartographie géomorphologique et géologique*. Collection Géosciences, Éditions Scientifiques GB, 141 p.
- [2] Scanvic J.-Y., Rouzeau O., 1989 – Contribution de la télédétection spatiale à la connaissance géologique du bassin de Paris. Synthèse des principaux résultats. *Actes 114^e Congr. nat. Soc. sav.*, Paris, 1989, Géol. Bassin parisien, p. 213-228.
- [3] Deroin J.-P., Rouzeau O., Scanvic J.-Y., 1994 – Vingt années d'imagerie satellitaire sur le bassin de Paris. Une vision géomorphologique et géologique originale d'un grand bassin sédimentaire. *Bull. Inf. Bass. Paris*, 31, 4, p. 29-35.
- [4] Deroin J.-P., 2003 – Trente années d'imagerie satellitale sur le bassin de Paris. *Bull. Inf. Bass. Paris*, 40, 4, p. 29-31.
- [5] Cavelier Cl., Scanvic J.-Y., Weecksteen G., Zisermann A., 1973 – Capability of ERTS-1 imagery to investigate geological and structural features in a sedimentary basin (Bassin parisien, France). In : Symposium on significant results obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1, vol. 1, Technical Presentations, Section A, *NASA Special Publication*, 327, p. 273-282.
- [6] Rivereau J.-Cl., 1973 – Composition colorée d'une image ERTS de la région parisienne. *Photo-Interprétation*, 12, 4, p. 20-27.
- [7] Bruyelle P., Wilmet J., 1975 – Étude régionale d'une partie de l'Europe du Nord-Ouest sur composition colorée obtenue à partir des données Landsat 1. *Revue Photo-Interprétation*, 6, 4, p. 26-32.
- [8] Debrand-Passard S., Ogier M., Médioni R., 1977 – Un exemple de corrélation entre les données obtenues à partir des images ERTS, des études géophysiques et de la cartographie géologique : permanence et rejeu d'accidents profonds dans le Berry à différentes périodes comprises entre le Carbonifère et le Tertiaire (Cher et Indre, feuilles Vatan et Bourges à 1/50 000). *Journées Télédétection du GDTA*, St-Mandé, 21-23 septembre 1977, p. 299-306.
- [9] Scanvic J.-Y., Weecksteen G., 1980 – Carte des linéaments de la France d'après les images des satellites Landsat (1972 à 1976). *Document du BRGM*, 14, Carte à 1/1 000 000, notice 14 p.
- [10] Carrère V., 2003 – Télédétection à haute résolution spectrale (ou hyperspectrale) et géologie. *Bulletin Inf. Géol. Bass. Paris*, 40, 4, p. 19-28.

- [11] Simonin A., 1984 – Apport d'un enregistrement du satellite SEASAT (Radargraphie) à la connaissance du milieu physique dans la région de Fontainebleau. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 21, 2, p. 99-103.
- [12] Collectif, 1995 – *New Views of the Earth, Scientific Achievements of ERS-1*. ESA Publication Division, *Special Paper*, 1176, 162 p.
- [13] Obert D., Chorowicz J., Dewolf Y., Koffi B., Deffontaines B., 1997 – Structures linéaires réactivées du Bassin parisien centre occidental et méridional observées à partir des images radar SAR-ERS 1. *Actes des journées Claude Lorenz*, 17-18 novembre 1995, J. Lorenz, P. Benoit & D. Obert éditeurs, AGBP-AEDEH, p. 97-101.
- [14] Zebker H.A., Goldstein R.M., 1986 – Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 91, B5, p. 4993-4999.
- [15] Fruneau B., Deffontaines B., Prunier-Leparmentier A.-M., Rudant J.-P., 2003 – Interférométrie différentielle radar : mesure de déplacements verticaux sur Paris. *Bulletin Inf. Géol. Bass. Paris*, 40, 4, p. 11-17.
- [16] Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R., 2003 – The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57, p. 241-262.

Analyse de la contribution des nappes aux débits d'étiage du bassin de la Seine

Pascal Viennot, Emmanuel Ledoux, Eric Gomez

Centre d'Informatique Géologique. Ecole des mines de Paris/ARMINES

35, rue Saint Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex

Pascal.Viennot@ensmp.fr

Le modèle hydrologique couplé *MODCOU*, développé au Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris [2] a été appliqué au bassin de la Seine pour simuler, au pas de temps journalier, les débits dans le réseau hydrographique mais également la piézométrie dans les aquifères de la Craie, de l'Eocène et de l'Oligocène, (qui constituent le système hydrogéologique interne) par le biais d'une modélisation mathématique des nappes. Après calage des différents paramètres du modèle, il a été possible de reproduire l'ensemble du fonctionnement hydrodynamique du bassin et ainsi d'estimer, par simulations prospectives, la contribution des nappes internes aux débits d'étiage des principaux cours d'eau du bassin de la Seine.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du programme PIREN-Seine et à la demande particulière de la DIREN-Ile de France, Service de bassin [3], dont une des préoccupations est d'approcher la capacité des nappes à soutenir les étiages en fonction de leur niveau piézométrique.

I. MODELE MATHEMATIQUE MODCOU APPLIQUE AU BASSIN DE LA SEINE

I.1 Présentation générale

La figure 1 présente le principe général du modèle hydrologique MODCOU, couplant les écoulements de surface et les écoulements souterrains.

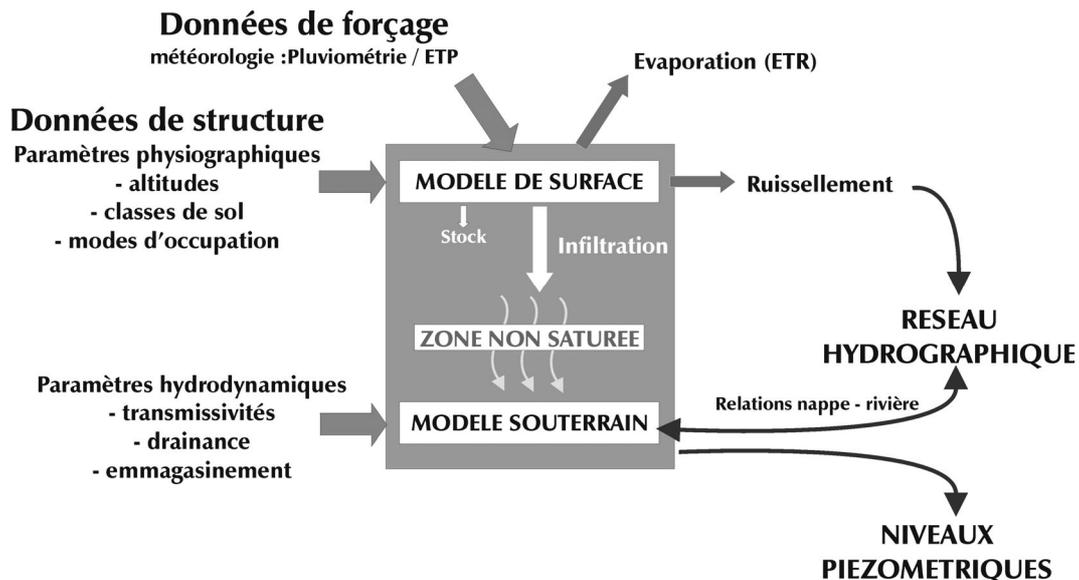


Figure 1 - Principe général du modèle hydrogéologique couplé MODCOU

La zone d'étude est discrétisée en une structure multicouche (figure 2) comprenant une couche de surface et autant de couches souterraines que d'aquifères, discrétisées en mailles carrées emboîtées, auxquelles sont rattachées les caractéristiques du domaine (direction de drainage, altitude, distribution des zones de production pour les mailles de surface ; transmissivité, coefficient de drainance, coefficient d'emménagement pour les mailles des couches souterraines).

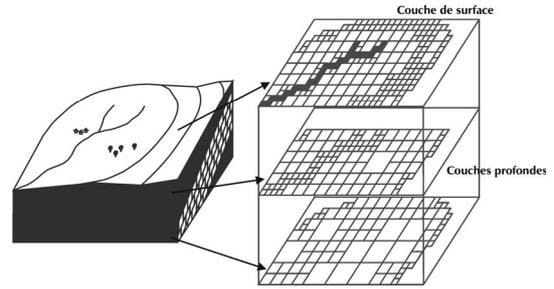


Figure 2 - Principe de la schématisation multicouche

Pour ce qui concerne modèle du bassin de la Seine, initié par E. Gomez dans le cadre de sa thèse de doctorat [1], la couche de surface couvre une superficie totale de 95560 km² et est constituée de 35198 mailles de 1 à 8 kilomètres de coté (figure 3). Les grandes formations aquifères représentées sont au nombre de trois et sont respectivement, de la plus superficielle à la plus profonde, l'Oligocène, l'Eocène et la Craie (figure 4).

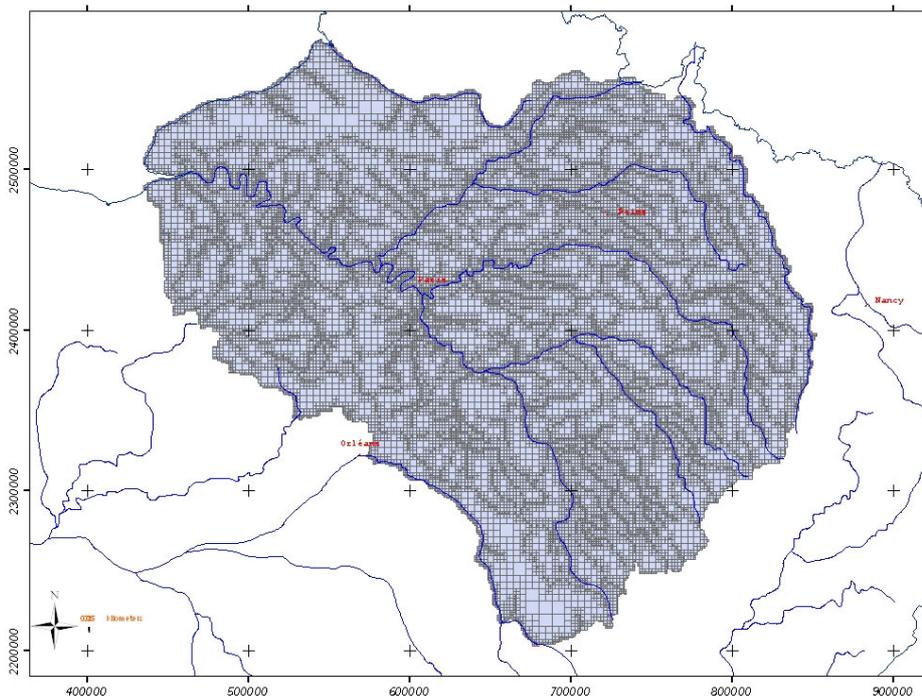


Figure 3 - Maillage de la couche de surface

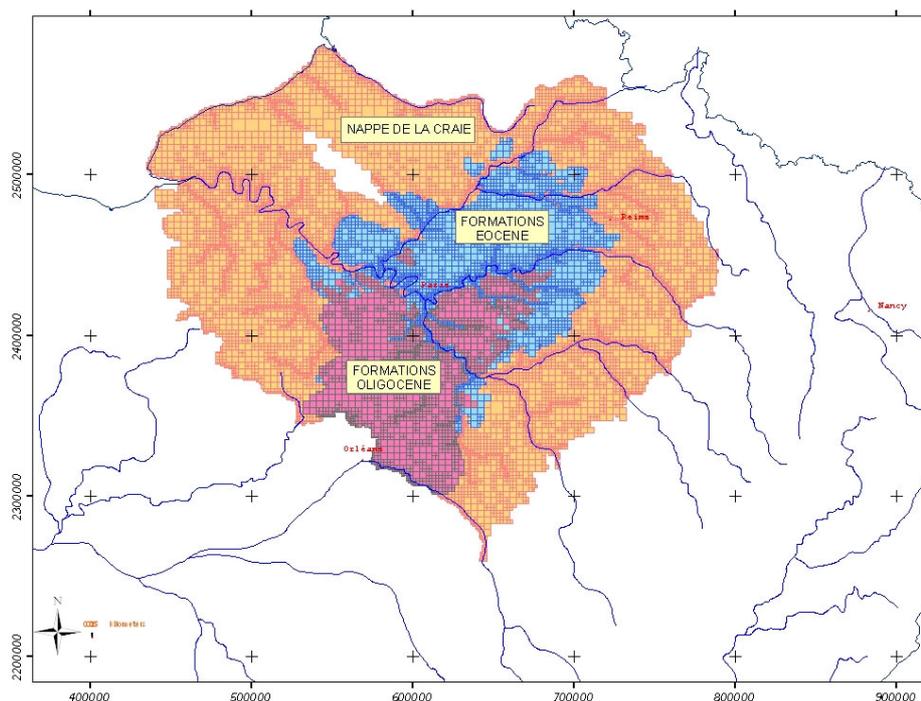


Figure 4 - Maillages des formations aquifères

I.2. Calage du modèle en régime transitoire

La qualité de la représentativité du modèle à reproduire le fonctionnement hydrogéologique global du bassin est évaluée par comparaison de chroniques calculées de niveaux piézométriques et de débits aux valeurs mesurées en différentes stations réparties sur le bassin (à partir du 1/1/1999, ces débits ont été naturalisés par intégration des apports ou prélèvements des différents barrages-réservoirs du bassin mais ne tiennent en aucun cas compte des prélèvements anthropiques).

Le calage des données de structure de la couche de surface et des paramètres hydrodynamiques des trois couches aquifères a été effectué par E. Gomez [1] sur la période 1970-1999 pour optimiser la restitution des débits sur 125 stations et des charges hydrauliques de 139 piézomètres. Ce calage a été repris au printemps 2004 afin d'améliorer les résultats obtenus sur l'ensemble de la période 1970-2004.

Les données météorologiques d'entrée du modèle (pluviométrie¹, ETP) ont été fournies par Météo-France au pas de temps journalier et sur une grille régulière au pas de 8 kilomètres de côté couvrant l'ensemble du bassin, en application de la procédure Safran-Crocus.

A titre d'exemple, la figure 5 présente la restitution comparée des charges hydrauliques calculées par le modèle entre 1985 et 2004 sur 3 piézomètres appartenant à chaque aquifère représenté et le débit restitué de la Seine à Alfortville sur les cinq dernières années. Ces résultats montrent que le modèle permet de reproduire de manière très satisfaisante les charges hydrauliques sur l'ensemble du domaine mais également de reproduire les variations saisonnières et pluriannuelles de piézométrie liées à la variabilité climatique.

¹ Les précipitations neigeuses, peu importantes sur le bassin de la Seine, sont intégrées directement sous forme liquide

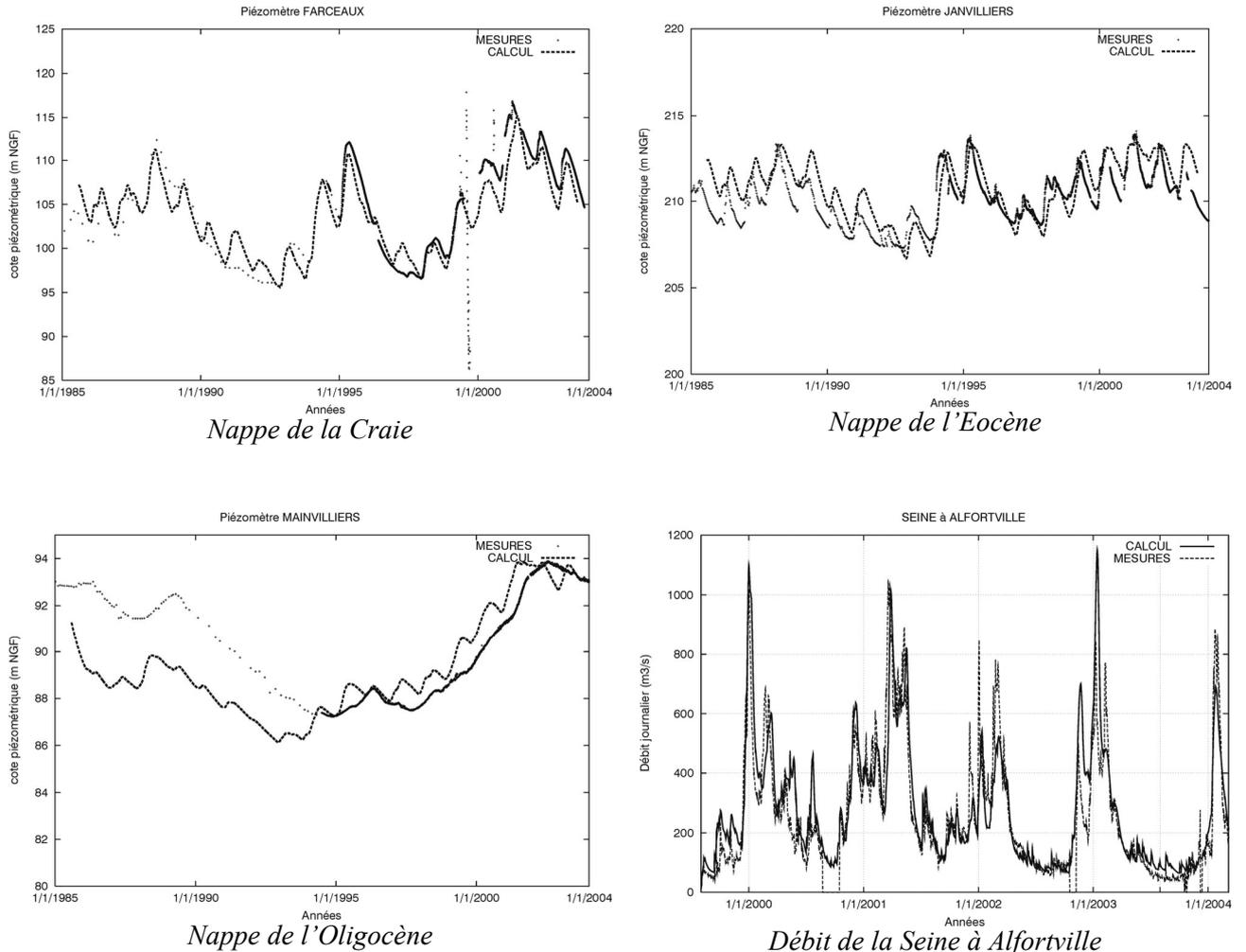


Figure 5 - Exemples de restitutions du modèle

II. APPLICATIONS DU MODELE : RESTITUTION DES DEBITS D'ETIAGE

II.1 Débits de base des grandes rivières du bassin

L'utilisation du modèle permet d'extraire, en tout point du réseau hydrographique (selon le pas du réseau maillé) et à chaque pas de temps de calcul, le débit de base, c'est à dire la part du débit global fournie par les nappes internes modélisées. A titre d'exemple, la figure 6 présente le débit de base calculé de la Seine sur l'ensemble de la période de simulation. Cette courbe montre les variations saisonnières et inter-annuelles de débit liées au niveau général des grandes formations aquifères. Sur la période considérée (1970-2004), le débit de base à Paris peut ainsi varier, en début de saison, pratiquement du simple au triple (60 à 180 m³/s).

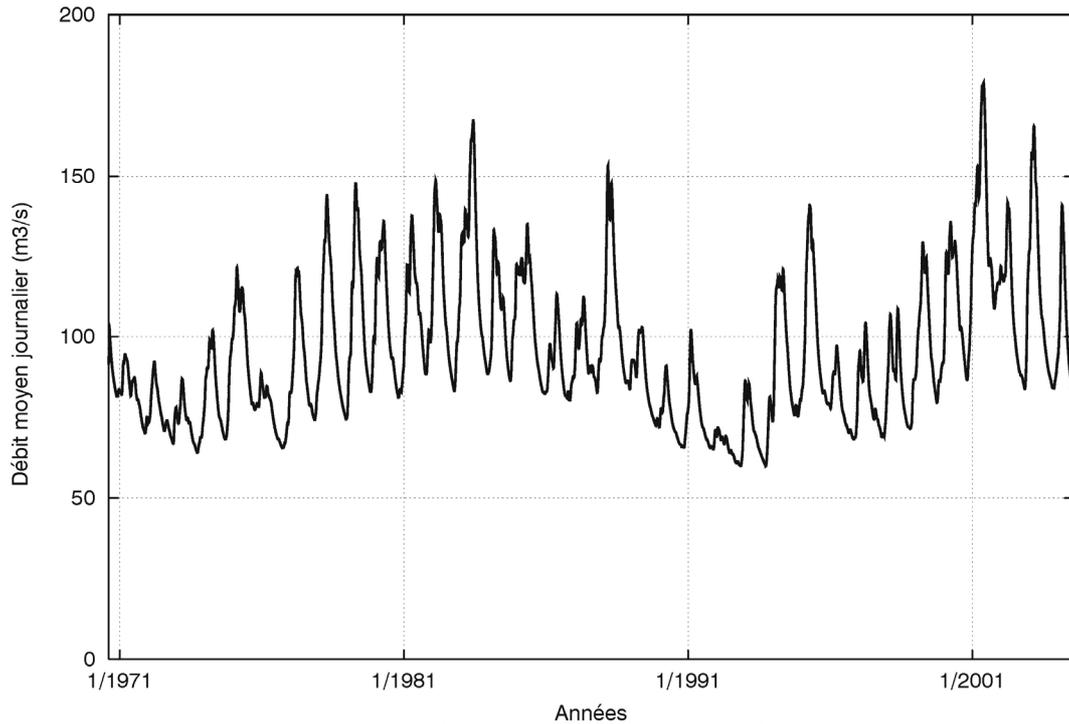


Figure 6 - Débit de base de la Seine calculé à Paris

II.2 Débits de tarissement estimés

A partir des résultats du modèle, il devient également possible d'estimer quel pourrait être le débit de tarissement des rivières en cas d'étiage sévère et prolongé. On peut, par exemple, estimer ce débit de tarissement en supprimant toute alimentation du modèle par les pluies météoriques sur une période de temps Δt à partir d'une date t . A titre d'exemple, la figure 7 présente les débits de tarissement de la Seine calculé à Paris en supposant un arrêt total des précipitations pendant 18 mois suivant chaque 1^{er} mai de la période 1970-2004.

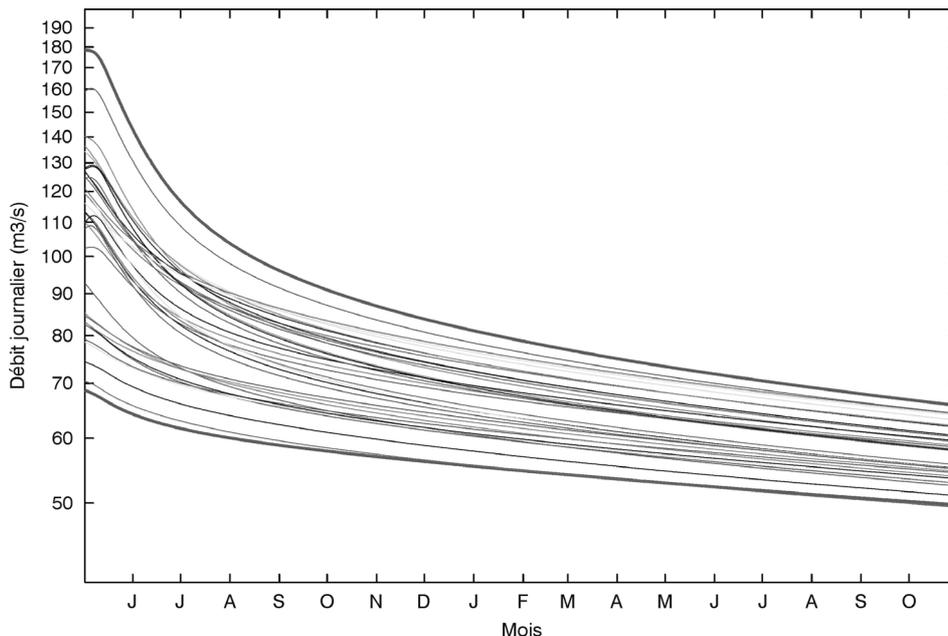


Figure 7 - Débit de tarissement de la Seine à Paris calculé sur 18 mois à partir du 1^{er} mai de chaque année de simulation (période 1970-2004)

Pour chaque station hydrométrique, les débits de base peuvent être classés par classe de valeur au 1^{er} mai (par exemple) de chaque année de simulation. Cela permet de détecter, sur la période globale simulée, quelles ont été les années à débit de base élevé ou plus faible. Sur ces mêmes graphiques on précise également, pour chaque année, les évolutions du débit global calculé de la rivière à partir du 1^{er} mai en imposant des précipitations nulles. Le point de départ de ces courbes correspond donc au débit global calculé par le modèle à cette date et pour la station considérée. Ceci permet de mettre en évidence le temps nécessaire à l'évacuation par le réseau hydrographique de la part des débits induits par le ruissellement et les nappes externes. On remarque que globalement, il faut entre 3 et 4 semaines pour atteindre le débit de base. La figure 8 présente les résultats obtenus par années, classées par tranche de débit de base au 1^{er} mai inférieur à 80 m³/s (les plus faibles) et supérieur à 140 m³/s (les plus fortes).

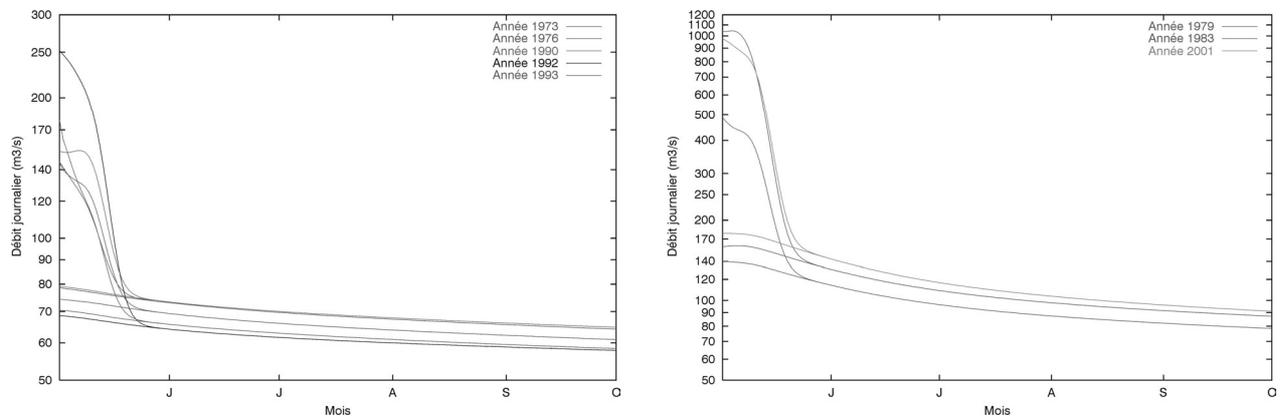


Figure 8 - La Seine à Paris : débits de base au 1^{er} mai inférieurs à 80 m³/s et supérieurs à 140 m³/s

II.3 Approche du débit de base à partir de mesures piézométriques

Une des préoccupations de la DIREN est d'approcher la capacité des nappes à soutenir les étiages en fonction de leur niveau piézométrique. Un premier type de réponse a été apporté par l'approche précédente, dans la mesure où le débit de base d'un cours d'eau est une représentation globale de l'état des nappes qui l'alimentent. Un second type de réponse peut être proposé en cherchant une relation directe entre la piézométrie et le débit d'étiage.

A partir du choix d'un certain nombre de piézomètres dont les niveaux calculés en régime transitoire sur les 34 ans de simulation sont constatés comme bien représentatifs des niveaux effectivement mesurés, on peut tracer, par exemple, le débit de base calculé à différentes périodes d'un étiage prolongé en fonction du niveau piézométrique mesuré à une date fixée.

A titre d'exemple, la figure 10 montre le débit de base calculé à Paris après 5 mois d'étiage forcé en fonction du niveau piézométrique calculé (et proche de l'observé) au début de la période d'étiage considérée (1^{er} mai de chaque année) et ce sur deux piézomètres captant la nappe de la Craie et deux autres la nappe de l'Eocène (figure 9). De cette manière, chaque figure comporte 33 points dont la valeur en abscisse correspond aux mesures piézométriques à chaque 1^{er} mai de la période 1970-2004 et la valeur en ordonnée celle du débit de base de la Seine à Paris calculé le 1^{er} octobre de la même année. La qualité de la relation « niveau piézométrique/débit de base » peut être approchée par le coefficient de corrélation de la régression linéaire associée.

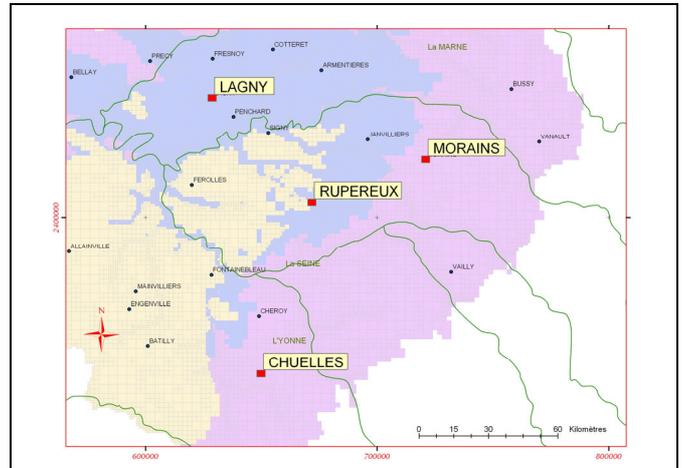


Figure 9 - Situation géographique des piézomètres retenus

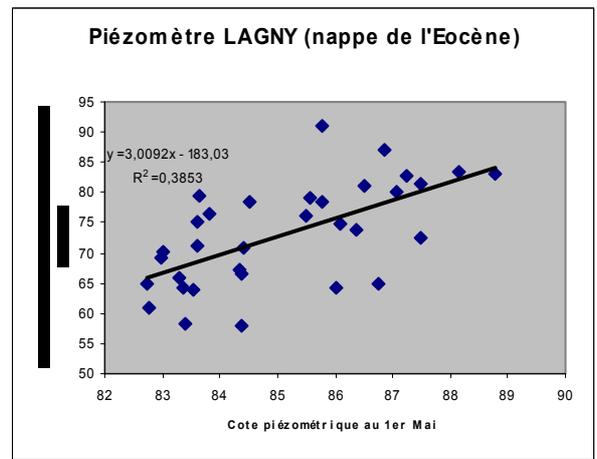
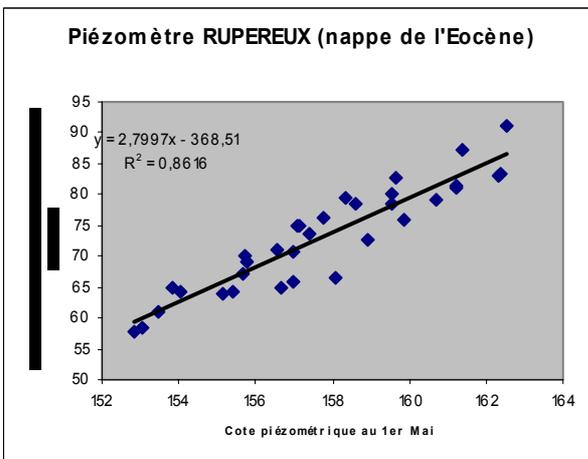
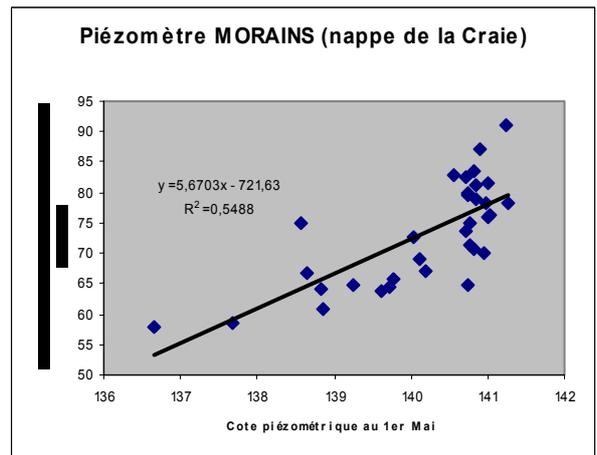
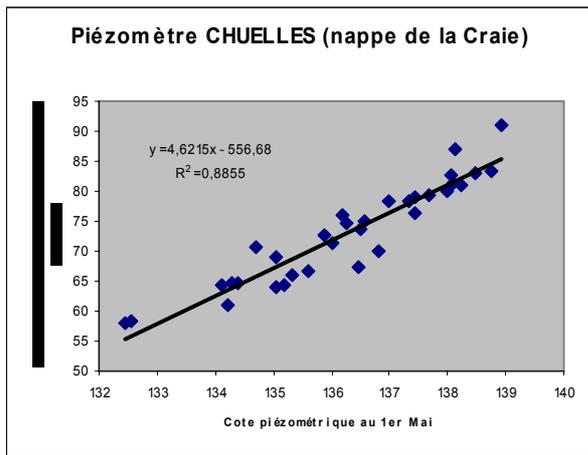


Figure 10 - Relation niveau piézométrique / débit de base de la Seine à Paris au bout de 5 mois d'étiage prolongé

Ces premiers résultats obtenus grâce au modèle mathématique montrent une grande disparité entre piézomètres quant à la qualité du coefficient de corrélation obtenu et donc la difficulté d'approcher de manière satisfaisante un débit d'étiage par un suivi piézométrique, tout au moins à partir des quelques piézomètres retenus lors du calage du modèle.

De plus, comme le montre la figure 11, pour un même piézomètre (ici, le piézomètre de Chuelles, nappe de la Craie), le coefficient de corrélation obtenu dépend également du temps entre la date de mesure piézométrique et celle d'estimation du débit d'étiage. Sur cette courbe sont reproduits les coefficients de corrélation linéaire (R^2) calculés mois par mois suivant le début de la période d'étiage et de la date de mesure piézométrique. On remarque que plus l'étiage est tardif, meilleure est l'estimation du débit à partir de la mesure piézométrique. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'à plus long terme, les petites variations piézométriques locales se gomment au profit de variations globales plus intégratrices du niveau général des grands aquifères et donc de leur contribution aux débits de base des rivières.

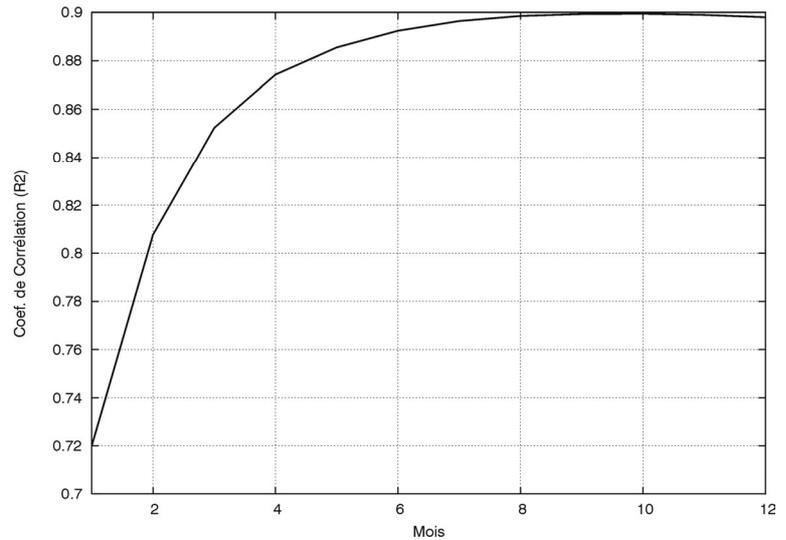


Figure 11 - Evolution du coefficient de corrélation calculé sur le piézomètre de Chuelles (nappe de la craie)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gomez, E. (2002) Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 287 pp.
- [2] Ledoux, E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et Université Paris 6.
- [3] Viennot, P., Ledoux, E. (2004) Modélisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine -Calage du comportement des nappes internes du bassin de la Seine - Prévion des étiages, rapport Ecole des mines CIG LHM/RD/04/30.

La contribution des eaux souterraines aux inondations Modélisation des hautes eaux de la Somme

Thierry POINTET, Hubert MACHARD de GRAMONT, Vincent MARDHEL
BRGM service EAU 3, avenue Cl. Guillemin BP 6009 45060 ORLEANS cedex 2
t.pointet@brgm.fr

Les hautes eaux de la Somme en 2000-2001 ont attiré l'attention sur la contribution possible des nappes aux crues des rivières avec des considérations qui peuvent être étendues à bon nombre de régions de plateaux sédimentaires perméables en surface, rde la moitié nord de la France notamment. Le BRGM a été sollicité par la DIREN Picardie pour évaluer le rôle de la composante souterraine dans le bilan d'eau du bassin versant de la Somme pendant l'hivernage 2000-2001 et concevoir un outil de prévision pour les années suivantes.

Une crue est un phénomène intégrateur à plusieurs composantes, depuis la pluie au sol jusqu'à l'eau des rivières au sortir du bassin. L'importance relative de chaque composante dépend de la morphologie du bassin versant, de son hydrogéologie, des états de surface – y compris le gel des sols en hiver-, de l'historique des pluies, de la répartition dans le temps des pluies récentes, etc.. Une des composantes est le flux souterrain, dont on sait qu'il est très important dans la craie, substratum général du bassin de la Somme.

Les lois de l'hydrodynamique qui s'appliquent aux écoulements souterrains, ont permis d'appliquer les techniques de modélisation développées en gestion des nappes afin d'expliquer le comportement du bassin versant souterrain de la Somme. Le test des hypothèses émises sur les écoulements souterrains a été engagé en juillet 2001, en procédant d'abord à une révision complète du schéma hydrogéologique. Plusieurs séries de modèles ont été réalisées : d'une part des modèles globaux locaux de type Gardenia, d'autre part un modèle de 34000 mailles en régime transitoire sur l'ensemble du bassin. Une première version de ces modèles était disponible en décembre 2001.

Les modèles ont montré que les nappes de la craie, sous bassin par sous bassin contribuaient au débit de la Somme de manière proportionnellement croissante de l'amont à l'aval du bassin. Si en étiage cette contribution est quasi totale, on a démontré qu'en crue les nappes fournissaient encore 80% du débit de la Somme à Abbeville.

L'étude des faciès chimiques et isotopiques des eaux a confirmé la forte contribution des eaux souterraines à l'écoulement en rivières.

L'outil de prévision-évaluation conçu en 2001 simule l'évolution du débit de la Somme à Abbeville. Il est exploité toutes les quinzaines en période hivernale (de novembre à mai) depuis 2002. Le modèle maillé est destiné à être exploité une fois l'an pour établir et analyser a posteriori la contribution des nappes aux débits des cours d'eau et la répartition spatiale annuelle des apports par sous-bassins.

L'exemple de la Somme a conduit à se poser la question de la probabilité de situations analogues ailleurs en France. Une cartographie prospective sur l'ensemble des bassins sédimentaires a été entreprise à la demande et avec le concours de la DPPR du MEDD. Une

méthode d'approche SIG fondée sur le croisement de paramètres directs et indirects a été forgée, soumise à un comité de pilotage ad hoc, validée puis mise en oeuvre depuis 2002. Cette méthode croise les paramètres géologiques et hydrogéologiques de surface (infiltrabilité), les caractéristiques morphologiques et les conditions de fonctionnement hydraulique des nappes (profondeur, battement, à partir des données historiques mesurées ou reconstituées).

A ce jour la France sédimentaire est couverte à l'échelle du 1/100 000. Vingt départements ont été traités et validés (2003), les autres départements ont été traités et sont en cours de validation par les DIREN (achèvement fin 2004). Le résultat en l'état est disponible sous la forme d'un CD rom comportant le SIG dans son ensemble ainsi qu'un outil de navigation qui permet de sélectionner toutes zones d'intérêt, réaliser différents types de cartes, exporter ces cartes sous forme numérique.

A l'échelle d'un bassin l'information fournie par cet « atlas des zones sensibles aux remontées de nappes » permet désormais de fixer des priorités d'investigations et d'action sur les zones où, plus qu'ailleurs, les remontées de nappes peuvent contribuer, avec les écoulements de surface, au phénomène de crue.

SESSION 5

La Craie

Projet Craie. Corrélation stratigraphique et diagénèse de la craie. Bassin de Paris. Applications hydrogéologiques.

Franck Hanot

BRGM service CDG Avenue Claude Guillemin 45060 ORLEANS cedex 2 f.hanot@brgm.fr

I. L'OBJET CRAIE

La craie du Bassin de Paris couvre un quart du territoire national. Son épaisseur qui atteint 700 m d'épaisseur dans la région de Provins montre des variations brutales en particulier à proximité des accidents majeures (faille du Bray, faille de la Seine). L'interprétation de ces variations en particulier sous couverture tertiaire reste à faire par un découpage fin dans le but de dissocier la part érosive et la part synsédimentaire.

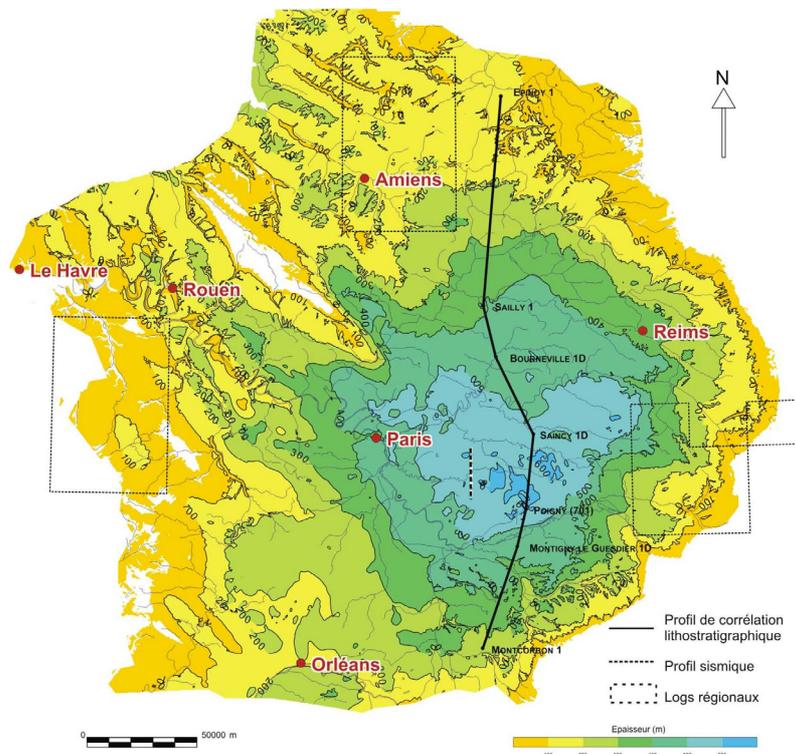


Figure 1 - Carte des isopaches du Séno-Turonien à l'échelle du bassin (sous couverture Tertiaire et à l'affleurement)

II. LES DONNEES DISPONIBLES

La Craie est reconnue par de nombreux travaux maintenant accessibles :

- les cartes géologiques au 1/50 000 la décrivent dans sa partie affleurante. Leurs levés s'échelonnent sur 40 ans et montrent une hétérogénéité importante :

en terme de datation (premières datations établies sur la base de la macrofaune, datation plus récente établie par Monciardini sur la base de la microfaune),

en terme de représentation avec la cartographie des formations superficielles (argiles à silex, limons des plateaux) qui apparaissent prédominantes sur certaines zones.

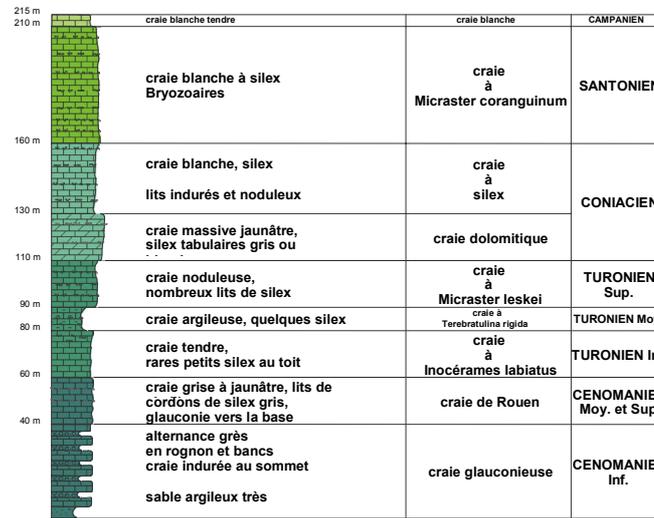


Figure 2 - Log synthétique établi à partir des notices des cartes géologiques au 1/50 000 sur les régions Normandie-Perche

- les forages d'origine pétrolière pour la plupart diagradiés (sonic, résistivité, gamma ray) mais dont les descriptions lithologiques restent pauvres et les datations inexistantes. Ces forages étalonnés sur la base des informations fournies par les forages scientifiques (les forages scientifiques carottés de la Grande Paroisse en 1965 et du programme Craie 700 en 1999) et de coupes de référence font l'objet d'une interprétation lithologique et biostratigraphique.

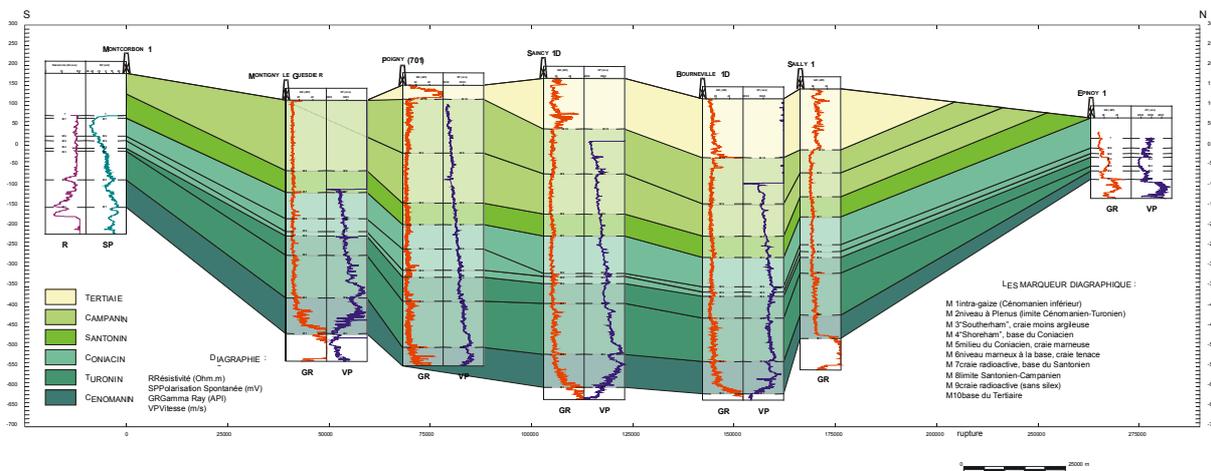


Figure 3 - Corrélation de diagradiés enregistrés sur des forages pétroliers selon un transect Nord-Sud dans le Bassin de Paris

- les profils sismiques d'origine pétrolière éclairent de façon satisfaisante la Craie et montrent des réflecteurs continus et identifiables au travers du bassin. La densité la plus forte se situe dans la zone centrale (sous couverture tertiaire). Leur accessibilité est limitée et nécessite un retraitement.

III. LA DIAGENESE DE LA CRAIE

La craie a fait l'objet d'une diagénèse précoce contemporaine de la sédimentation. Plus récemment, sous couverture tertiaire des phénomènes profonds de recristallisation (dolomie et calcite) ont été identifiés sur de fortes épaisseurs (jusqu'à 400 mètres). Cette diagénèse polyphasée perturbe largement la lithologie d'origine, et donc les caractéristiques pétrophysiques enregistrées par les diagraphies ou la sismique.

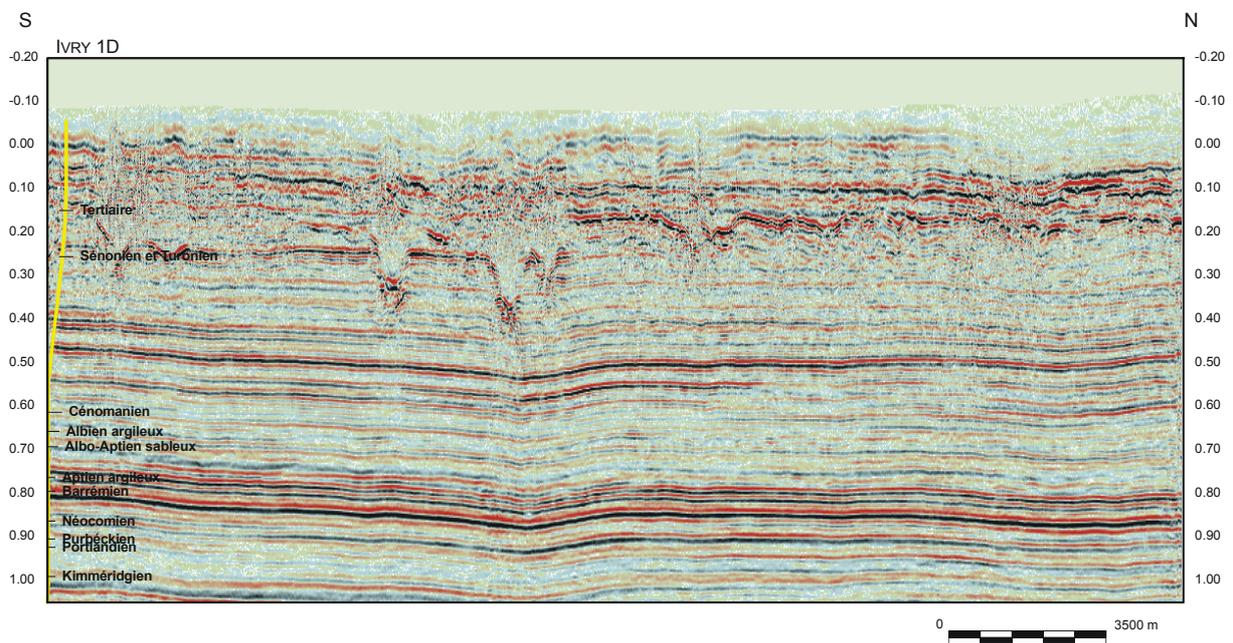


Figure 4 - Profil sismique haute résolution enregistré en Brie et montrant les phénomènes de diagénèse dans la craie

La compréhension de ces deux thèmes a de multiples applications en terme :

- d'hydrogéologie : la porosité interstitielle représentant une réserve exploitable importante à la faveur de fractures (meilleure connaissance du réservoir : c'est l'aquifère stratégique du Bassin Parisien) ;
- de risque : relations karst/cavités avec la lithologie et la fracturation ;
- de recherche pétrolière afin de mieux appréhender les corrections statiques et la dynamique intra et fini-crétacée contemporaine des migrations d'hydrocarbures ;
- d'évolution continentale (géomorphologie, altération) d'une plate-forme carbonatée exondée (histoire cénozoïque).

IV. APPLICATIONS HYDROGEOLOGIQUES

L'intégration des données disponibles permet d'aborder les potentialités de la Craie en particulier sous couverture tertiaire. Une étude à l'aplomb du synclinal de l'Eure a permis en intégrant :

- les forages validés dans le cadre du référentiel géologique
- les cartes géologiques vectorisées et harmonisées
- les profils sismiques disponibles
- les profils électriques enregistrés spécifiquement

de mettre en évidence une zone de flexure accompagnée de fractures d'extrados.

Le forage implanté à la suite de cette étude a été fructueux

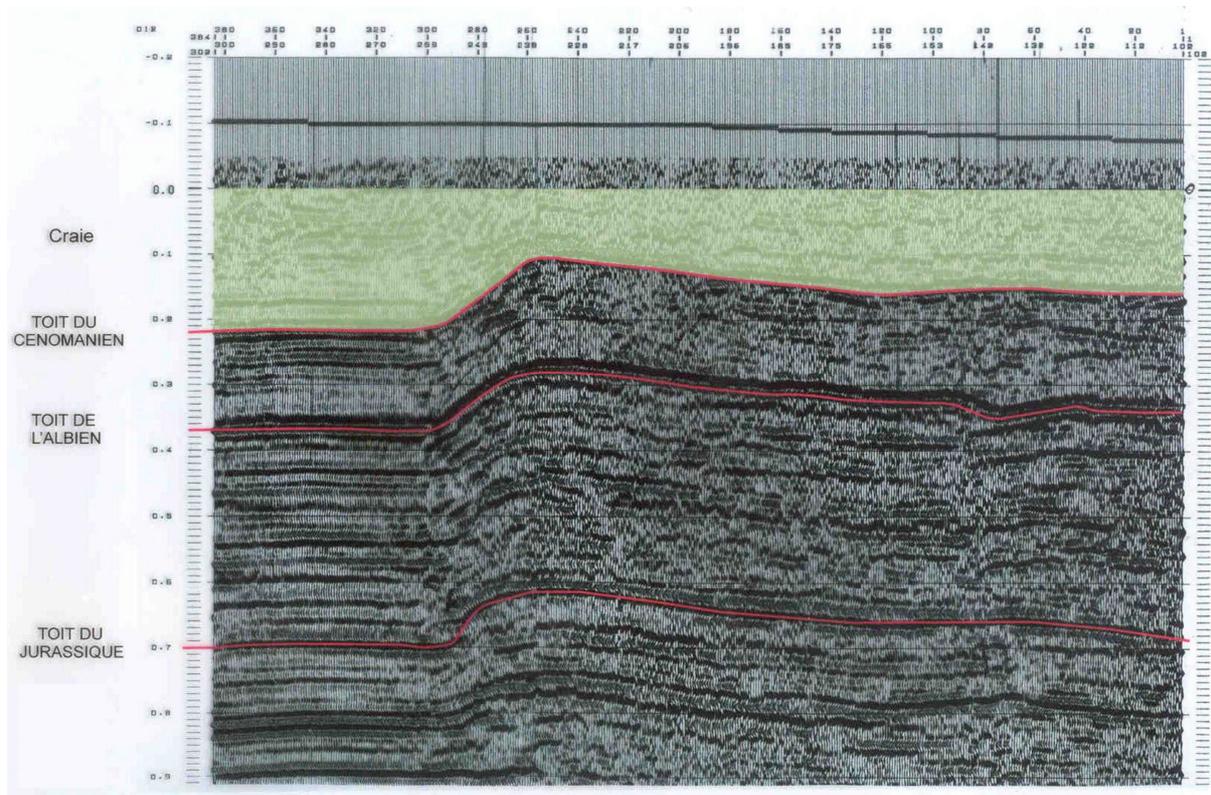


Figure 5 - Profil sismique enregistré dans la région de Mantes-la-Jolie, illustrant la structuration de la craie

D'autres applications dans la couverture tertiaire à l'aplomb des zones de dissolution dans la Craie sont présentées.

L'alimentation en eau de Paris

Jean-Michel Barbier

SAGEP Directeur Général Délégué Société Anonyme de Gestion des Eaux de Paris

barbier@sagep.fr

Ce bref exposé vise simplement à présenter aux hydrogéologues réunis en colloque à Paris, l'alimentation en eau de la capitale.

I. ORGANISATION DE L'EAU A PARIS

De nombreux acteurs interviennent dans le service public de l'eau à Paris :

- La Mairie de Paris est responsable de l'organisation du service public de l'eau, service qu'elle a délégué pour ce qui concerne l'eau potable,
- La SAGEP, Société d'Economie Mixte de la Ville de Paris, produit l'eau potable, la transporte. Elle coordonne la distribution, fait circuler l'eau dans les canalisations. Elle est responsable de la qualité de l'eau jusqu'au robinet du consommateur,
- Eau & Force-Parisienne des Eaux, filiale de la Lyonnaise des Eaux, assure la distribution sur la Rive Gauche,
- La Compagnie des Eaux de Paris, filiale de la Générale des Eaux, assure la distribution sur la Rive Droite,
- Le service d'Assainissement de Paris (SAP), service en régie directe, collecte les eaux usées dans Paris,
- Le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne est chargé du transfert et de l'épuration des eaux usées,
- Le Centre de Recherche, d'Expertises et de Contrôle des eaux de Paris est une régie autonome, qui assure les analyses de contrôle sanitaire, pour le compte de la DASS et de la Ville de Paris,
- L'Agence de l'Eau Seine-Normandie, intervient tout au long du cycle de l'eau, en prélevant des redevances et en aidant à la réalisation des projets avec des prêts ou des subventions,
- L'Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs a construit et gère les retenues en amont de la Seine, de l'Aube et de la Marne. Ces « lacs » permettent l'écrêtement des crues et le soutien des étiages.

II. LE SYSTEME D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE

La sécurité d'alimentation de Paris est fondée sur la diversité de ses ressources. La production est assurée pour moitié à partir de captages d'eaux souterraines situés dans un rayon de 150 km autour de Paris, et pour l'autre moitié à partir d'eaux de rivières traitées dans les usines d'Orly et d'Ivry sur la Seine, et de Joinville sur la Marne.

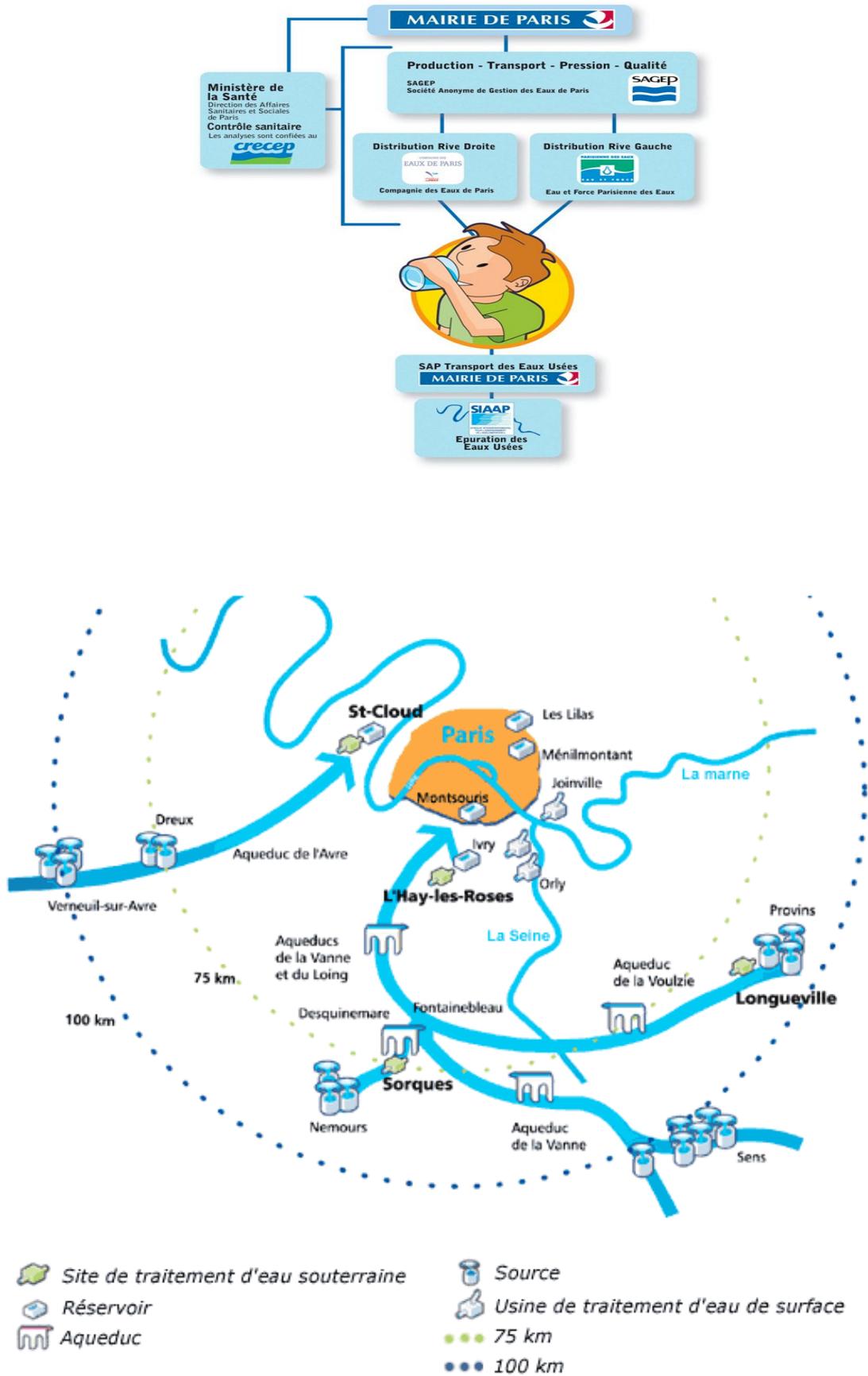


Figure 1 - Schéma d'alimentation en eau de Paris

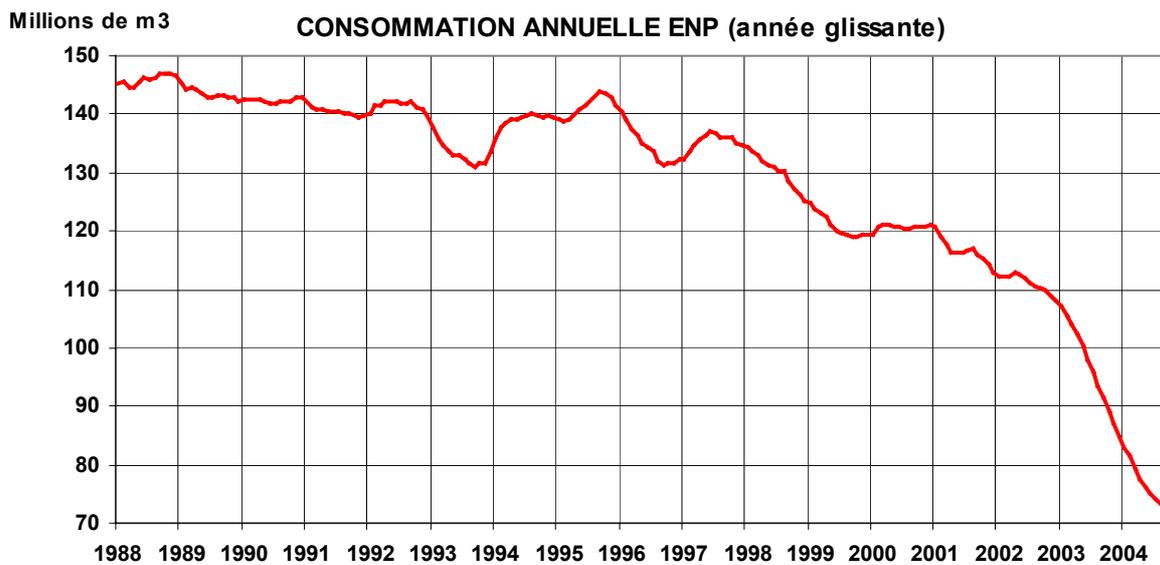


Figure 3 - Graphique consommation annuelle eau non potable

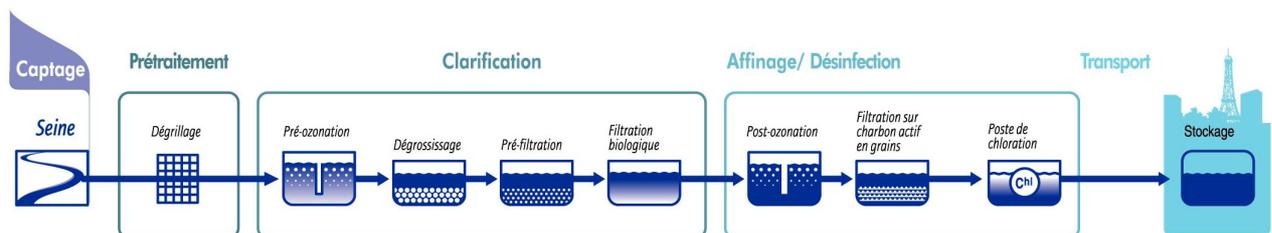


Figure 4 - Filière de traitement d'Ivry

La qualité des eaux superficielles s'est globalement améliorée. Les pollutions accidentelles sont détectées. Leur nombre a diminué.

Par contre, d'une part les normes de qualité ont été durcies, d'autre part les méthodes analytiques ont été perfectionnées : la détection des produits chimiques présents dans l'eau est passée du microgramme par litre (10^{-9}) au nanogramme (10^{-12}) et l'on trouve ainsi dans les eaux brutes de la Seine des traces de nombreux médicaments.

VI. LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES

La protection des eaux souterraines est un axe essentiel de la politique de la SAGEP. Ce sujet ne sera pas développé ici, puisqu'il sera traité par Gilbert Fournol.

Cette politique de protection s'appuie notamment sur la surveillance et la connaissance du milieu, l'achat de terrains, le dialogue avec le monde agricole et des actions ponctuelles (mise en place de bandes enherbées, travaux sur des ruisseaux ou les bétoures).

Pour se permettre de sensibiliser d'autres acteurs à la protection de l'environnement, la SAGEP s'efforce d'avoir une politique exemplaire en cette matière : elle est certifiée Iso 9001 et Iso 14000.

Pour respecter les limites de qualité de 50 mg/l sur les nitrates, ou de 0,1µg/l pour les pesticides, la SAGEP a été contrainte de choisir ses ressources souterraines les moins polluées en restreignant sa production, ou en assurant la dilution des nitrates par des mélanges. Elle a finalement été conduite à traiter ses eaux souterraines. Ces unités de traitement élimineront les pesticides, non les nitrates, par absorption sur du charbon actif.

Pour les nitrates, on espère que les actions de prévention finiront par porter leurs fruits ... Les usines de traitement de Longueville (près de Provins) et de Sorques (près de Fontainebleau) fonctionneront avant fin 2004. Les deux autres seront réalisées avant 2007, arrivées des aqueducs à Paris, l'une à Saint Cloud, l'autre à l'Hay les Roses.

VII. EAU DE L'ALBIEN

La nappe de l'Albien constitue une réserve d'eau 500 à 800 m sous Paris, protégée des pollutions et pure sur le plan microbiologique.

La SAGEP a réhabilité ou construit 5 puits à l'Albien, qui sont répartis dans Paris et dont 3 alimentent des fontaines publiques.

Ces puits ne sont pas connectés au réseau, et leur production est dérisoire par rapport à la consommation normale des Parisiens. Ils peuvent être exploités comme ultime secours dans une situation de crise extrême.

VIII. POUR CONCLURE, LA SAGEP EN CHIFFRES ET EN RESUME

- 600 personnes dont 100 cadres
- 127 M€ de chiffres d'affaires (mais 20 % seulement du tarif de l'eau lui reviennent)
- Des installations d'une valeur de 4 milliards d'euros
- 245 Mm³ d'eau potable produits en 2003
- 1500 ha de terrains, destinés à la protection de la ressource en eau.

La SAGEP s'efforce de promouvoir le développement soutenable.

Elle a pris les engagements suivants, fondements de ce concept :

- un engagements économique, celui d'une gestion rigoureuse, transparente et prévoyante,
- un engagement pour l'environnement ; celui de préserver les ressources en eau et de réduire les impacts de ses activités
- un engagement social ; celui du progrès, de l'équité et de la solidarité à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise.

LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES

Gilbert Fournol

SAGEP (Société Anonyme de Gestion des Eaux de Paris). fournol@sagep.fr

I. L'ALIMENTATION DE PARIS EN EAU POTABLE : LES ENJEUX

Paris bénéficie depuis la fin du 19^{ème} siècle d'une double alimentation en eau potable assurée pour partie par un ensemble de captages de sources, et pour l'autre par des prélèvements d'eau en Marne et Seine juste en amont de Paris, prélèvements assortis d'un traitement de potabilisation. Ce double approvisionnement qui avoisine actuellement les 650.000 m³ par jour en moyenne, constitue un gage de sécurité qu'il convient de pérenniser.

La SAGEP, en application du contrat de concession qui la lie à la Ville de Paris, s'est fixée pour objectif de privilégier le recours aux eaux souterraines en se donnant pour cible un minimum de 50 % pour celles-ci.

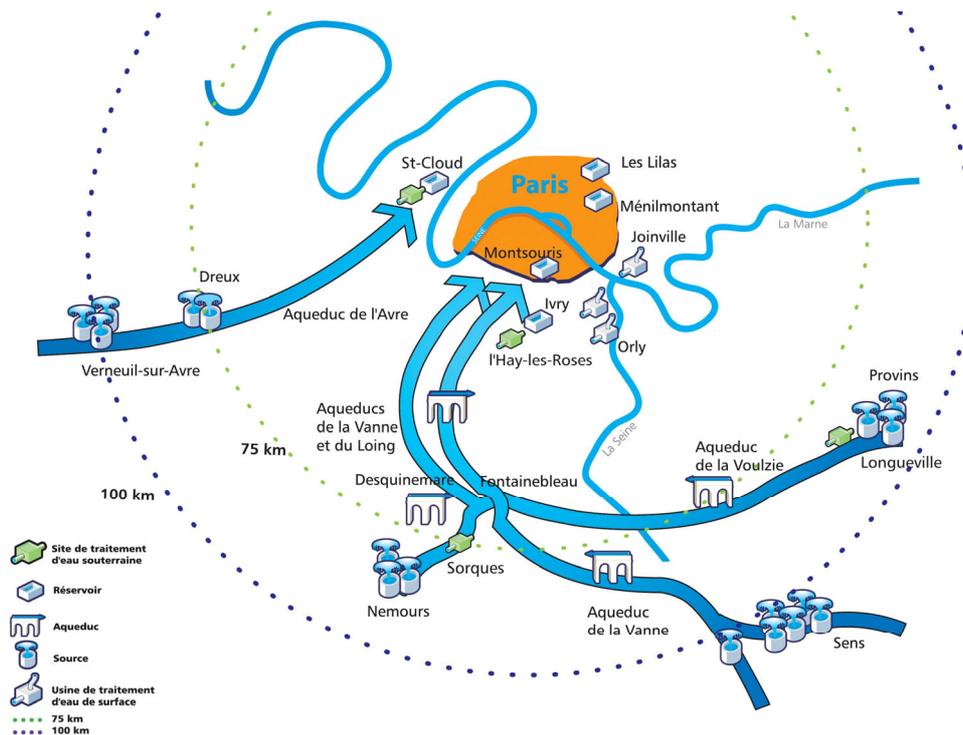


Schéma d'alimentation en eau potable de Paris

Cependant, devant l'augmentation des teneurs en nitrates et atrazine, puis dernièrement, suite au nouveau code de la santé, en particulier aux articles R 1321-1 à 64 fixant pour l'eau potable des critères de qualité plus sévères, il est devenu indispensable de réaliser le

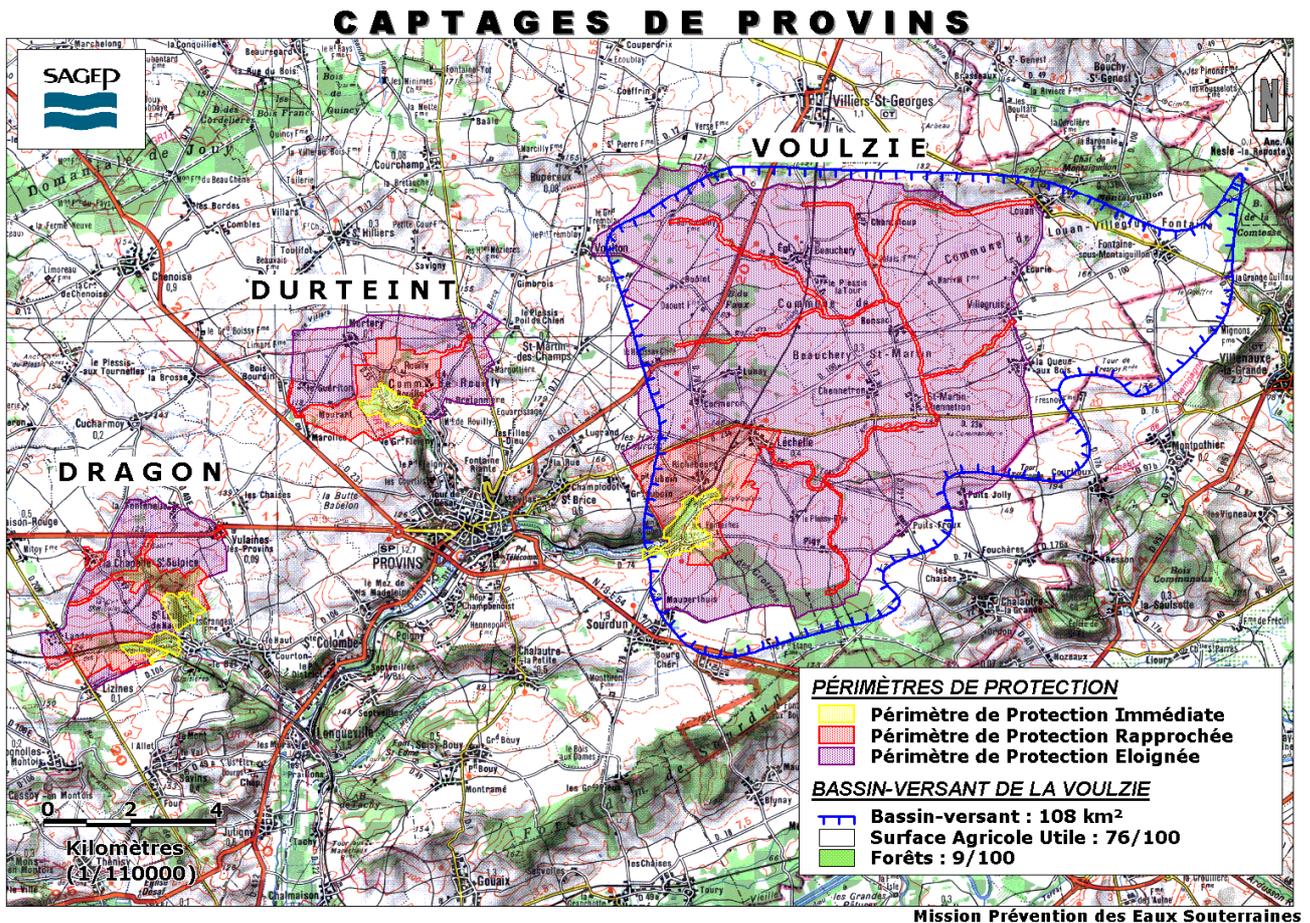
traitement partiel des eaux souterraines, pour une partie de celles-ci, et de renforcer les actions visant à reconquérir la qualité de ces eaux.

Selon les opportunités locales, la SAGEP a engagé depuis plus de 10 ans, un certain nombre d'actions et de réalisations, les unes ayant trait à des modifications de pratiques agricoles, les autres à des acquisitions foncières assorties d'un contrat de mise à disposition. Enfin, un certain nombre de travaux sur des points singuliers ont été et sont réalisés en particulier sur des bétouilles, des zones d'engouffrement ainsi que sur des petits cours d'eau au lit perméable.

Pour illustrer cela, deux actions sont présentées dans la suite du texte, l'une concerne le bassin versant de la Voulzie, l'autre les acquisitions foncières.

D'une manière générale, ces actions ont été engagées avec la participation active du monde agricole, comme celles de la Voulzie et du Dragon, et pour d'autres, avec l'accord de l'exploitant agricole ou du propriétaire (acquisitions foncières, travaux sur les rus et bétouilles).

II. LE BASSIN VERSANT DE LA VOULZIE (SEINE ET MARNE) : UNE ACTION EN PARTENARIAT POUR LA RECONQUETE DE LA QUALITE



Ces captages participent à hauteur de 10 % à la production globale d'eau souterraine avec un débit moyen avoisinant les 750 l /s. Ces sources présentent l'avantage et l'inconvénient d'avoir une forte inertie. Afin d'appréhender le fonctionnement de la nappe alimentant ces captages, deux études ont été confiées à Claude MEGNIEN, en 1996 et 1997, qui ont permis d'établir la cinétique de cette nappe vis à vis de la pollution par les nitrates.

Ce gîte aquifère dont sont issues les sources sont les calcaires de Champigny (Champigny, Saint Ouen, Lutétien) constitués de gros bancs, traversés par des réseaux karstiques (perméabilité en grand, dolines, gouffres, pertes le long de rus à écoulement intermittent).

L'alimentation de cette nappe s'effectue à partir d'infiltrations directes du plateau lorsque le calcaire est affleurant et d'une manière très faible par des infiltrations dans le lit des rus temporaires. Ces infiltrations, bien que faibles en quantité, ont une incidence importante sur la qualité, notamment sur la turbidité et la microbiologie.

La vulnérabilité de la nappe est donc essentiellement fonction de la nature et de l'épaisseur de la couverture recouvrant les calcaires de Champigny (sable tertiaire et quaternaire, marnes vertes du Sanoisien, les colluvions de fond de ru), ce qui détermine par ailleurs le temps de transit de l'eau et ses conséquences sur la qualité, à l'émergence de la source.

II.2 Occupation et Usage des Sols

Le bassin versant de ces sources d'une superficie d'environ 108 km² est essentiellement agricole avec un potentiel agronomique globalement élevé. On y trouve quelques bourgs et villages (au nombre de sept), ainsi que des fermes isolées totalisant une population de 1.800 personnes, des zones boisées en régression sur 10 km² soit 9 % du territoire, et des surfaces à usage agricole sur 76 km² soit 76 % du bassin. L'itinéraire technique de ces cultures est mené d'une manière intensive avec comme production dominante, les céréales, répartie en 40 % de cultures d'hiver et 60 % de cultures de printemps.

L'activité agricole déployée sur ce territoire a eu pour conséquence son classement en zone vulnérable, comme la totalité du département de Seine et Marne (arrêté préfectoral du 2 juillet 1997).

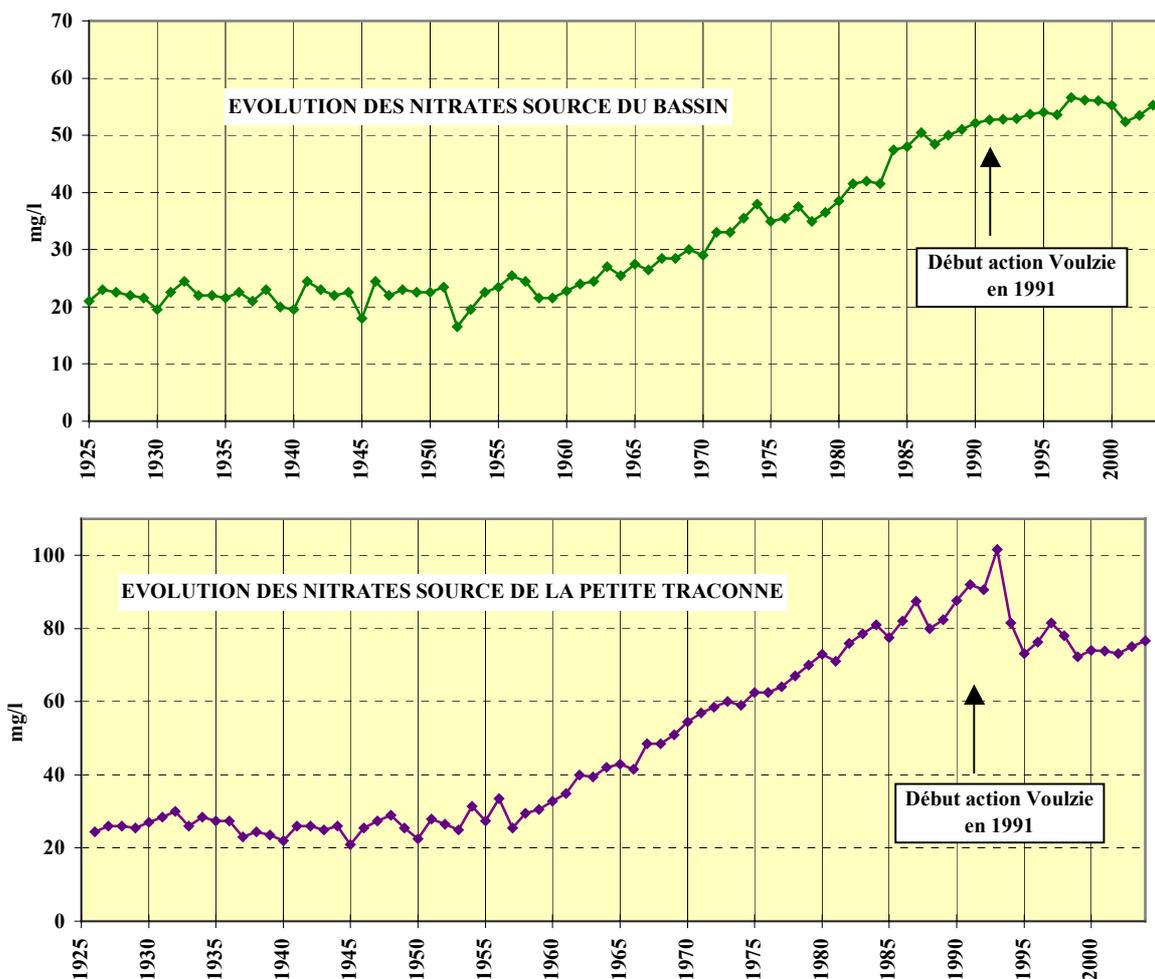
II.3 Action FERTI-MIEUX : Résultats Obtenus

Devant cette progression des nitrates mesurée aux captages, la SAGEP a sollicité le concours de la Chambre d'Agriculture en 1991 afin d'enrayer cette hausse et revenir en dessous du seuil des 50 mg/l.

Une action s'est mise ainsi en place qui a intégré rapidement près de 35 agriculteurs sur un réseau de parcelles de référence, sur les 70 que compte le bassin. Cette action qui a reçu et conservé le label "FERTI-MIEUX" jusqu'à son terme, a permis d'enrayer un certain nombre d'avancées comme :

- La prise de conscience de l'entité "Bassin Versant",
- La sensibilisation vis à vis de la ressource eau et l'objectif de reconquête de la qualité,
- L'application de la méthode des bilans avec prise en compte du reliquat sortie hiver (RSH),
- Le fractionnement de la fertilisation sur blé (3 apports),
- L'expérimentation de la technique CIPAN (culture piège à nitrates).

Cette action, après des débuts encourageants, a cependant après 10 années d'existence montré ses limites. Cela s'est traduit au niveau des teneurs en nitrates mesurées dans le sol en entrée hiver, par une stabilisation de ces teneurs, aux aléas climatiques près, voire par une diminution de la teneur en nitrates sur les captage de la Petite Traconne (source non exploitée).



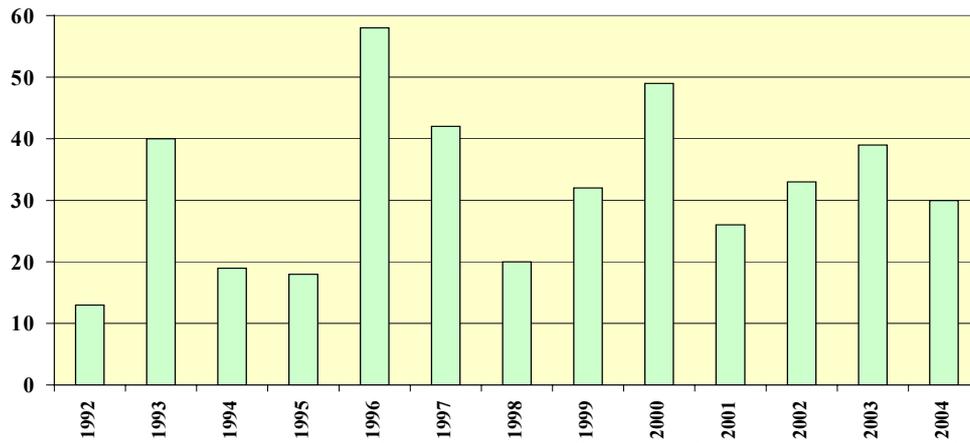
II. 4 Analyse de l'Action et de son Contexte

Au vu des résultats obtenus et de leur évolution tant sur la qualité des eaux mesurée aux sources que sur les teneurs en nitrates mesurées dans les sols, il est apparu que l'action marquait le pas, et que les objectifs de qualité n'étaient pas atteints (40 kg N/ha sur les 3 horizons en Reliquat Entrée Hiver - REH - en première étape, puis 22 kg N/ha ensuite).

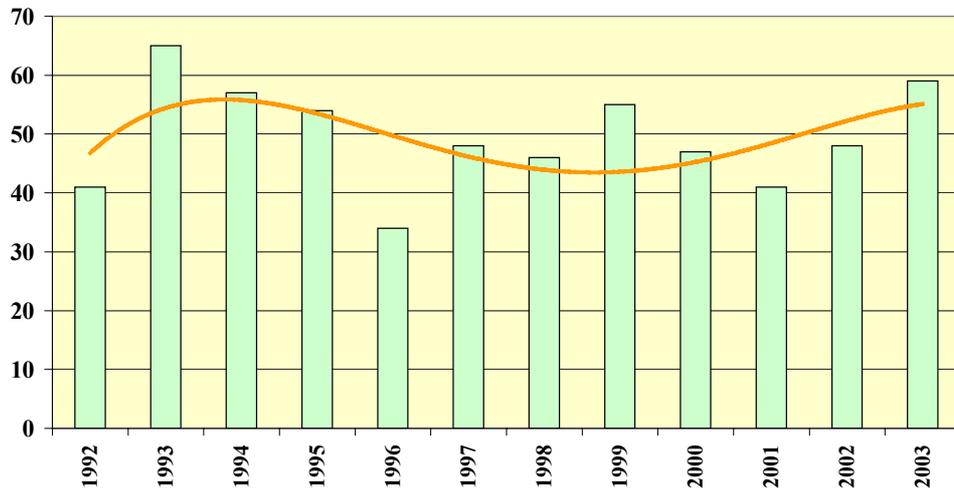
Devant la volonté marquée par chacun de ne pas stopper cette action, il convenait, au préalable à toute décision, d'en réaliser une analyse afin de dégager ses points forts et ses faiblesses.

Aussi, une étude diagnostic a été lancée pour permettre de réactiver avec les meilleures chances de succès cette démarche agri-environnementale.

Une analyse de la situation agricole du bassin a été entreprise tant sur les aspects techniques, humains que socio-économiques. Elle devra permettre à l'issue de cette étude d'identifier les opportunités et les modalités d'intervention aussi bien techniques que financières, base d'une nouvelle stratégie d'action. Dès à présent, la première étape de l'étude a mis en lumière un certain nombre de facteurs positifs et d'autres plus contraignants qui devront être solutionnés.



Reliquats Azote – NO₃. Post Récolte RPR en kg/ha sur 3 horizons, moyenne du réseau



Reliquats Azote – NO₃- Entrée Hiver REH en kg/ha sur les 3 horizons

III. DES ACQUISITIONS FONCIERES : POUR QUELLE DESTINATION ?

Parmi l'ensemble des mesures aptes à contribuer à l'amélioration de la qualité des eaux souterraines, l'acquisition reste toujours une des composantes. En effet, dans certaines situations hydrogéologiques sensibles, la maîtrise foncière est la seule alternative pour assurer d'une manière durable et assurée la protection d'une zone ou d'un point reconnu comme vulnérable.

Il en est ainsi des zones d'engouffrement telles les bétouilles ou les dolines. Pour compléter la mesure, des aménagements doivent être réalisés comme par exemple l'implantation de végétaux sélectionnés pour leur rôle de rétention et d'épuration, la mise en place d'un massif filtrant, l'imperméabilisation du site ou si nécessaire la déviation du flux pollué.

Ces acquisitions doivent, pour remplir leur objectif intéresser des secteurs reconnus comme vulnérables vis à vis du captage. Cette connaissance ne peut s'établir qu'à partir d'études et de suivis hydrogéologiques sur une longue période prenant en compte une série importante et bien ciblée de données.

Nous devons à Claude MEGNIEN d'avoir contribué à cette connaissance au travers de sa thèse sur l'aquifère de la craie dans la région de Sens établie en 1976 et par une étude réalisée en 1998 sur les sources dites « basses » situées dans la vallée de la Vanne.

C'est à partir notamment de ces études que le positionnement des surfaces acquises a pu s'établir. A ce jour, l'ensemble de ces acquisitions approche les 240 ha.

- **Une affectation pour un usage agricole adapté et contractualisé**

Certaines surfaces, en relation moins franche avec la nappe ont fait l'objet d'une acquisition concertée, en adoptant pour principe de concilier l'usage agricole du sol avec une démarche de protection de l'eau par l'application d'une convention établie à cet effet.

Ainsi aux 822 ha que constituent les périmètres de protection immédiate des captages (en toute propriété Ville de Paris), se sont ajoutés 240 ha de protection supplémentaire situés en périmètre rapproché des captages, sur lesquels s'exerce une activité agricole adaptée à l'objectif de protection des eaux. Ces terrains se situent principalement en bordure de rivière ou de plan d'eau (ancienne sablière), en fond de vallée, dans des zones humides qu'il convient de conserver en raison de leur rôle épurateur, ou bien encore dans des vallées sèches au sol particulièrement perméable.



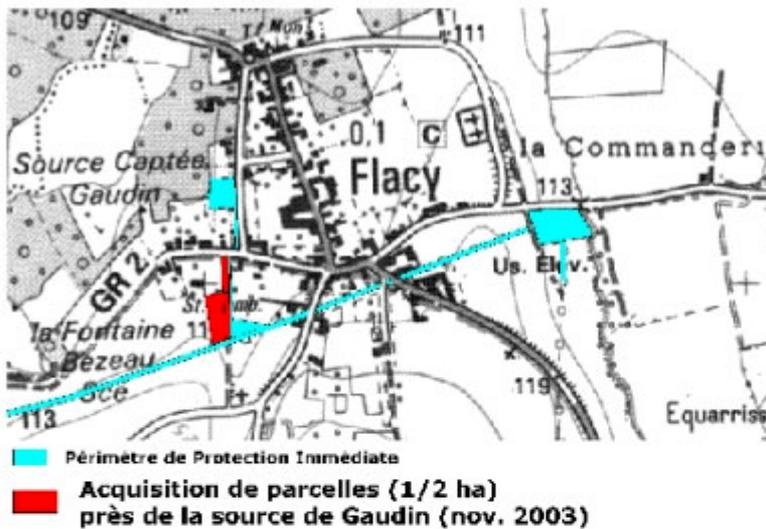
Aménagement écologique aux abords d'un champ captant, restructuration des berges.

Dans ce dernier cas, une mise en herbe partielle ou totale des surfaces s'est imposée et une mise en place de haies et de bosquets est en projet sur certains secteurs particulièrement exposés.

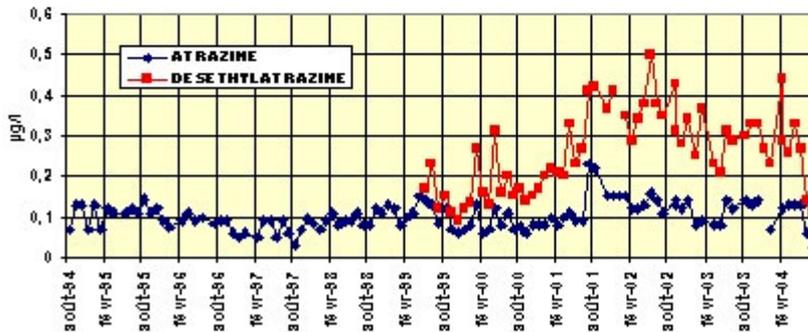


Mise en place de bandes enherbées en fond de vallée sèche

Pour certaines acquisitions, l'effet constaté s'est révélé très rapidement bénéfique à notre grande surprise. Nous avons vu ainsi baisser notablement les teneurs en triazines sur les sources de Gaudin, suite à une mise en herbe de parcelles anciennement cultivées en maïs.



EFFETS



Evolution des teneurs en triazine sur la source de GAUDIN

- **Un contrat qui réponde à nos objectifs**

Le bail rural ne permettant pas d'assurer l'atteinte des objectifs recherchés en raison d'une prise en compte insuffisante des préoccupations environnementales dans ce type de contrat, et la SAGEP, ne souhaitant pas exclure un usage agricole sur ses parcelles, il a été retenu une autre forme de contractualisation : le « *prêt à usage* ».

Celui ci permet d'apporter un degré de souplesse suffisant, pour pouvoir modifier si de besoin les dispositions agricoles adoptées, tout en préservant les intérêts des deux parties. Cette forme de contrat se trouve maintenant confortée par la nouvelle loi n°2004-806 du 9 août 2004 relative à la politique de santé publique (art 59-I). Cette loi modifie l'article L.1321-2 du Code de la Santé en ouvrant la possibilité, pour des terrains acquis par la collectivité dans le périmètre de protection du captage, de fixer des prescriptions sur l'usage du sol en vue de préserver la qualité de la ressource en eau.

SESSION 6

**Eocène supérieur.
Oligocène inférieur.**

La nappe des calcaires de Champigny, une ressource sous haute surveillance

Anne Reynaud

AQUI' Brie Association de la nappe des calcaires de Champigny en Brie
66 rue de Belle Ombre, 77000 MELUN areynaud@cg77.fr

I. UNE NAPPE SOLLICITEE ET DEGRADEE

La nappe des calcaires de Champigny, dont il va être question ici, représente la moitié de la masse d'eau 3103 « Calcaires de Champigny » au sens de la directive cadre européenne, laquelle s'étend au Nord-Est jusqu'à la vallée de la Marne. Si certaines limites de notre territoire de compétence répondent à des critères hydrogéologiques (critères d'homogénéité de faciès au Nord ou de limites de bassin versant au Sud-Est et Sud-Ouest) d'autres sont politiques (frontière orientale de la région Ile de France).

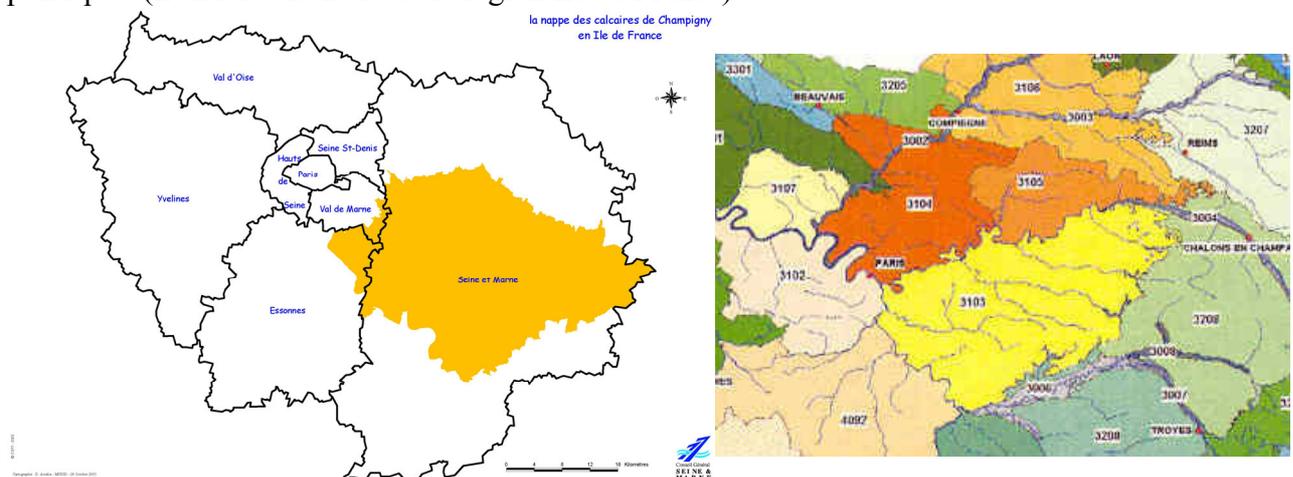


Figure 1 – Territoire de compétence d'AQUI' Brie (sur la figure de gauche) et masse d'eau 3103 des calcaires de Champigny (sur la figure de droite, [1])

Ce territoire correspond au plateau briard seine-et-marnais, soit 223 communes regroupant 800 000 habitants, répartis sur 2 600 km². L'activité agricole couvre 60% du territoire, avec une culture intensive de céréales, betteraves, oléagineux, sur des sols fréquemment drainés.

I.1. Particularités de la recharge de la nappe

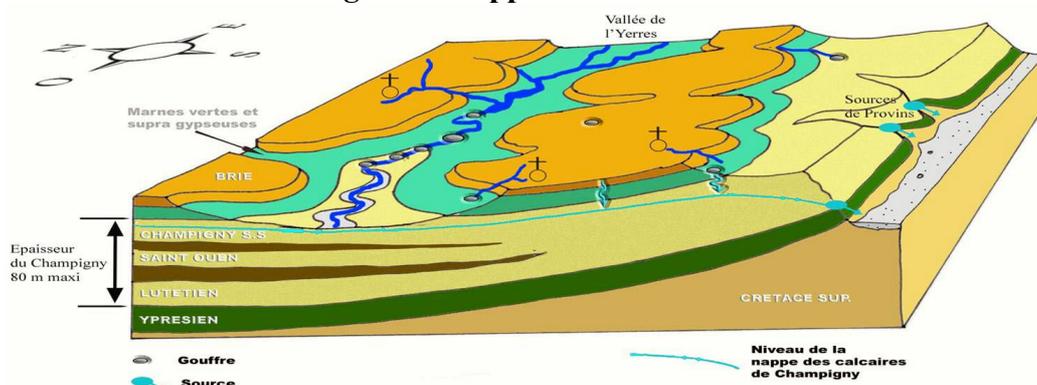


Figure 2 – Structure et recharge de la nappe des calcaires de Champigny (échelle verticale dilatée)

Les calcaires de Champigny font partie des remplissages les plus récents (env. 40 millions d'années) au coeur du bassin parisien. De bas en haut, on distingue : la craie d'âge crétacé, les argiles et sables de l'Yprésien, les marnes et caillasses du Lutétien, les sables de Beauchamp, les calcaires de Saint-Ouen, les marnes infra gypseuses (ou marnes infra-ludiennes), les calcaires de Champigny *sensu stricto*, les marnes vertes et supra gypseuses, le calcaire de Brie d'âge oligocène et parfois des buttes témoins de sables de Fontainebleau. Sur les zones de plateau, les calcaires de Brie ont été conservés. Dans les vallées de la Brie, les marnes vertes et supra gypseuses, voire les calcaires de Champigny affleurent directement.

Le millefeuille de la nappe des calcaires de Champigny est limité à sa base par les argiles de l'Yprésien, à son sommet par les marnes vertes et supra gypseuses. Un millefeuille imparfait dont les niveaux intermédiaires argileux disparaissent sur les bordures. Les $\frac{3}{4}$ de la recharge de la nappe s'effectuent par infiltration directe, et rapide dans les secteurs où les calcaires de Champigny affleurent ou sont peu profonds, et par le biais des gouffres qui poinçonnent les marnes vertes et supragypseuses. Une petite part de la recharge s'effectue par drainance verticale depuis la nappe des calcaires de Brie au travers des marnes. La partie septentrionale de la nappe est drainée vers le Nord-Est dans la vallée de l'Aubetin, la partie centrale s'écoule vers l'Ouest en direction de la basse vallée de l'Yerres et de la fosse de Melun. Enfin, la partie orientale est drainée vers les sources de Provins, au Sud-Est.

On a progressivement abandonné pour l'AEP la nappe des calcaires de Brie pour celle du Champigny, que l'on pensait alors bien protégée par les marnes vertes et supra-gypseuses. Par quel mystère une ressource que les hydrogéologues s'accordaient à définir comme « bien protégée » dans leur rapport de définition des périmètres de protection, il y a 30 ans, s'est-elle dégradée ? Le bilan réalisé par le BRGM et le BURGEAP [2] dans les années 1970 a montré que la recharge annuelle de la nappe des calcaires de Champigny représente 8% des réserves totales de l'aquifère. Chaque année, c'est 8 % de la masse totale d'eau qui est renouvelée, avec une eau de médiocre qualité. A long terme, on observe une dégradation lente mais inéluctable de la ressource. Les phénomènes d'adsorption et de désorption par les sols jouent également un rôle dans la rétention des molécules phytosanitaires. Parce que les relations entre les eaux de surface et souterraines sont importantes, la mauvaise qualité des eaux de surface a fini par se répercuter sur la qualité des eaux souterraines. En 2001, un tiers des captages seine-et-marnais présentaient des concentrations en triazines supérieures à 0,5 µg/l.

I. 2 Un enjeu AEP régional

La nappe des calcaires de Champigny est pourtant l'une des principales ressources en eau souterraine d'Ile de France. Elle alimente en eau potable environ un million de franciliens dont 480 000 seine-et-marnais. Les sources du bassin de Provins, exploitées par la SAGEP, approvisionnent notamment les parisiens via l'aqueduc de la Vanne. Sur la base des fichiers de prélèvements de l'Agence de l'eau Seine-Normandie, nous estimons pour l'année 2001 les prélèvements de l'ordre de 230 000 m³/jour, (soit 84 Mm³/an), dont 88% pour l'AEP, 10% pour l'industrie et 2 % pour l'agriculture (les sols, souvent drainés pour assainir des terrains marécageux, sont peu irrigués, en comparaison avec la Beauce). Cet enjeu eau potable explique la forte implication régionale des acteurs.

Le constat de la détérioration de la qualité de la nappe (d'abord en nitrates) et la baisse de son niveau suite à la sécheresse des années 92-93 ont conduit, sous l'égide de la région Ile De France et de l'Agence de l'Eau Seine Normandie, à la réalisation d'un état des lieux de la nappe et à la constitution d'un Comité des Usagers et d'un comité technique pour cerner les attentes des acteurs et élaborer une stratégie d'actions. Par sa connaissance approfondie de la nappe, Claude Mégnien faisait partie de ce comité technique et a collaboré à la réalisation de l'état des lieux [3]. En 1997, un contrat de nappe est signé par l'Agence de l'Eau Seine-

Normandie, la région Ile de France et le département de Seine-et-Marne. Plusieurs axes d'orientation des actions sont préconisés :

- * l'amélioration de la connaissance, en renforçant la surveillance de la qualité et du niveau piézométrique de la nappe, en dressant un inventaire des zones drainées, des modes de rejet, des zones d'infiltration et des prélèvements.
- * le lancement d'actions de prévention : protection des captages, démarche qualité en terme de forage, maîtrise des pollutions d'origine agricole, économie d'eau, traitement des rejets d'eau usées, aménagements hydrauliques.
- * la réalisation d'une modélisation mathématique, outil de gestion de la nappe.

I. 3 AQUI' Brie part à la reconquête de la qualité de la nappe des calcaires de Champigny

Lieu utile de concertation et de réflexion, le comité des usagers manquait néanmoins de moyens d'action et de légitimité. En 2001, l'association AQUI' Brie est née de ce constat, et de la volonté de reconquérir la qualité de la nappe. Ayant les même enjeux que le contrat de nappe, mais dotée de moyens humains et financiers, elle peut porter la maîtrise d'ouvrage d'actions de connaissance du fonctionnement de l'aquifère ainsi que celle d'actions de prévention de la pollution de la nappe. L'Assemblée Générale de l'association regroupe entre autres :

- * Les services de l'Etat (préfet de Seine-et-Marne, DDA77, DDASS 77, DDE, DIREN, DRIAF)
- * L'Agence de l'Eau Seine-Normandie
- * La région Ile-de-France et le département de Seine-et-Marne
- * L'Union des Maires 77
- * Les gestionnaires des services de l'eau : Société des Eaux de Melun, Lyonnaise, SAGEP
- * La profession agricole (Chambre d'agriculture et syndicats agricoles)
- * Le monde industriel (UNICEM, AFINEGE)
- * Le monde associatif (ASMSN, UFC QUE CHOISIR)
- * Les experts : BRGM, IAURIF, Claude MEGNIEN

AQUI' Brie a démarré dès 2002 des actions préventives en direction du monde non agricole (diagnostic de l'entretien des espaces publics, formation des agents, guide d'entretien, etc... auprès des communes, de la DDE et de la SNCF). Ces actions montrent que de grosses réductions de dose de phytosanitaires sont possibles, accompagnées d'une communication vers les administrés. En 2003, des actions de diagnostics et de sensibilisation ont été engagées en partenariat avec la Chambre d'agriculture auprès des agriculteurs (diagnostics de cour de ferme, parcellaires, aide à la contractualisation de CAD (Contrat d'Agriculture Durable),....).

II. MIEUX CONNAITRE POUR MIEUX PROTEGER

II. 1 La structure du réservoir

Claude Mégnién a réalisé un important travail de caractérisation de la structure de la nappe des calcaires de Champigny, notamment dans le cadre d'une étude BURGEAP-BRGM réalisée entre 1973 et 1976 [4], [5], [6]. Nous nous sommes basés sur ce précieux travail pour continuer le dépouillement des coupes disponibles à la banque de données du sous-sol. Pour 650 coupes, les altitudes des différents niveaux ont été estimés. Le géoréférencement des coupes permet ensuite de dresser la structure du réservoir en 3 dimensions, couche par couche, de repérer plus facilement les interprétations erronées. Ce travail est en cours de validation, et s'affinera avec le nombre de coupes dépouillées. Il permet d'avoir une idée plus

précise du sens d'écoulement de la nappe, dans des secteurs où les forages accessibles sont peu nombreux, mais ou en revanche, les coupes-sondages pullulent. Cette vision 3D du réservoir permet de déterminer les aires d'alimentation des forages, la zone de recharge du Saint-Ouen. Elle permet également de comprendre certains phénomènes, par exemple pourquoi dans le secteur de Nangis les calcaires de Champigny sensu stricto sont localement dénoyés, pourquoi, dans le secteur de Pécy, la nappe présente dans les calcaires de Saint-Ouen est localement en charge, etc...

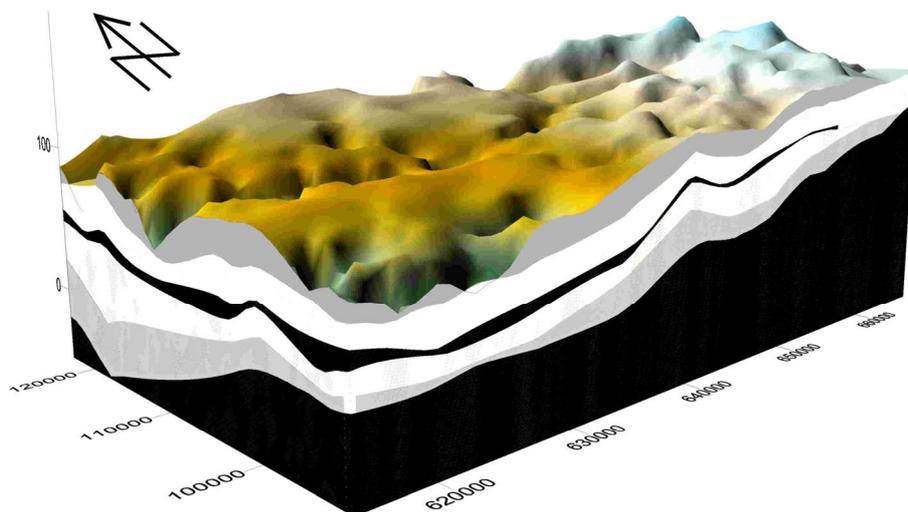


Figure 3 – Représentation 3D des calcaires éocènes (logiciel SURFER). De bas en haut : en noir l'Yprésien et la craie, en gris clair le Lutétien, en blanc le Saint-Ouen, en noir les marnes infra-ludiennes, en blanc les calcaires de Champigny sensu stricto, en gris les marnes vertes et supragypseuses et le Brie.

II. 2 La surveillance du niveau de la nappe

Décidé dans le cadre du contrat de nappe, après étude et dimensionnement par Claude Mégny, le réseau QuantiChamp est opérationnel depuis février 2003. Les 18 piézomètres, entièrement télétransmis, viennent compléter le réseau de la DIREN de bassin dans quatre secteurs où l'on manque d'informations sur la recharge ou le fonctionnement de la nappe (cf. fig.4): Secteur Nord-Est et Nord-Ouest de la nappe où se fait la recharge notamment de l'aquifère du Saint-Ouen, secteur Sud-Ouest, zone contestée entre Yerres et fosse de Melun, où s'effectuent la majorité des prélèvements, et rive gauche de la Seine au droit de la fosse de Melun, où les communications Champigny-rive droite, Beauce-rive gauche et Seine sont méconnues. Maître d'ouvrage du réseau, le Conseil Général de Seine-et-Marne en a confié la gestion à AQUI'Brie, laquelle assurera entre autres la transmission des données validées à la banque ADES.

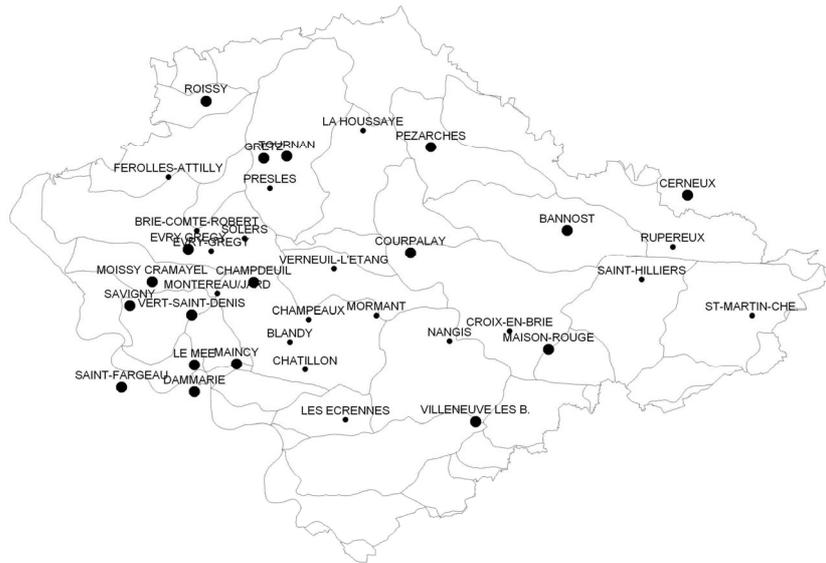


Figure 4 – Le réseau Quantifield (gros ronds) complète le réseau de la DIREN de bassin (petits ronds). Fond topographique : limite des bassins versants de surface.

Dans le secteur oriental de la nappe, cette première année de suivi nous a notamment permis de mettre en évidence un épisode de recharge printanier. Les données de pluviométrie et d'évapotranspiration de la station Météo-France de Nangis permettent de modéliser au pas de temps journalier le devenir des eaux de pluies entre reconstitution de la réserve utile des sols, infiltration vers la nappe du Brie et/ou Champagne ou ruissellement rapide vers les cours d'eau puis les gouffres (les molécules phytosanitaires ont moins de chance d'être dégradées lorsqu'elles participent au ruissellement que lorsqu'elles s'infiltrent (phénomène d'adsorption, de dégradation par les sols). Le calage du calcul s'effectue en comparant ces données à la piézométrie observée sur les piézomètres du réseau (cf. fig. 5). La réserve facilement utilisable par les sols est alors estimée à 80 mm.

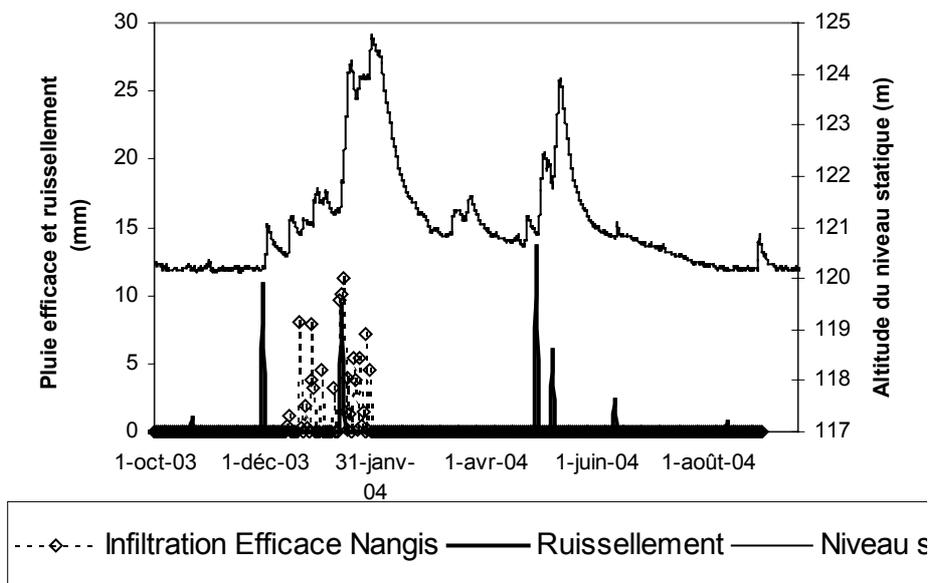


Figure 5 – Piézométrie sur le piézomètre Quantifield de Villeneuve-les-Bordes, calage du modèle d'infiltration et de ruissellement sur deux épisodes de recharge (pluviométrie et ETP à la station Météo-France de Nangis, Réserve utile calculée = 80 mm)

II. 3 La surveillance de la qualité des eaux souterraines

Mis en place dans le cadre du contrat de nappe, après la aussi étude et dimensionnement par Claude Mégrien, le suivi du réseau QualiChamp a démarré fin 1999, à raison d'une soixantaine de points de suivis, répartis sur tout le territoire (cf. fig. 6).

La fréquence des prélèvements est annuelle (malheureusement asynchrone) à bi-mensuelle pour les exutoires naturels de la nappe (sources de Provins, fosse de Melun et basse vallée de l'Yerres). Les principaux paramètres physicochimiques sont recherchés ainsi qu'une trentaine de produits phytosanitaires. La récolte et la bancarisation de ces données, provenant de différents producteurs (Agence, SAGEP, Lyonnaise des Eaux) est en voie d'achèvement et le travail d'interprétation en cours. Globalement, la tendance est à la diminution des teneurs en atrazine (interdite en 1999), au profit de son produit de dégradation, la deséthylatrazine. La répartition spatiale des teneurs en atrazine semble suivre deux phénomènes (cf. fig. 7) : on en retrouve avec des concentrations relativement constantes d'une année sur l'autre, dans des secteurs bien protégés, comme la fosse de Melun. Il s'agit dans ce cas d'une pollution de fond, qui se cale avec les concentrations en nitrates. Dans les secteurs où la nappe est moins protégée (partie orientale, vallée à proximité de gouffres), on observe des variations importantes de ces teneurs d'une année sur l'autre, en fonction de la pluviométrie. On constate en sus des dépassements ponctuels en chlortoluron, isoproturon, diuron.

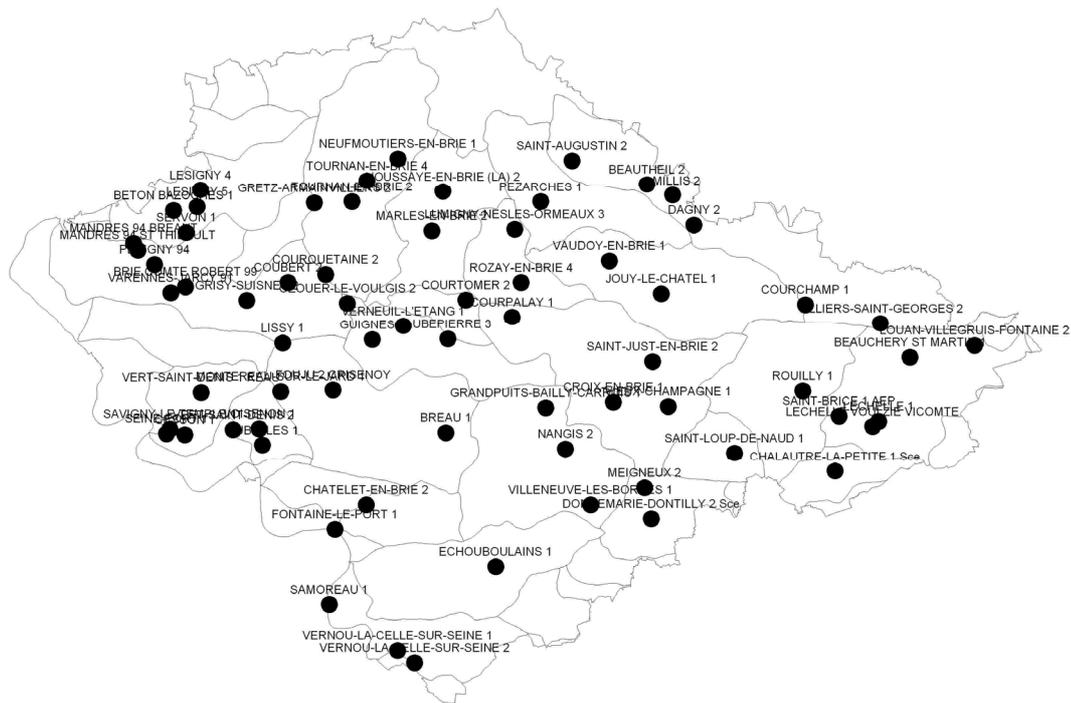


Figure 6 – Les points de suivi du réseau QualiChamp

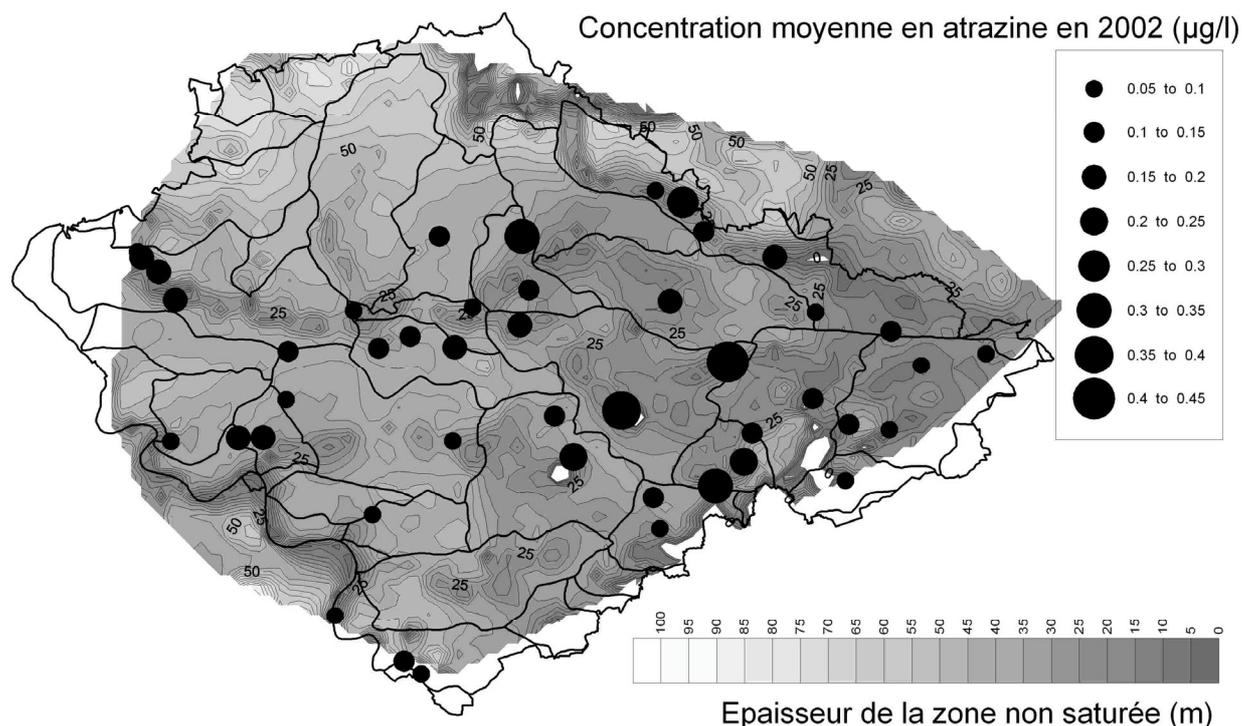


Figure 7 – Profondeur de la nappe des calcaires de Champigny (oct. 2003) et concentration moyenne en atrazine en 2002 (Réseau QualiChamp)

Un projet d'adaptation de ce réseau qualité est en cours (nombre de points, fréquence des analyses, synchronicité des prélèvements, paramètres analysés). Cette réflexion s'effectue en partenariat avec la DIREN laquelle réalise un travail en amont, sur la qualité des eaux de surface, et caractérise ainsi les molécules que l'on retrouvera demain dans les eaux souterraines. Par exemple, le glyphosate, substance active du Round-up, herbicide massivement utilisé en milieu agricole et non agricole, est retrouvé dans les eaux de surface du bassin versant de l'Ancoeur en quantité inquiétante (concentration de $14 \mu\text{g/l}$ pour le glyphosate et $22 \mu\text{g/l}$ pour son produit de dégradation l'AMPA, sachant que la norme AEP est de $0,1 \mu\text{g/l}$ par substance et $0,5 \mu\text{g/l}$ pour la somme des substances). Qu'en est-il dans les eaux souterraines, où l'on ne recherche pas encore ce produit de façon systématique?

II. 4 Les campagnes piézométriques

Deux campagnes piézométriques ont été menées en période de basses-eaux (octobre 2003) et de hautes-eaux (avril 2004), hautes-eaux toutes relatives car la recharge hivernale a été inférieure à la moyenne (moins de 50 cm). Réalisées par les bureaux d'études GAUDRIOT et GEO-HYD, elles ont permis d'actualiser les informations disponibles par la Banque de données du sous-sol sur 700 ouvrages (coordonnées du propriétaire, accessibilité de l'ouvrage). Environ 300 forages ont pu être mesurés et nivelés. Pour chaque ouvrage on a déterminé à partir des coupes géologiques et techniques les niveaux captés. Sur la fig. 8, toutes les mesures sont représentées. Pour rappel, les cartes piézométriques de 1974 concernaient uniquement le Champigny sensu-stricto. On voit qu'il est techniquement difficile de réaliser des cartes individuelles par niveaux captés car c'est souvent le même niveau qui est capté dans un secteur donné : Champigny et Saint-Ouen indifférenciés dans la fosse de Melun, Champigny sensu stricto dans la basse vallée de l'Yerres, calcaires lacustres indifférenciés au Sud-Est, etc... Le Saint-Ouen seul, est exploité quasi exclusivement dans la vallée de l'Aubetin, au Nord-Est. La pente piézométrique de l'ensemble se cale sur celle de la structure : gradient moyen sur la partie orientale et centrale ($0,26 \text{ m}/100\text{m}$), faible dans la

partie occidentale (0,12 m/100m) et forte à la rupture de pente (0,35 m/100 m au Chatelet-en-Brie). On distingue dans la partie Sud du territoire, au droit de la rupture de pente, une mise en charge des niveaux inférieurs (entre La Chapelle Gauthier - carré épais - et Valence en Brie – losange plus épais).

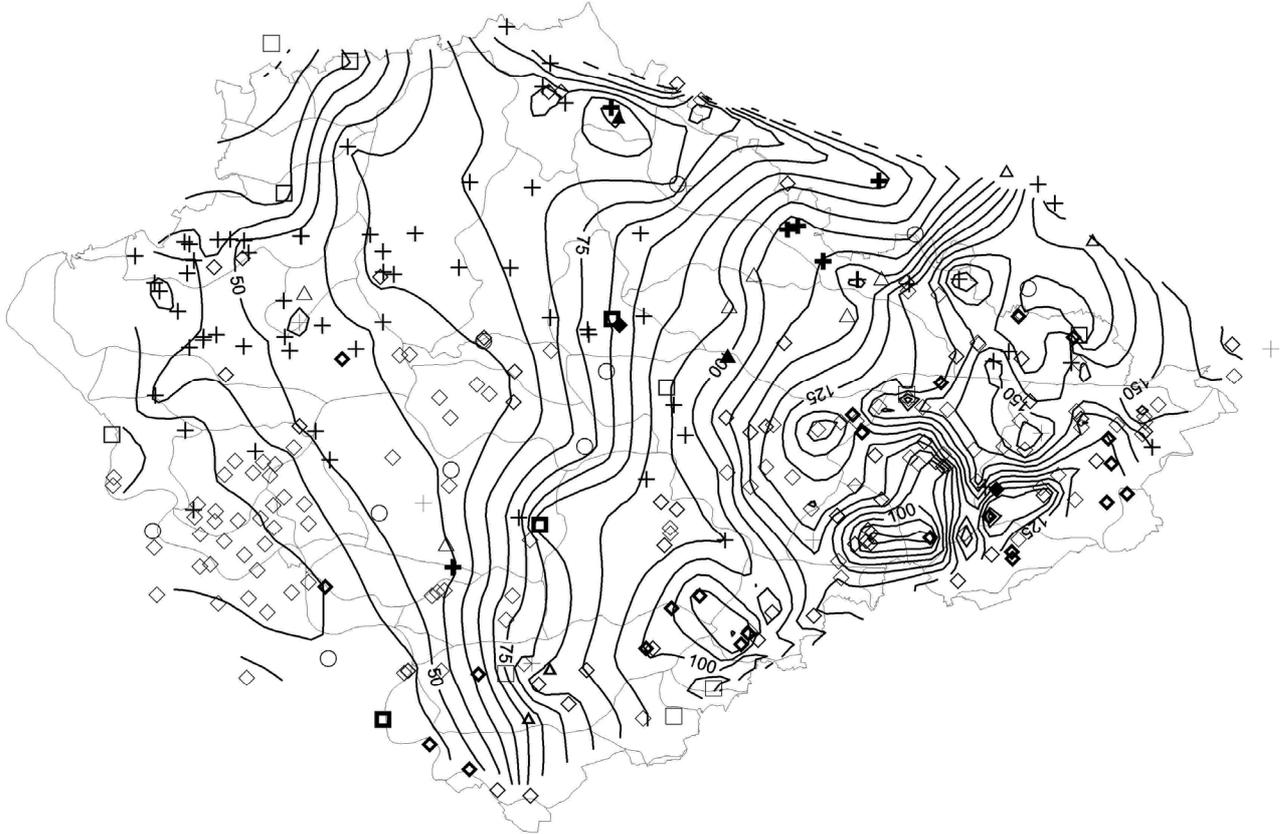


Figure 8 – Piézométrie brute mesurée sur les différents niveaux de la nappe des calcaires de Champigny en octobre 2003. Niveaux captés d'après les coupes géologiques et techniques: croix fine: Craie, croix plus épaisse : Ch. s.s., croix épaisse : St O. , losange fin : Ch. + St O. indifférenciés (marnes infraludiennes absentes), losange plus épais : Ch. + St O + Lut. indifférenciés, losange très épais: Ch. /St O/Lut./Ypr. indifférenciés, losange noir: Lut. , carré fin: Ypr., carré épais : Ch. et St O. indifférenciés + Lut-Ypr.).

III. PERSPECTIVES

Les perspectives d'AQUI' Brie pour le volet hydrogéologique sont de poursuivre la connaissance du mode de fonctionnement et de recharge de l'aquifère afin de cibler au mieux les actions préventives. Parmi ces perspectives, citons :

- Mettre à disposition la base bibliographique qui regroupe déjà près de 300 rapports et de 800 coupes géologiques et/ou techniques et permet une recherche par commune ou par forage ;
- Devenir un support d'information pour les hydrogéologues agréés, les bureaux d'études qui travaillent dans le secteur et œuvrer pour une meilleure prise en compte de la vulnérabilité de la nappe des calcaires de Champigny dans la définition des périmètres de protection (pourquoi si peu de traçages en Seine-et-Marne pour les définir ?) ;
- Développer des partenariats avec les chercheurs sur des problématiques communes (dimensionnement d'aménagement épuratoire des produits phytosanitaires, compréhension du cycle de dégradation des produits phytosanitaires, etc...) ;

- Editer un tableau de bord de suivi dans la nappe, quantitatif que qualitatif, avec des indicateurs de suivi de la restauration ou de la dégradation de la qualité des eaux;
- Disposer d'un modèle de fonctionnement hydrodynamique de la nappe ;
- Exploiter la multitude de données disponibles chez les gestionnaires (suivi interne décadaire de quelques paramètres physico-chimiques, relevé hebdomadaire des volumes prélevés) qui permettent parfois de caractériser la recharge, d'estimer un temps de transit entre la surface et le forage, et donc d'estimer sa vulnérabilité ;
- Mettre en place une grille de vulnérabilité de la ressource afin de prioriser nos actions préventives, dans l'esprit des grilles de type EPIK. Celle-ci devra tenir compte de la profondeur de la nappe déterminée à partir des campagnes piézométriques (cf. fig. 7), de l'épaisseur des marnes vertes et supragypseuses, de la proximité de gouffres et/ou pertes en rivières, de la couverture du sol. Il est un facteur qu'il faudra mieux appréhender, c'est celui de la fracturation, par analyses des photos aériennes ou par analyse morphostructurale.

Références bibliographiques

- [1] AESN & DIREN, 2000 - La directive cadre sur l'eau : Atteindre le bon état des eaux en 2015 : Masse d'eau du Champigny, 119 p.
- [2] MEGNIEN Cl. et al., 1976 - AEP des villes nouvelles du SE de la région parisienne : Débits exploitables dans la nappe des calcaires de Champigny en Brie - rapport de fin d'étude. 76 SGN 049 BDP, 87 p.
- [3] IAURIF, 1996 - La nappe des calcaires de Champigny : état des lieux et projet de contrat de nappe. 391p.
- [4] - MEGNIEN Cl., 1973 - AEP des villes nouvelles du SE de la région parisienne : Note technique 1 : Premiers résultats de l'étude géologique et structurale du réservoir aquifère de la nappe des calcaires de Champigny. Rap. BRGM 73 SGN 289 BDP, 18p. + annexes.
- [5] MEGNIEN Cl. Et al. (1970) – Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. Editions BRGM, 152p.
- [6] MEGNIEN Cl., 1979 – Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. Mém. BRGM n° 98, 532 p.

Influence de la Seine sur le champ captant de Boissise-la-Bertrand : approche hydrodynamique, hydrochimique et isotopique

**Ari Akouvi¹, Anne Triganon¹, Géraldine Boutillot²
Jean-Pierre Gribet², Jacques Lauverjat³**

¹ EXCIPE France, 49 Avenue Franklin Roosevelt, 77211 Avon Cedex, France

aakouvi@excipe.com

² Générale des Eaux, 2 parvis de Saint-Maur, 94106 Saint Maur Cedex, France

³ Hydrogéologue agréé, 53 Rue du Docteur Bourrier, 91600 Savigny sur Orge, France

Dans les années 1990, la Générale des Eaux (GE) et la Lyonnaise des Eaux (LE) ont réalisé neuf forages d'environ 70 m de profondeur destinés à capter la nappe des calcaires de Champigny dans la zone forestière du Bois de Sainte Assise, à l'Ouest de Melun.

Il était alors admis [1] que la nappe du Champigny avait dans cette zone un « débit de fuite » de l'ordre de 90.000 m³/jour vers la vallée de la Seine.

Postérieurement à 1993, quatre forages de la LE ont été mis en service pour alimenter l'usine de traitement des pesticides de Nandy, puis la ville nouvelle de Sénart entre autres. Les quatre forages de la GE sont restés inutilisés.

Au cours de ces dernières années, les divers forages AEP alimentant Melun et les communes limitrophes ont vu leur taux en pesticides augmenter jusqu'à dépasser, pour certains, la valeur maximale autorisée. Un certain nombre d'ouvrages ont dû être abandonnés et une usine de traitement a été construite à Livry-sur-Seine. Cet état de fait a conduit à un déséquilibre avec 70% de la production provenant de Melun-Sud et 70% de la consommation se situant à Melun-Nord.

La ville de Melun et la GE ont donc projeté la création d'une deuxième usine de traitement sur la commune de Boissise-la-Bertrand, centrée sur les quatre forages inutilisés. Cependant, avant toute réalisation il fallait s'assurer, d'une part que la mise en service de ces forages n'allait pas interférer sur les forages voisins en activité et d'autre part qu'un surcroît de prélèvement n'allait pas modifier les relations nappe-Seine au point d'attirer l'eau du fleuve dans le champ captant.

Nous avons donc procédé à une série d'essais de pompage entre le 9 juin et le 4 juillet 2004, réalisant ainsi pour la première fois des essais « grandeur nature ». Cinq phases de pompages se sont succédées :

- Pompage sur le forage F3 à son débit habituel d'exploitation avec suivi de la remontée pendant 10h.
- Essai de puits sur le forage P2.
- Pompage de 72 h simultanément sur les forages P1, P2 et F3 avec suivi de la remontée pendant 48h et prélèvements d'eau en début et en fin de phase de pompage.
- Pompage de 72 h sur le forage P2 avec suivi de la remontée pendant 72h (F3 pompé à son débit d'exploitation habituel).

- Pompage de 72 h sur le forage P1 avec suivi de la remontée pendant 72h. (F3 pompé à son débit d'exploitation habituel).

Seul le pompage simultané sera décrit dans cette présentation. Pendant toute la durée de l'essai, le niveau piézométrique de la nappe a été enregistré sur les ouvrages P3, piézomètre du forage P1, piézomètre du forage P2, piézomètre PZ2 situé en bord de Seine, F3 et piézomètre S1 de la LE.

Parallèlement aux mesures de niveau, nous avons effectué des analyses chimiques et isotopiques au début et à la fin du pompage sur P1, P2, F3, PZ2 et la Seine (Fig.1).

I. EVOLUTION DE LA PIEZOMETRIE

Lors des essais de pompages, c'est-à-dire en position d'exploitation, il a été constaté que les courbes piézométriques s'infléchissaient de quelques mètres au niveau du champ captant sans modifier l'allure générale des filets d'eau (globalement, au repos la nappe s'écoule du Nord-Est vers le Sud-Ouest avec un gradient de 1.5 ‰). La mise en service des forages du champ captant accentue la zone d'appel. Les écoulements proviennent non seulement de l'Est mais aussi de la rive gauche de la Seine et du Nord pour converger au niveau du champ captant (Fig.1).

Les courbes de rabattement piézométriques sur les différents forages se stabilisent très rapidement après le début du pompage. Ceci indique l'existence d'un front de réalimentation important. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce phénomène : une limite à charge imposée, une drainance, l'écoulement naturel de la nappe.

En générale, l'influence des pompages se manifeste nettement jusqu'à 700 m de distance du point de prélèvement. Au-delà, il est souvent difficile de discerner l'effet du pompage des effets de la Seine ou des variations liées à d'autres phénomènes. On note enfin que les variations piézométriques des forages P3 et PZ2 sont nettement corrélées aux variations de niveau de la Seine essentiellement par transferts de pression.

Dans tous les cas, état actuel ou mise en activité des forages de la GE, la nappe du Champigny se retrouve sous le niveau de la Seine, ce qui pourrait faire penser à une possibilité d'intrusion de l'eau de Seine dans la nappe. C'est pourquoi des études géochimique et isotopique ont été menées conjointement.

II. ETUDE GEOCHIMIQUE

Pendant toute la durée des pompages la composition chimique de l'eau de la nappe montre peu, voire pas, d'évolution, y compris dans les points les plus près de la Seine. L'eau pompée reste donc bien de l'eau de la nappe sans intrusion notable d'eau de Seine.

On doit noter que le forage P2 présente un faciès géochimique un peu différent.

III. DONNEES ISOTOPIQUES

Les différentes mesures de Tritium réalisées par le Centre de Recherches Géodynamiques (CRG) de Thonon, sont certainement les résultats les plus caractéristiques pour répondre à la problématique posée.

La teneur actuelle en tritium des précipitations est égale ou inférieure à 10 UT. La concentration en tritium de la Seine est supérieure à 100 UT en raison du rejet en amont de la centrale de Nogent-sur-Seine.

Entre le début et la fin du pompage, les teneurs en tritium ne varient pas significativement. On ne décèle pas d'infiltration massive d'eau de Seine sur PZ2 (28 UT en début de pompage et 24 UT en fin de pompage) pendant cette période.

Cependant, le fait de mesurer des concentrations en tritium dans la nappe supérieures à celle des précipitations indique que la Seine contribue en partie à l'alimentation de la nappe. Le bilan des concentrations en tritium que l'on peut établir semble indiquer une proportion d'eau de Seine de l'ordre de 10% du débit pompé qui correspond à une percolation lente à travers les alluvions ou les placages des berges. Si l'on prend en compte le fait que le forage F3 (LE) est en activité depuis plusieurs années et a déjà créé un cône de rabattement, la teneur en tritium du piézomètre PZ2 devrait être beaucoup plus élevée si l'eau de Seine intervenait fortement dans l'alimentation de la nappe.

Notons que le forage P2 présente des concentrations bien inférieures à celles des autres forages. Particularité déjà observée à partir des résultats de l'étude géochimique. Ceci pourrait s'expliquer par une origine de l'eau différente constituée uniquement d'eau de nappe sans apport d'eau de Seine.

IV. CONCLUSIONS

Les résultats d'analyses isotopiques indiquent que la Seine ne peut être à l'origine de la stabilisation observée en début de pompage. En revanche, cet apport d'eau complémentaire peut avoir deux origines, ne s'excluant pas forcément l'une l'autre :

- la drainance entre les niveaux captés par les forages (calcaires de Champigny et de St Ouen) et le Lutétien sous-jacent ;
- la réalimentation par écoulement naturel de la nappe.

A l'issue de cette étude nous proposons un schéma de circulation des eaux à proximité du champ captant de Boissise-la-Bertrand représenté figure 2.

Références bibliographiques

- [1] SAFEGE, 1992 - Modèle mathématique de la nappe de Champigny – Actualisation sur 1991-1992. Partie 3 : Simulations prospectives. DP/AP/B224. pp 44.
- [2] Bernable H, Vilnius T (1993) Contrôle et suivi d'essais de pompage longue durée sur les quatre forages de la fosse de Melun à Boissise-la-Bertrand (Seine-et-Marne) Compte rendu, interprétation des essais et modélisation hydrodynamique simplifiée. BRGM N0896. pp33.

- [3] Megnien C, Rampon G, Turland M , 1963 - Synthèse hydrogéologique provisoire et état de la documentation sur la feuille topographique : Melun. BRGM DSGR.63.A11. pp 27.
- [4] Megnien C et al, 1970 - Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. Notice explicative. Ed BRGM.
- [5] Megnien C, 1979 - Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. Mémoire BRGM n°98. pp 532.
- [6] Moncourt C, Vilmus T, 1995 - Champ captant de Boissise-la-Bertrand. Projet de deux nouveaux captages – Suivi et interprétation de pompages et modélisation hydrodynamique. ANTEA A04475. pp 37.

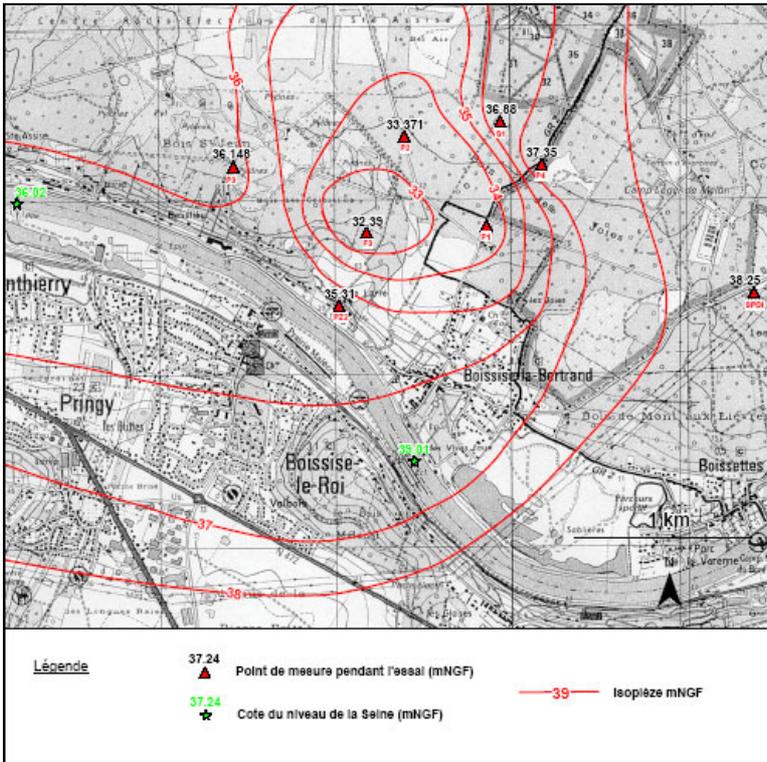
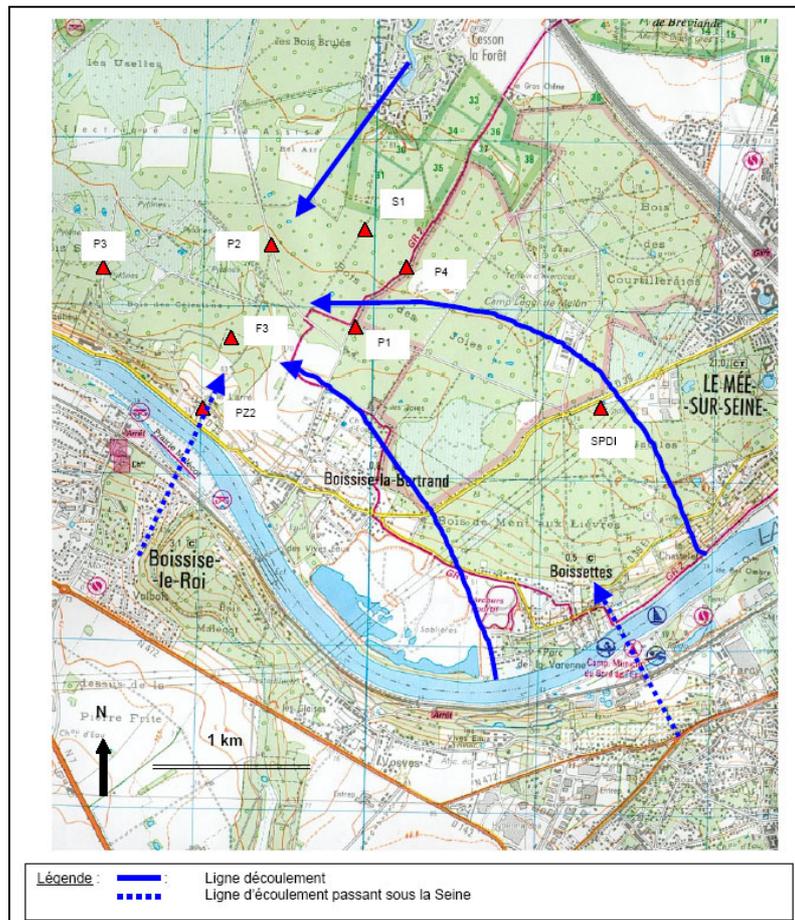


Figure 1 – Carte piézométrique en fin de pompage simultané

Figure 2 – Schéma des écoulements au niveau du champ captant de Boissise la Bertrand



Accroissement récent des teneurs en sulfates dans la nappe des Sables de Fontainebleau : origines et implications pour la gestion de cette ressource

Vincent Schneider, Florent Barbecot, Laurent Bergonzini,
Christelle Marlin, Marc Massault, Laurent Dever

UMR 8148 « IDES » - Equipe Hydrologie, Université Paris-Sud, Bât. 504,
91405 Orsay Cedex schneider@geol.u-psud.fr

I. INTRODUCTION

Localisé dans le Bassin de Paris (Figure 1), l'aquifère des Sables de Fontainebleau (Oligocène) constitue localement une ressource majeure en eau. Néanmoins un accroissement de la minéralisation des eaux de la nappe depuis les années 50 a été observé (Figure 2, d'après [2]), et pourrait être attribué à une drainance ascendante depuis la nappe de l'Eocène sous-jacente [2]. Les grandes quantités de sulfates dissous dans cette nappe (jusqu'à $2,5 \text{ g.l}^{-1}$) en font une ressource d'intérêt mineur, et une source potentielle de contamination.

Il devenait donc nécessaire d'identifier l'origine de la dégradation de la qualité de la nappe des Sables de Fontainebleau, en prenant en considération (i) les relations potentielles entre les aquifères et (ii) les interactions eau-roche. Dans cet objectif, sur une zone d'étude de $20 \times 25 \text{ km}$, 35 échantillons d'eaux provenant des deux aquifères ont permis de comparer et de caractériser la distribution des teneurs en éléments majeurs et des compositions isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ et A^{14}C , $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}\text{-SO}_4$).

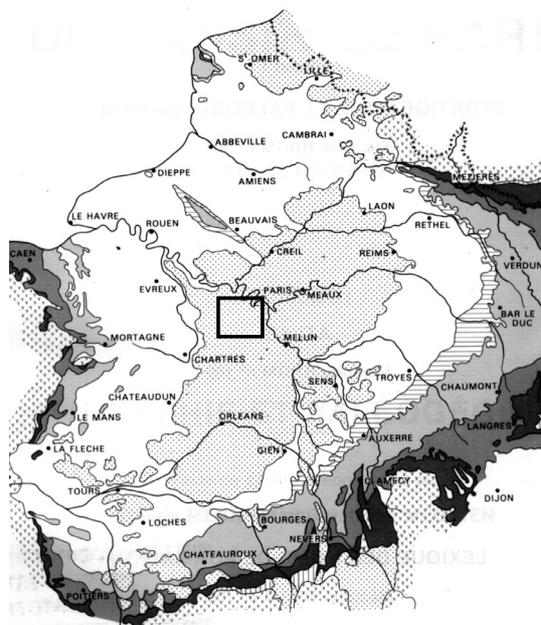


Figure 1 - Carte de localisation de la zone d'étude (modifié d'après [1])

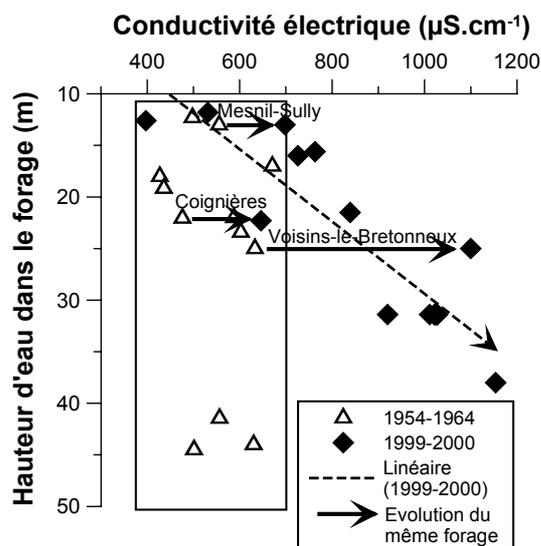


Figure 2 - Evolution temporelle de la conductivité électrique (d'après [2])

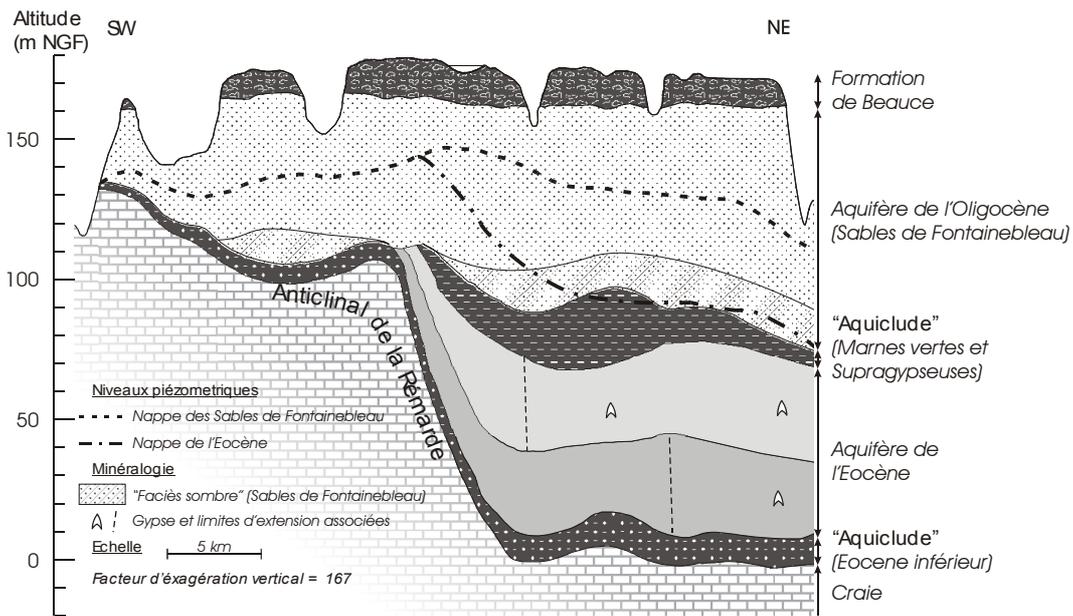


Figure 3 - Coupe hydrogéologique synthétique SW-NE de la zone d'étude, sécante à l'Anticlinal de la Rémarde (d'après [3, 4] modifié)

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Intégré dans le système aquifère de Beauce, les Sables de Fontainebleau (Figure 3, d'après [3, 4]) présentent deux faciès, différant par leur composition minéralogique. L'unité supérieure est composée jusqu'à 99 % de sable quartzueux, alors que la partie inférieure n'en contient qu'environ 82 %. Les autres composants de la partie inférieure, appelée aussi « faciès sombre », sont, par ordre de concentration décroissante : feldspaths, argiles, carbonates, sulfures, et matière organique [5]. Exception faite des zones incisées par les vallées (Figure 3), l'aquifère est compris entre la formation de Beauce peu perméable au-dessus (calcaire, argile et meulière oligocènes), et les marnes vertes et supragypseuses imperméables au-dessous (Oligocène inférieur – Eocène supérieur).

L'aquifère de l'Eocène est marqué par une composition minéralogique hétérogène depuis (i) des carbonates au niveau des zones de recharge dans la partie sud-ouest, jusqu'à (ii) des gypses vers le nord-est [3].

III. RECHARGE DES AQUIFERES

Les teneurs en isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$) et les données piézométriques ont permis de mettre en évidence deux sources de recharge pour la nappe des Sables de Fontainebleau : (i) une infiltration localisée d'eau relativement enrichie en provenance des étangs, bien que leur surface relative soit restreinte, et (ii) une recharge diffuse au travers des plateaux d'eau relativement peu évaporée, la contribution de cette dernière augmentant proportionnellement en s'éloignant des étangs (Figure 4).

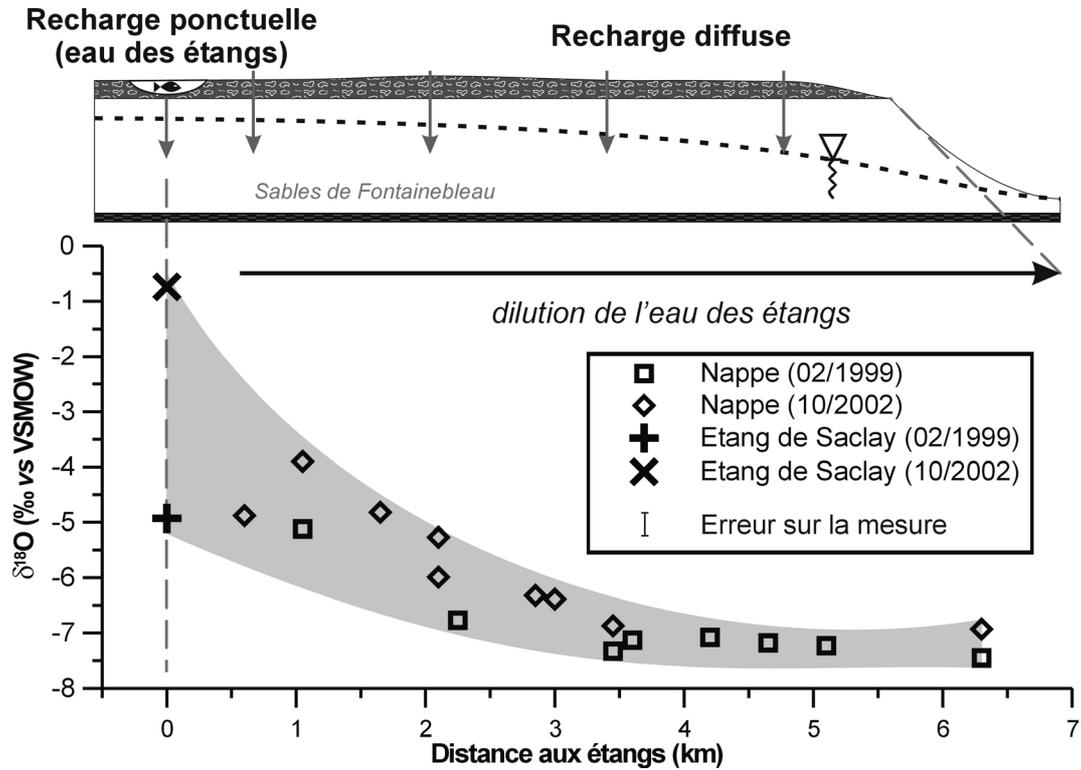


Figure 4 - Evolution spatiale des teneurs en oxygène-18 des eaux de la nappe des Sables de Fontainebleau

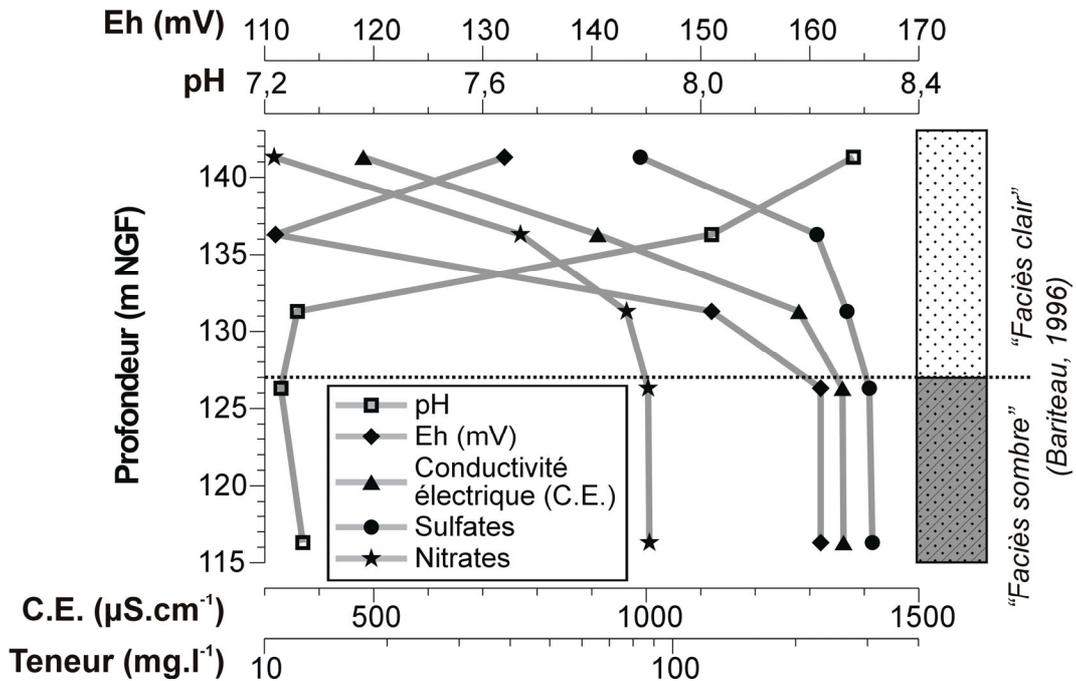


Figure 5 - Profil de Trappes- Evian, évolution des paramètres physico-chimiques.

L'aquifère de l'Eocène est principalement rechargé par une infiltration au niveau du contact avec les Sables de Fontainebleau sus-jacents (Figure 3). Ceci est en accord avec les données piézométriques [4], et les activités en ^{14}C décroissantes depuis la zone de contact jusqu'aux exutoires.

IV. INTERACTIONS EAU-ROCHE ET RELATIONS HYDRODYNAMIQUES

Une minéralisation croissante de la nappe des Sables de Fontainebleau a été mise en évidence au cours des cinquante dernières années [2]. De plus, des mesures récentes sur un profil vertical ont mis en évidence une stratification chimique au sein de cette dernière (Figure 5) : les eaux sont plus minéralisées en profondeur, cet enrichissement étant particulièrement fort pour les sulfates.

Sources et mécanismes potentiels de contamination

Les origines potentielles peuvent être : (a) une altération du faciès sombre des Sables de Fontainebleau, ou (b) une drainance ascendante ou une diffusion des eaux sulfatées de la nappe de l'Eocène sous-jacente.

- (a) L'observation au MEB d'un échantillon du faciès sombre a révélé la présence – entre autres – de pyrite framboïdale (environ 1 %), et de cristaux purs et bien cristallisés de célestite (SrSO_4 , environ 0,2 %,
- (b) Figure 6). Les prélèvements croissants dans la nappe des Sables de Fontainebleau au cours des dernières dizaines d'années ont pu forcer les circulations d'eaux oxydantes dans cet horizon et altérer cette partie inférieure, à l'origine de l'accroissement de la minéralisation.
- (c) Alors que la comparaison des niveaux piézométriques actuels dans les deux aquifères (Figure 3) ne peut conduire qu'à une drainance descendante, les différences de concentrations en sulfates entre les deux nappes suggèrent une diffusion ascendante de ces derniers. Néanmoins, les flux de sulfates sont minimes et du même ordre de grandeur dans les deux sens (de l'ordre du $\text{mmol}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), en prenant en considération les rabattements de la nappe dans les forages en exploitation. Une contamination importante depuis la nappe de l'Eocène est donc peu probable dans les conditions actuelles.

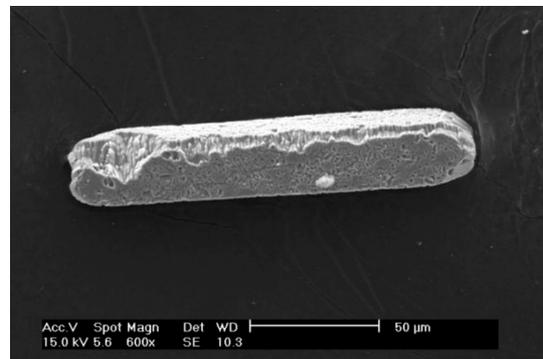
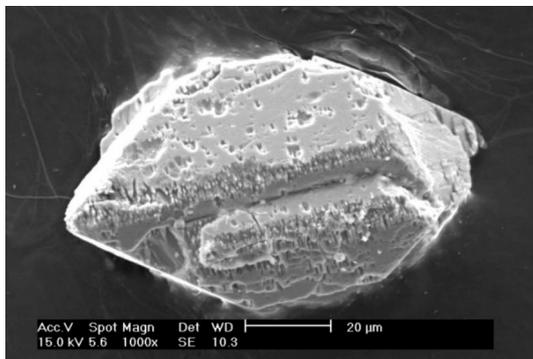


Figure 6 - Clichés MEB de cristaux de célestite (« faciès sombre » des Sables de Fontainebleau)

Discrimination des sources de sulfates à l'aide du couple $\delta^{18}\text{O} - \delta^{34}\text{S}$

L'origine des sulfates dissous peut être approchée en utilisant leurs teneurs isotopiques, $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{34}\text{S}$ (Figure 7-A&B).

- (1) Nappe de l'Eocène : pour des teneurs en sulfates croissantes, l'évolution des compositions isotopiques de cet ion vers un pôle enrichi caractéristique du gypse éocène [6, 7], rend compte d'un processus de dissolution.
- (2) Nappe des Sables de Fontainebleau : les compositions isotopiques des sulfates ne correspondent pas à celles de l'océan à l'Oligocène [8], mais indiquent un mélange avec des sulfates de type Eocène.
- (3) L'oxydation de sulfures présents dans le faciès sombre des Sables de Fontainebleau et les carbonates éocènes constitue – dans une moindre mesure – une source supplémentaire de sulfates, très appauvris en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{34}\text{S}$.

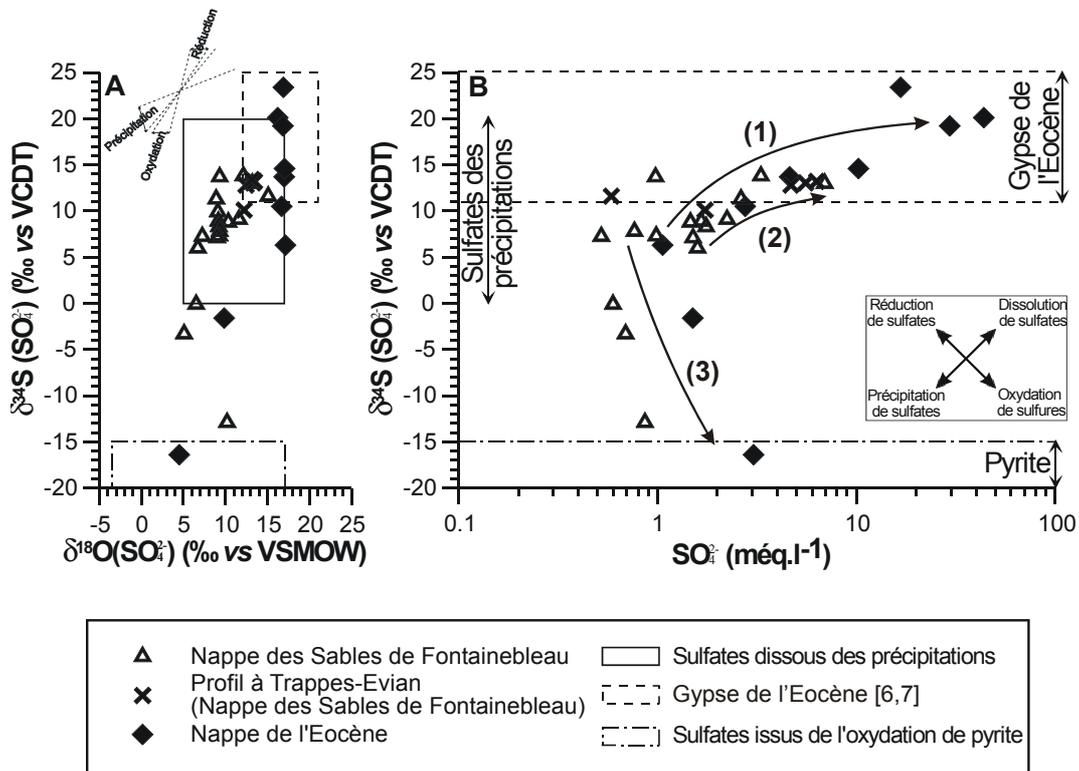


Figure 7 - Compositions isotopiques des sulfates dissous ($\delta^{18}\text{O} - \delta^{34}\text{S}$) et teneurs en sulfates des nappes des Sables de Fontainebleau et de l'Eocène

V. CONCLUSION

La présence de sulfates de type Eocène a été mise en évidence dans les eaux de la nappe de l'Oligocène (voir § 0), mais les conditions hydrodynamiques actuelles ne permettent pas une contamination significative (voir § 0(c)). L'origine de cette contamination est donc à rechercher dans le passé, où les conditions hydrodynamiques étaient différentes.

Depuis 800 ka, le creusement des vallées dans les formations géologiques de l'Oligocène et de l'Eocène a affecté successivement les niveaux piézométriques de ces deux aquifères. Ainsi celui de la nappe de l'Oligocène a pu être inférieur à celui de la nappe de l'Eocène, et favoriser une drainance ascendante des eaux pendant plusieurs milliers d'années. Lorsque le creusement des vallées a affecté la nappe de l'Eocène, l'abaissement du niveau piézométrique de cette dernière a mis fin à ce processus de transfert (conditions actuelles).

L'évolution récente de la chimie des eaux de la nappe des Sables de Fontainebleau (**Figure 2**) reflète la sollicitation croissante de cette ressource. Les pompages modifient la stratification naturelle des écoulements dans cet aquifère et autorisent la mobilisation du stock de sulfates associé au faciès sombre.

Références bibliographiques

- [1] Mégnien, C., 1980 – Synthèse géologique du Bassin de Paris. *Mémoire du BRGM n°101, B.R.G.M., Orléans, 466 pp.*
- [2] Bergonzini, L., 2000 – Caractérisation géochimique de la nappe des Sables de Fontainebleau. *18^{ème} Réunion des Sciences de la Terre, Paris.*
- [3] Mégnien, C., Diffre, P., Turland, M., Berger, G., Rambert, B., Rampon, G., Villalard, P., Marquet, G. et Lauverjat, J., 1970 – Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. *B.R.G.M., Service géologique régional Ile de France, Orléans (45).*
- [4] Mégnien, C., 1979 – Hydrogéologie du centre du Bassin de Paris. *B.R.G.M., Orléans, 532 pp.*
- [5] Bariteau, A., 1996 – Modélisation géochimique d'un aquifère : la nappe de l'Oligocène en Beauce et l'altération des Sables de Fontainebleau. *Thèse, Ecole des Mines de Paris, 179 pp.*
- [6] Fontes, J.C. et Létolle, R., 1976 – ¹⁸O and ³⁴S in the Upper Bartonian gypsum deposits of the Paris Basin. *Chemical Geology, 18 : 285-295.*
- [7] Fontes, J.C. et Toulemon, M., 1987 – Faciès, pétrologie et teneurs en isotopes lourds (¹⁸O, ¹³C, ³⁴S) des niveaux évaporitiques du Lutétien supérieur du Bassin de Paris : interprétation paléohydrologique. *Bulletin des Centres Recherche et d'Exploration-Production d'Elf-Aquitaine, 11(1) : 39-64.*
- [8] Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H. and Zak, I., 1980 – The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chemical Geology, 28: 199-206.*
- [9] Guillocheau, F., Robin, C., Allemand, P., Bourquin, S., Brault, N., Dromart, G., Friedenber, R., Garcia, J.-P., Gaulier, J.-M. et Gaumet, F., 2000 – Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin: 3D stratigraphic constraints. *Geodinamica Acta, 13(4) : 189-245.*

SESSION 7

Le Calcaire de Beauce.

Le bassin tertiaire de Beauce. Structure et sédimentation.

Denis Giot¹, Yves-Michel Le Nindre²

¹ BRGM CDG Av. Claude Guillemin 45060 ORLEANS cedex 2 d.giot@brgm.fr

² BRGM EAU Av. Claude Guillemin 45060 ORLEANS cedex 2 ym.lenindre@brgm.fr

Une première étude est réalisée à partir d'une sélection de forage, de données sismiques et de la cartographie de surface, de 1996 à 1999 (rap. BRGM R 39598 et R40571), dans le cadre des actions de Service public du BRGM 98-D-509 (Ministère de l'industrie) avec le concours financier des conseils régionaux Centre et Ile-de-France et des agences de l'eau Loire-Bretagne et Seine-Normandie. Une étude plus détaillée est en cours, elle utilise la totalité des données de forages disponibles

Les dépôts postérieurs à la Craie sont distingués par formations lithostratigraphiques depuis l'Eocène inférieur jusqu'au Burdigalien.

Une base de données de sondages et un système d'information géographique regroupe les cartes de chaque niveau avec l'extension jusqu'à l'affleurement, l'épaisseur, les principaux faciès et la structure actuelle du toit avec les failles.

I. STRUCTURE GENERALE DU BASSIN

L'ensemble du bassin tertiaire s'étend de l'Ile de France au Berry jusqu'en Touraine.

La Beauce, partie nord du bassin tertiaire, dans sa structure actuelle, forme un plateau incliné du nord (+150 m) vers le sud (+110 m). Le plateau est, au Nord, coupé de l'Ile de France par la vallée de la Seine (+60 m) et le plateau de Rambouillet (+170 m) et au Sud limité par la vallée de la Loire (+90m). L'aire d'extension actuelle en longitude est de 120 km. L'extension en latitude est de l'ordre de 80km. Ces bordures coïncident parfois avec des accidents et le plus souvent sont marquées par des ressauts paléo-géomorphologiques.

La structure profonde, au toit de la Craie correspond à un sillon orienté N20 qui se développe sur 60 km de large. Il est lui même scindé en deux domaines par un accident transverse, la faille de Sennely. Le domaine occidental (fosse d'Orléans), ouvert sur la Sologne, reçoit 130 mètres de dépôts, il est principalement structuré par les plissements et failles pyrénéens hérités des accidents armoricains (N45). Le domaine oriental (fosse de Pithiviers), ouvert sur l'Ile de France et profond de 230 mètres s'inscrit entre la faille de Sennely et le faisceau de failles de Beaune-la-Rolande.

II. LES DEPOTS DETRITIQUES DE L'EOCENE

L'ensemble cartographié regroupe tous les faciès argilo-détritiques compris entre la Craie et les calcaires lacustres éocènes à l'exception des Arkoses de Breuillet. Ces dépôts sont peu épais à l'est de la faille de Sennely et dans le secteur sud-est, l'épaisseur varie de 0 à 20 m. Les lacunes sont fréquentes mettant en contact la Craie et les calcaires éocènes. Au nord-est, un épaissement est lié au développement des argiles sparnaciennes. La structure au toit, montre une fosse principale à la cote -60m sur Pithiviers séparé de l'Ile de France par un seuil à +10m. La fosse d'Orléans est peu marquée à +20m.

III. LES ARKOSES DE BREUILLET (Yprésien).

La formation n'est présente qu'au nord-est du bassin. La formation à dépôts sableux et sablo-argileux se décompose en plusieurs corps encaissés par chenalisation dans les formations argileuses cartographiées dans l'Eocène détritique.

IV. LES CALCAIRES EOCENES (Priabonien-Bartonien).

Les dépôts lacustres calcaires éocènes s'étendent très largement dans toutes les directions du bassin. Le bassin est ouvert largement vers l'Ile-de-France dont il est une extension et se prolonge vers la Sologne et la Touraine.

Un sillon, contrôlé par les failles de Sennely et de Beaune-la-Rolande, se développe depuis la Seine jusqu'à la Sologne.

Au nord-est la série est à dominante calcaire au sommet et marneuse à la base. Les calcaires massifs sont occasionnellement fracturés ou poreux, ils correspondent en partie supérieure au Calcaire de Champigny–Château-Landon. Les marnes sous-jacentes sont fortement argileuses avec de rares niveaux calcaires. Les épaisseurs varient de 30 à 80 m.

Les faciès des fosses de Pithiviers et de Sennely montrent des influences marines. La structure au toit montre un élargissement de la fosse de Pithiviers et la cote atteinte voisine 0. La fosse d'Orléans, vers +20m apparaît comme une dépendance de la fosse de Sologne.

V. LES ARGILES VERTES ET MARNES SUPRAGYPSEUSES (Rupélien-Priabonien).

Les Marnes supragypseuses ne sont présentes qu'au nord de la fosse de pithiviers. Les argiles vertes leur succèdent et débordent vers l'ouest, au nord de la fosse d'Orléans. Elles se caractérisent par une très forte argilosité, constituent un bon repère en sondage.

L'épaisseur cumulée des deux niveaux atteint 25 mètres vers la Seine et se réduit vers l'ouest. La structure montre un plongement rapide de la cote +70m sur la Seine à -10m vers Pithiviers.

VI. LE CALCAIRE DE BRIE (Rupélien).

Le Calcaire de Brie s'inscrit sensiblement dans la même aire de répartition que le dépôt des Argiles vertes c'est aussi le prolongement d'un niveau largement développé en Ile-de-France. Le dépôt est limité au nord de la fosse de Pithiviers, il est constitué de calcaires francs localement siliceux très indurés. Sur l'ensemble du domaine, les épaisseurs sont relativement régulières comprises entre 10 et 20 m. La structure au toit forme une demi-cuvette axée sur Pithiviers, en point bas, à la cote +10m. Le seuil de la Seine se situe vers la cote +70m.

VII. LES MARNES A HUITRES ET LA MOLASSE D'ETRECHY (Rupélien).

Ces dépôts à faciès littoraux appartiennent à la transgression marine stampienne. En provenance d'Ile-de-France, la transgression gagne l'Orléanais. L'épaisseur totale des deux niveaux varie de 1 à 13 m dans le corps principal.

Le gisement le plus conséquent est noté dans la fosse d'Orléans, les dépôts, épais au maximum de 30 mètres, sont encaissés dans les calcaires éocènes et constituent de petits reliefs moulés par le Calcaire d'Etampes.

VIII. LES SABLES DE FONTAINEBLEAU (Rupélien).

La transgression des Sables de Fontainebleau est largement discordante et provoque la troncature de toutes les formations sous-jacentes jusqu'à la Craie.

Un large cordon dunaire axé sur une ligne Rambouillet-Nemours se développe. Une barrière sédimentaire sépare l'Ile de France et la Beauce. Au sud-ouest, le lac des Calcaires d'Etampes s'installe. Les épaisseurs atteignent 60 m en partie nord-est et la formation disparaît au niveau d'Artenay. La structure du toit montre une zone très haute au nord-ouest vers Rambouillet (+150m) puis un isoclinal orienté au sud aboutissant à la cote +40m au sud de Beaune-la-Rolande.

IX. LE CALCAIRE D'ETAMPES (Rupélien).

Le domaine lacustre atteint son extension maximale : 250 km en sud-ouest-nord-est et 150 km en nord-ouest-sud-est. Dans les fosses, les épaisseurs de dépôt évoluent de 30 à 50 m sur Orléans-Neuville-aux-Bois et 30 à 60 m sur Châteauneuf - Beaune-la-Rolande. Un seuil sur la Loire les sépare de la fosse de Sologne.

Généralement la formation est constituée de calcaires dominants : calcaires durs, calcaires crayeux, calcaires argileux, calcaires meuliérisés et marne. En Gâtinais, les marnes prédominent. La structure au mur montre un sillon orienté sud-ouest-nord-est atteignant les cotes 0 en Sologne et +10 à Pithiviers. Les marges ouest et est, voisines de la cote +120 m atteignent au nord +170m.

X. LA MOLASSE DU GATINAIS (Aquitanién).

Cet horizon argileux est le repère géologique principal qui délimite les deux formations calcaires aquifères généralement exploitées en Beauce.

Des apports argilo-sableux se développent sur le Gâtinais, à l'est, indiquant des influences alluviales. Des épaisseurs maximales de 30 m y sont atteintes. En Beauce, la formation perd son caractère de molasse argilo-sableuse et montre un faciès relativement constant d'argile et de marne verte.

A l'ouest de la faille de Sennely, la formation essentiellement argilo-marneuse se réduit à quelques mètres d'épaisseur et des lacunes se développent. En bordure ouest, l'épaisseur est fortement réduite (1 à 2 m.) au point que la formation n'est pas reconnue sur les cartes géologiques. La structure au toit est très voisine de celle du toit du Calcaire d'Etampes.

XI. LE CALCAIRE DE PITHIVIERS (Aquitanién).

La limite d'extension du Calcaire de Pithiviers est souvent une limite d'érosion. Les limites paléogéographiques sont difficiles à établir. Les épaisseurs varient de 20 à 40 m sans concentration particulière. Cette relative homogénéisation marque une accalmie tectonique. Les calcaires, particulièrement hétérogènes, sont décrits comme massifs, indurés, tendres, crayeux, siliceux, grumeleux à bréchiques, parfois fossilifères, oolithiques, travertineux,

vermiculés. La structure au toit indique toujours une gouttière ouverte sur la Sologne, avec une fosse bien marquée au nord de Châteauneuf-sur-Loire et une autre moins marquée sur Orléans.

XII. LES MARNES DE BLAMONT (Aquitaniennes).

L'extension est fortement réduite par rapport au Calcaire de Pithiviers. Au nord et au nord-est, les contours sont des limites d'érosion affleurantes. Une épaisseur maximum de 18 mètres est notée en bordure orientale. Une étude très détaillée sur l'Orléanais fait apparaître que les dépôts burdigaliens érodent les Marnes de Blamont et s'incisent dans les Calcaires de Pithiviers.

La formation est une alternance d'argile et de calcaire marneux. Vers l'Ouest, la formation perd de l'épaisseur et s'enrichit en calcaire.

XIII. MARNE ET CALCAIRE DE L'ORLEANAIS (Burdigalien).

L'aire d'extension se limite au sud de la Beauce. Les argiles vert-sombre, les argiles à concrétions, nodules et rognons calcaires beiges et les marnes vertes à jaunâtres sont présentes sur l'ensemble du domaine. Les massifs calcaires se développent de façon aléatoire sous forme de faciès variés crayeux ou indurés, parfois meulièrement, à tous niveaux de la formation.

L'épaisseur atteint un maximum de 20 mètres vers Loury.

XIV. FORMATIONS DETRITIQUES DE L'ORLEANAIS ET DE SOLOGNE (Miocène moyen).

Les dépôts fluviatiles argilo-sableux des Marnes et sables de l'Orléanais auxquels succèdent les Sables et argiles de Sologne, entaillent les formations de Beauce depuis le Gâtinais jusqu'à l'Orléanais. L'incision affecte tous les dépôts tertiaires précédents.

L'examen de la carte d'altitude de la base de l'incision montre que plusieurs nappes alluviales s'emboîtent : une ancienne au-dessus de la cote +120 m, une plus récente vers +110 m. La présence de points hauts dans le substrat calcaire laisse supposer un système de chenaux encaissés.

Références bibliographiques

BRGM (1980) - Synthèse du bassin de Paris, publiée sous la direction de Claude Mégnien, en 3 vol. *Mémoires du BRGM*, n° 101, 102, 103.

Caudron M., Desprez N., Martins Cl., Rampon G. (1973) - Mise en valeur et exploitation des données acquises sur la nappe des Calcaires de Beauce en vue de la réalisation d'un modèle mathématique de simulation en régime transitoire. Rap. BRGM 73 SGN 365 BDP, 30 p., 6 pl., 5 annexes.

Caudron M., Desprez N., Martins Cl., Rampon G., Vandenbeusch M. (1975) - Elaboration et exploitation d'un modèle de gestion de la nappe des Calcaires de Beauce. Rap. BRGM 75 SGN 166 BDP, 38 p., 14 pl., 8 annexes.

Caudron M., Desprez N., Rampon G., Rousselot D., Viot A. (1971) - Mise en valeur et exploitation des données acquises sur la nappe des Calcaires de Beauce. Première phase : réalisation d'un modèle mathématique de simulation des écoulements bidimensionnels en milieu poreux, en régime permanent. Rap. BRGM 71 SGN 331 BDP, 26 p., 12 pl., 4 annexes.

Desprez N., Mégnier Cl. (1975) - Atlas hydrogéologique de la Beauce. 71 p., 2 pl., 1 annexe.

Gély J.P., Lorenz C. (1991) - Analyse séquentielle de l'Eocène et de l'Oligocène du Bassin parisien (France). Revue de l'Institut Français du Pétrole, vol. 46, n° 6, novembre-décembre 1991, pp. 713-745, 20 fig., ref. bib.

Giot D., Le Nindre Y.M. et Martin J.C. (1999) – Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce. Géométrie du réservoir et limites de la nappe de Beauce. Rap. BRGM R 40571, 39 p., 4 tabl., 79 fig. (volume séparé).

Maget Ph. (1995) - Piézométrie du système aquifère de Beauce. Basses eaux 1994. Rap. BRGM R 38572, 33 p., 8 fig., 1 tabl., 3 annexes, 2 pl.

Mégnier Cl. (1979) - Hydrogéologie du centre du Bassin de Paris. *Mémoire BRGM* n° 98.

Ménillet F. (1980) - Les lithofaciès des Calcaires de Beauce (Stampien supérieur et Aquitanien) du bassin de Paris (France). *Bulletin du BRGM* (deuxième série), section IV, n° 1, 1980-81, pp. 15-55, 16 fig., 5 pl. photo.

Perrodon, Zabeck, 1990

Studer H. (1995) - Nappe de Beauce : acquisition des données préalables à la constitution d'un outil de gestion. 29 p., 3 annexes.

Rapport BRGM (N 0306) – Etude hydrogéologique du bassin de la Conie (Eure-et-Loire) - (septembre 1993).

Rapport ANTEA (A02241) – Bassins de la Bezonde, de l'Huillard, du Puiseaux, du Solin, du Vernisson et du Talot. Hydrogéologie, hydrologie, exploitation des ressources en eau (D. Rousselot – février 1995).

Rapport HORIZONS (V5602) – Etude globale du bassin versant du Fusain – (février 1997).

FORMATIONS	MILIEU DE DEPOTS ET TECTONIQUE	ETAGES LOCAUX	AGE
Sable et argile de Sologne	Fluvatile	Miocène, <i>Langhien-Serravalien</i>	-16 MA
Marne et sable de l'Orléanais	Fluvio-lacustre	Miocène, <i>Burdigalien</i>	-20 MA ?
Discontinuité	Lacune, formation du réseau fluvial préligérien, surrection du Massif Central		?
Marnes et calcaire de l'Orléanais	Lacustre résiduel	Miocène, <i>Burdigalien</i>	-20 MA ?
Marne de Blamont	Lacustre restreint	Miocène, <i>Aquitainien</i>	
Discontinuité			?
Calcaire de Pithiviers	Lacustre généralisé Faille de Sennely active	Miocène, <i>Aquitainien</i>	
Molasse du Gâtinais Marne de Voise	Lacustre généralisé, apports fluviaux du sud-est en Gâtinais, faille de Sennely active	Miocène, <i>Aquitainien</i>	-23,5 MA
Discontinuité	Lacune	Oligocène, <i>Chattien</i>	-23,5 à -28 MA
Calcaire d'Etampes	Lacustre généralisé, formation d'un seuil sur la Seine, le bassin de la Beauce est indépendant, failles de Sennely et Beaune-la-Rolande actives	Oligocène, Rupélien, <i>Stampien supérieur</i>	-28 MA
Discontinuité	Retrait de la mer		?
Sables de Fontainebleau	Marin littoral, dunaire, au nord	Oligocène, Rupélien, <i>Stampien supérieur</i>	-32 MA ?
Marnes à huîtres, Molasse d'Etrechy	Lagunaire au nord, faille de Sennely active	Oligocène, Rupélien, <i>Stampien inférieur</i>	
Discontinuité	Transgression marine 3 au nord	<i>Stampien inférieur</i>	?
Calcaire de Brie	Lacustre au nord-est ouvert vers la Beauce, faille de Sennely active	Oligocène, Rupélien, <i>Stampien inférieur</i>	
Argile verte de Romainville	Lacustre, lagunaire au nord-est	Oligocène, Rupélien, <i>Stampien inférieur faciès Sannoisien</i>	-34 MA
Marnes supragypseuses	Lagunaire au nord-est	Eocène, Priabonien (<i>Ludien supérieur</i>)	-34 MA
Discontinuité	Transgression marine 2 venant d'Ile de France, au nord-est	<i>Ludien supérieur</i>	
Calcaires éocènes : Briare(2), Landon(2), Champigny(2), Morancez(2), Villeau(2), calcaires détritiques (1)	Laguno-marin (1) au nord et fosse de Pithiviers en liaison avec la mer lutétienne puis lacustre généralisé (2) activité des failles de Sennely et Beaune-la-Rolande, fosse reliée à l'Ile de France	Eocène, Bartonien (<i>Ludien moyen</i>) à Lutétien	-37 MA
Discontinuité	Transgression marine 1 au nord, formation du bassin lacustre au sud, incursions marines dans les fosses de Pithiviers et de Sennely, forte activité de Sennely et Beaune-la-Rolande	Lutétien	-46 MA
Arkose de Breuillet	Fluvatile	Eocène, Yprésien	-46 à -53 MA
Formations détritiques éocènes	Fluvatile, paléosol, forte activité tectonique dont faille de Sennely	Paléocène, <i>faciès sparnacien</i>	
Argile à silex	Paléosol, altérite	Paléocène	
Discontinuité	Continentalisation, érosion, altération	Crétacé terminal à Paléocène	-60 à -70 MA
Craie	Marin	Crétacé supérieur, Turonien à Sénonien	

Chronologie stratigraphique des dépôts sédimentaires de la Beauce

Réalimentation du « calcaire de Beauce » à travers les « sables et argiles de Sologne »

Philippe Olive
olive87@wanadoo.fr

La Sologne est une région naturelle du Bassin Parisien comprise entre le Val de Loire au N., le Sancerrois à l'E., le Berry au S. et la Touraine à l'W. C'est un plateau qui descend en pente douce vers l'W. et dont les eaux s'écoulent médiocrement par le Cosson, le Beuvron et la Sauldre. L'imperméabilité, relative, des sols explique la présence d'environ 3 000 étangs.

On a coutume de considérer que le substratum régional est constitué par la Craie. Il est surmonté par environ 100 m de dépôts lacustres (Eocène à l'Aquitainien): le **calcaire de Beauce** qui constitue le seul aquifère économiquement exploitable pour l'A.E.P. et l'agriculture. Ces calcaires sont intensément fracturés et leur base, vacuolaire, s'est révélée fortement productive. Le calcaire de Beauce est recouvert par 30 à 50 m de dépôts détritiques (Mio-Pliocène): les **argiles et sables de Sologne** formant, tel un millefeuille, un ensemble semi-perméable.

En 1998 la D.I.R.E.N. a retenu 10 forages, d'une centaine de mètres de profondeur, en cours d'exploitation et dont les eaux sont sans tritium (< 1 U.T.) et sans nitrates (< 2 mg/L). Leur localisation est reportée sur la figure suivante :

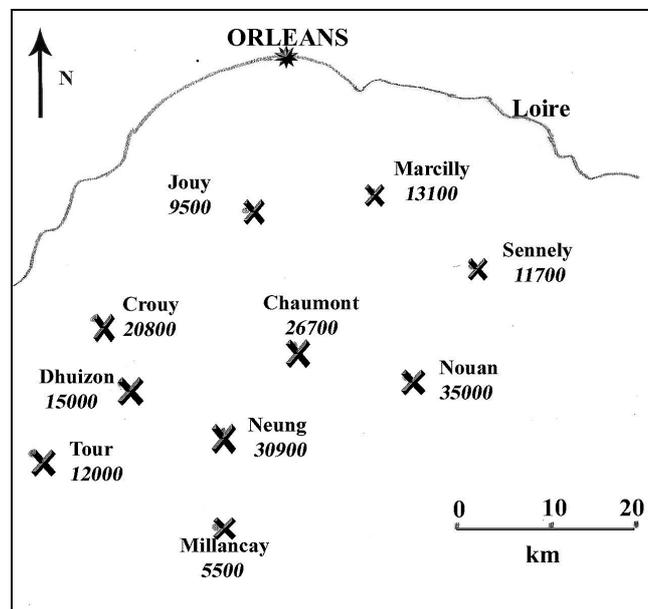


Figure 1- Localisation, en Sologne, de 10 forages dans le calcaire de Beauce et temps de séjour moyen des eaux en années.

Les résultats des analyses ^{14}C et ^{18}O sont reportés sur le tableau suivant :

Nouan-le-Fuzelier (430/7/3)	35 000 ± 7 400	-7.5 ‰
Neung-sur-Beuvron (429/8/14)	30 900 ± 2 700	-8.1 ‰
Chaumont-sur-Tharonne (430/2/1)	26 700 ± 4 200	-7.6 ‰
Crouy-sur-Cosson (429/3/3)	20 800 ± 2 100	-7.9 ‰
Dhuizon (429/7/1)	15 000 ± 2 200	-7.7 ‰
Marciilly-en-Vilette (398/7/1)	13 100 ± 1 500	-7.4 ‰
Tour-en-Sologne	12 000 ± 1 200	-7.7 ‰
Sennely (430/4/8)	11 700 ± 1 100	-7.4 ‰
Jouy-le-Potier (398/5/6)	9 500 ± 1 000	-7.5 ‰
Millancay (460/4/1)	5 500 ± 1 000	-7.5 ‰

Tableau 1- Ages ^{14}C calibrés (en années BP) et teneurs en ^{18}O (en ‰),
 des eaux de la nappe captive des calcaires de Beauce sous la Sologne

On est en présence d'eaux anciennes dont le temps de séjour moyen est compris entre 5 000 et 35 000 ans. La teneur en ^{18}O des eaux traduit une recharge qui s'est effectuée sous des températures plus froides que l'actuelle. En effet, la teneur des précipitations à Orléans a été de -6,8 ‰ en 1997.

Le fait que l'exutoire naturel de la nappe soit constitué par la Loire et le Cher, entraîne, compte tenu de l'écoulement souterrain qui a lieu de l'E. vers l'W, à rechercher la recharge dans la zone orientale. Comme le calcaire de Beauce n'y affleure pas et que de plus il y est sous un faciès marneux, on est amené à envisager le réalimentation par une drainance verticale à travers les sables et argiles semi-perméables de Sologne. Vers l'W. la drainance, sur un trajet plus court à travers les argiles, rajeunit l'eau qui s'écoule à la base productive des calcaires.

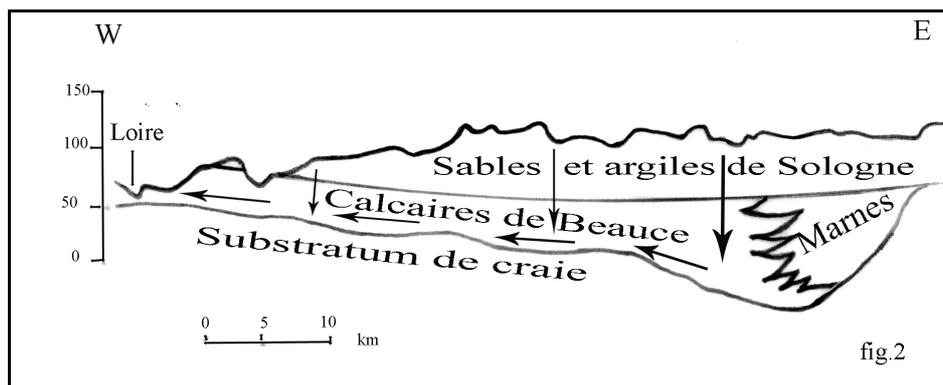


Figure 2 - Coupe hydrogéologique W./E. de la Sologne. Seule une drainance à travers les sables et argiles permet la réalimentation de la nappe captive des calcaires de Beauce

Cette vitesse, per descensum, est très faible : de l'ordre du **mètre par millénaire**, c'est-à-dire environ mille fois plus lente que la vitesse horizontale de l'écoulement dans les grandes nappes captives de l'Albien ou du Cénomaniens.

L'élaboration d'un modèle mathématique de gestion de la nappe de Beauce : enjeux, difficultés, résultats et perspectives.

Marc Bonnet¹, Lionel Demongodin¹, Pascal Billault²

¹ HYDROEXPERT SA 53, rue Charles Frérot 94 250 Gentilly m.bonnet@hydroexpert.com

² Agence de l'Eau Loire-Bretagne Avenue de Buffon 45 063 ORLEANS Cedex 02

I INTRODUCTION, RAPPELS

I.1 Définition du système hydrogéologique de Beauce

La nappe de Beauce a fait l'objet de nombreuses études et rapports depuis les premiers inventaires systématiques réalisés dans le cadre du programme de service public IRH qui, pour la région concernée, ont débuté en 1966, Cl. Megnier étant à la tête du Service Géologique Régional Ile de France et N. Desprez en charge de l'antenne d'Orléans.

Les rapports produits par cette équipe sont d'autant plus importants qu'ils ont été établis à une époque, entre 1967 et 1969, où les prélèvements pour usage agricole étaient encore peu importants. Ils ont fourni le premier (et le plus complet et le plus synchrone) ensemble de données relatif à tous les aspects du fonctionnement des aquifères qui composent ce qui est apparu dès alors comme un « système multicouche à surface libre » (Margat,[2]), composé d'un empilement d'aquifères d'importance et de présence variables selon les secteurs. En préliminaire à toute modélisation il importe d'en donner une définition précise et fixe. Nous présentons ci-après celle qui a été admise en conclusion de l'étude hydrogéologique de synthèse effectuée par le BRGM en 1999 [3] dans le cadre des études préalables au modèle.

Comme il se doit pour satisfaire à la définition de système hydrogéologique, le domaine concerné est circonscrit par des limites hydrauliquement stables, quelles que soient les conditions prévalant à l'intérieur, de telle sorte que toute influence engendrée par ces conditions intérieures (en particulier les prélèvements) ne peut se propager au-delà des limites du système.

La figure 1 précise la délimitation retenue. La plupart des limites sont des cours d'eau dont le régime hydrologique est pour la plus grande part peu dépendant de leur relation avec la nappe et qui imposent donc une condition de charge pouvant être considérée comme fixe en regard des fluctuations de niveau des aquifères constitutifs du système. Soit, en tournant du nord au sud et d'est en ouest : la Seine et ses affluents de rive gauche, l'Orge et le Remarde, l'Eure et son affluent de rive droite, la Drouette, le Loir, la Loire entre le canal de Briare et son affluent de rive droite la Cisse (incluse), le Loing en aval du canal de Briare. La fermeture est assurée par des sections de limites imperméables dont le tracé correspond, soit, le plus souvent, à des limites d'extension de couches aquifères, soit à des lignes de crête piézométrique sans doute stables et de toute façon de longueur très réduite.

Ainsi défini, le système hydrogéologique de Beauce (dénommé par la suite sous le terme résumé de « nappe de Beauce ») couvre une surface de 9600 km² et concerne en tout ou

majeure partie 29 feuilles de la carte géologique au 1/50 000 ; ce qui en fait le plus grand système multicouche à surface libre de France.

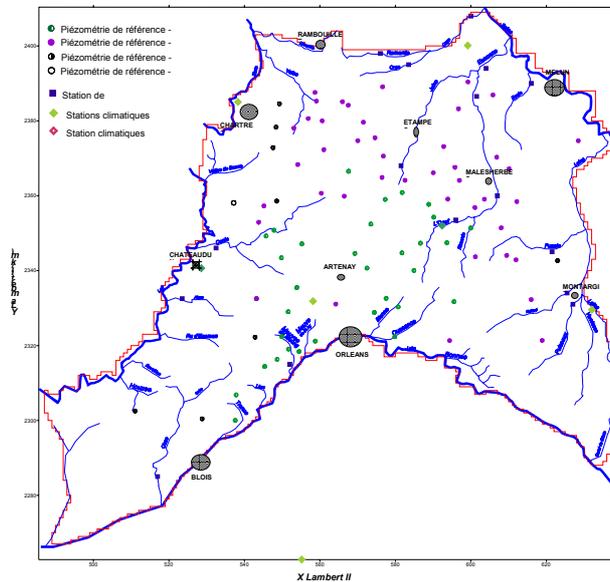


Figure 1- Extension, maillage, limites et conditions aux limites du modèle

I.2 Les études préliminaires à la modélisation : contenu et résultats

En préalable à l'opération de conception et de réalisation du modèle mathématique d'un système de cette taille, l'Agence de l'Eau Loire Bretagne a fait réaliser une série d'études dites préliminaires, en vue de rassembler les données et informations les plus précises et les plus actualisées sur les différents points dont la connaissance paraissait nécessaire pour garantir la meilleure représentativité du modèle (voir bibliographie [3] à [9]).

II ENJEUX ET OBJECTIFS DU MODELE

II.1 Contexte socioéconomique : les enjeux

Les prélèvements pour irrigation se sont développés au début des années 60 puis intensifiés après la sécheresse de 1976. La figure 2 présente l'évolution du prélèvement global pour irrigation sur la période 1986 à 2000. Depuis les années 80, ce prélèvement varie de 200 à 450 millions de m³ par an et représente à peu près le quart de l'apport par la recharge naturelle (en moyenne 1500 millions) et près de 4 fois les prélèvements pour l'AEP et l'eau industrielle (estimés à 100 millions de m³).

Le niveau de prélèvement atteint et son rythme rapide de développement ont provoqué des effets significatifs et visibles sur les variables essentielles de comportement de la nappe

comme : les niveaux piézométriques des aquifères majeurs et les débits des cours d'eau internes du système qui pour la plupart sont des émergences de l'écoulement souterrain.

Ces effets sont évidemment négatifs pour les usagers et donc cause de conflits entre eux. Pour limiter ces conflits sans pour autant porter atteinte à l'activité agricole de la région qui est sa principale richesse, l'Administration a, sous l'autorité du Préfet, édicté une réglementation des prélèvements agricoles qui fixe annuellement, avant le début de chaque campagne d'irrigation des quotas à respecter par les agriculteurs selon l'état de la nappe apprécié au travers d'un indicateur piézométrique global (cf. figure 2) représentant l'état des réserves de la nappe en fin d'hiver.

L'enjeu de la construction d'un modèle mathématique est de préciser le volume global attribué et d'en effectuer une éventuelle régionalisation.

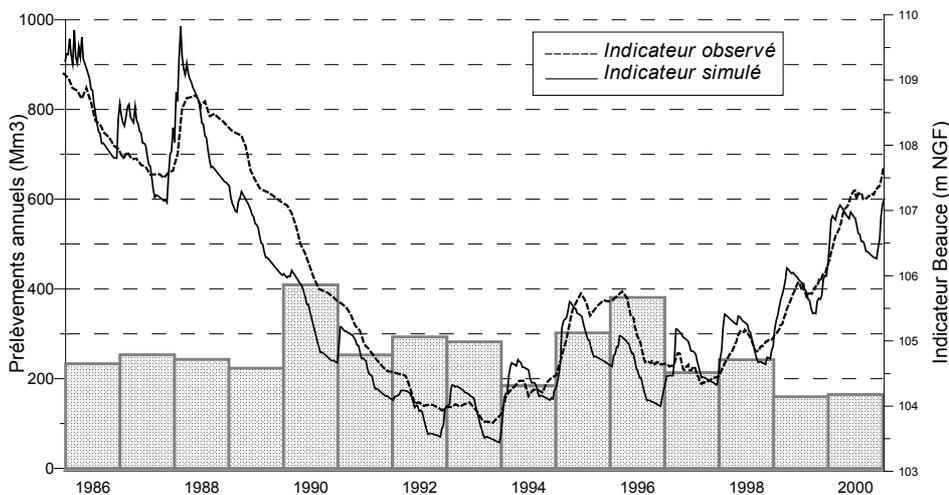


Figure 2 – Variation de l'indicateur Beauce et des débits prélevés pour l'irrigation entre 1986 et 2000 (d'après étude ANTEA ref [4])

II.2 Objectifs de la modélisation

L'objectif principal du modèle de gestion de la nappe de Beauce est de déterminer, chaque année, le volume d'eau exploitable dans la nappe en fonction d'un état piézométrique initial en fin d'hiver, d'un objectif de niveau piézométrique plancher à l'étiage et d'objectifs de débits dans les rivières drainantes.

Pour ce faire, le modèle doit être :

- Multicouche comprenant tous les aquifères drainés par les cours d'eau internes soit depuis la craie (comprise) jusqu'aux sables du Mio-Pliocène
- A surface libre pour ce qui concerne l'aquifère le plus superficiel du système qui diffère selon l'endroit, captif pour les autres jusqu'à la craie en substratum général
- Transitoire avec un pas suffisamment fin pour représenter précisément les variations de la recharge, des prélèvements saisonniers ; et donc de niveau et débits induits.
- Représentatif avec précision et sans distorsion des phénomènes de débordement et le cas échéant de l'assèchement de certaines zones d'aquifère.

III DIFFICULTES RENCONTREES

III.1 Difficultés attendues

Structure

La structure multicouche mise en évidence par les études hydrogéologiques de Desprez [1] et parfaitement définie par l'étude litho-stratigraphique du BRGM, a été scrupuleusement respectée.

La coupe figure 3 résume cette structure et définit les aquifères et semi-perméables qui ont été définis et délimités. Les isohypses des murs et toits des aquifères ont été saisies directement à partir de la grille de valeurs interpolées par SURFER au pas kilométrique.

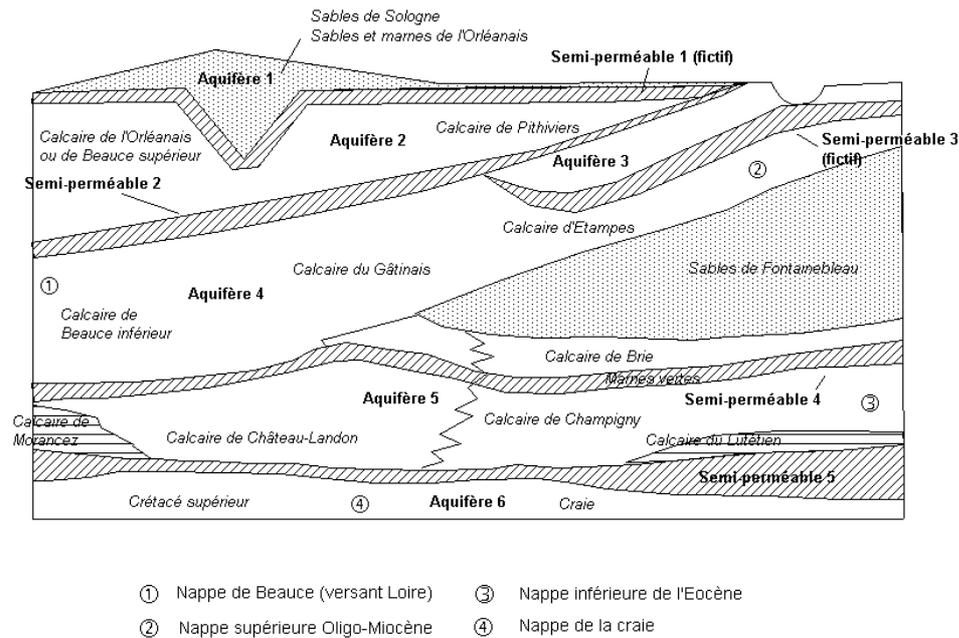


Figure 3 - Structure hydrogéologique du système de Beauce

Taille du domaine et maillage

Un maillage carré au pas kilométrique correspondant au maillage Lambert a été retenu car c'est celui qui permet le repérage le plus facile et donc la saisie la plus directe et la moins susceptible d'erreur de toutes les données spatiales : en particulier zones de recharge, prélèvements pour l'irrigation.

Pour les données nécessitant une plus grande précision d'implantation les mailles du réseau primaire de base ont été divisées en sous mailles de 333 m de côté. En définitive on a obtenu en fin de phase de calage un maillage comportant au total 45650 mailles

Débordements

Le débordement d'une nappe libre par intersection de sa surface piézométrique avec la topographie est un phénomène à la fois très localisé et une singularité (terme non linéaire de l'équation d'écoulement) qu'il faut traiter sur une maille de dimension aussi faible que possible et au moyen d'un algorithme adapté à la finesse de discrétisation.

Les conditions particulières de débordement des cours d'eau drainant les calcaires de Pithiviers et de Beauce, caractérisées par une très faible pente des vallées et de la piézométrie, ont nécessité d'améliorer l'algorithme de traitement de la singularité de débordement pour obtenir une balance parfaite de la solution.

III.2 Quelques problèmes plus spécifiques et/ou moins courants

Modèle conceptuel : la présence de réseaux « karstiques » dans les aquifères calcaire superficiels déjà noté par N. Desprez [1] est apparue comme déterminante pour le comportement de la piézométrie et a donc dû être traité selon un modèle conceptuel adapté. La méthodologie déjà mise en œuvre pour représenter les écoulements souterrains en Val de Loire [13] a été retenue.

Imposition des conditions de prélèvement : elle a nécessité une programmation spécifique pour saisir des historiques au pas décadaire sur plus de 7000 mailles

Stratégie de calage : Les tentatives de calage en régime permanent moyen ont démontré que le système n'atteint jamais son équilibre en basses eaux . En revanche c'est possible dès que la recharge devient telle que les débordements constituent une part prépondérante du bilan. La stratégie de calage a donc dû être adaptée et a consisté en un calage en régime permanent moyen de hautes eaux puis en régime transitoire allant d'une situation de hautes eaux jusqu'à une situation de basses eaux extrême. (période 1986 –1995)

Gestion des assèchements : dans un système multicouche de structure aussi complexe il est inévitable que de larges zones des couches aquifères affleurantes se trouvent dénoyées : soit parce qu'elles font l'objet de prélèvements trop forts, soit parce qu'elles subissent l'influence, par drainance des couches inférieures, soit parce que les paramètres attribués sont irréalistes.

Or l'assèchement d'une maille, dans un schéma de représentation quasi tridimensionnel, est une singularité qui si elle est mal traitée peut , au mieux, fausser le bilan de la maille concernée et, au pire, provoquer une instabilité et donc une interruption du calcul.

Pour pallier ces deux défauts rencontrés en cours de calage, avec un modèle utilisant l'algorithme classique tiré du logiciel MODFLOW, il a été nécessaire de développer un algorithme basé sur une méthode de linéarisation plus rigoureuse et mieux adaptée qui garantit désormais convergence stabilité et équilibre de balance même avec des conditions d'assèchement sévères, sauf (il n'y pas de miracle) si l'assèchement de la maille est dû à un prélèvement sur la maille elle-même au-delà de ce qu'autorise sa perméabilité.

IV RESULTATS

IV.1 Paramètres

L'essentiel du calage a porté sur le positionnement des réseaux karstiques dans les deux couches calcaires à écoulement libre. Ces réseaux ont été représentés par des mailles (divisées pour la plupart) à très forte perméabilité avec, pour certaines, imposition d'une condition de débordement.

La figure 4 donne, à titre d'exemple, la répartition des perméabilités et la représentation du réseau karstique dans le calcaire de Pithiviers qui est l'aquifère le plus affecté par la karstification.

IV. 2 Piézométrie

Le calage en régime permanent a été conduit en se basant sur la situation moyenne des trois années de 1983 à 1986 afin d'obtenir un niveau de départ bien calé sur un réseau de 55 piézomètres et sur l'indicateur qui est une moyenne pondérée des niveaux sur 9 d'entre eux.

Le calage en régime transitoire a été basé sur la reproduction des évolutions piézométriques de ce même réseau sur la période 1986-2000. Les conditions de recharge et de débit ont été imposées au pas décadaire. La comparaison entre l'évolution de l'indicateur piézométrique calculé et observé est donnée figure 2.

IV.3 Débordements (drainage interne)

Les débits de débordement calculés par mailles ont été regroupés de manière à correspondre aux sections de cours d'eau drainées par les stations de jaugeage de référence.

La figure 5 donne un exemple d'hydrogramme simulé. La dynamique est très bien représentée ce qui confirme la bonne adéquation du pas de temps retenu (10 jours). En règle générale les pics de débit simulés sont moins accentués que ceux observés ce qui est normal puisque le modèle suppose que le ruissellement est négligeable. Les bas débits sont en conformité acceptable avec les observations et en effet sensibles comme sur le terrain aux variations de la recharge et des prélèvements.

Si bien qu'il est impossible de déterminer l'origine de l'erreur de calage : mauvaise estimation des paramètres de structure, de la recharge, ou des prélèvements (connus avec une précision de l'ordre de 20 % au mieux) ; et l'on peut considérer que le modèle représente le phénomène de débordement au mieux en regard de la précision des données disponibles.

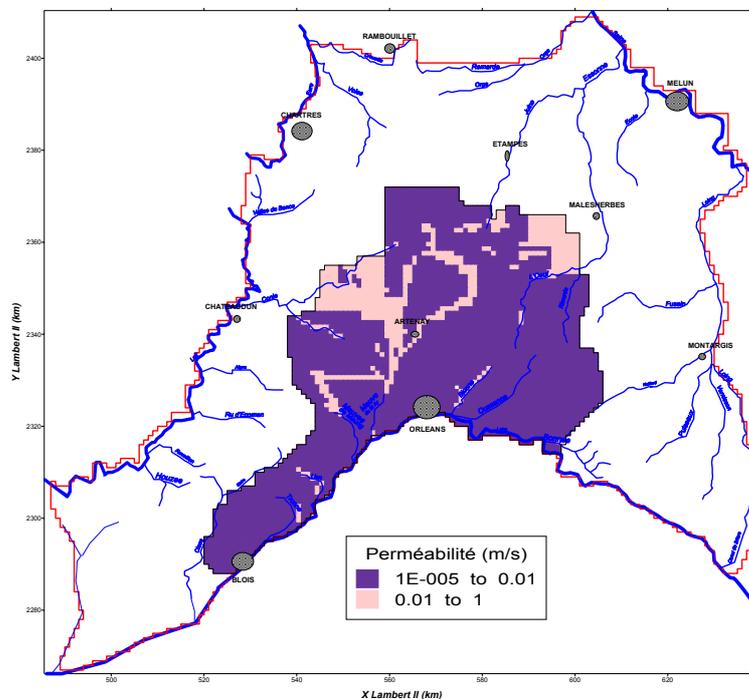


Figure 4 – Répartition des perméabilités et localisation des chenaux karstiques dans le calcaire de Pithiviers

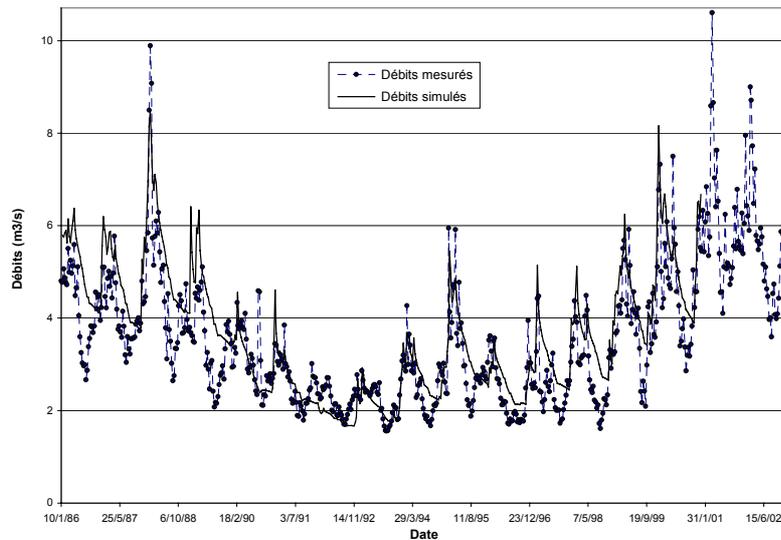


Figure 5 – Débits drainés à la station de Guigneville (observés et simulés)

IV.4 Bilans

Le modèle donne le bilan pour chaque maille et permet tout regroupement envisageable. En pratique pour les besoins du calage et de la synthèse des résultats les bilans ont été systématiquement établis par regroupement en (5) aquifères .

Le tableau 1 donne les bilans obtenus pour une année humide (1999) , pour une année sèche (1990) et pour une année moyenne (1997).

V PERSPECTIVES

Le modèle obtenu au terme de la phase de calage est actuellement exploité en simulation sur quatre scénarios de bases :

1. Partant d'un indicateur à 104 m en fin de période hivernale, quels rabattements induiraient des prélèvements de 200, 400 et 600 Mm³ ?
2. Même question mais à partir d'un indicateur à 108 m.
3. A partir d'une cote indicateur à 106 m quel serait l'impact de 5 années de recharge hivernale moyenne et d'un prélèvement annuel pour l'irrigation de 200 Mm³ ?
4. A partir d'une cote indicateur à 107 m quel serait l'impact d'une série de 5 années identiques à l'année 1999 (recharges hivernale forte et prélèvements agricoles faibles) ?

Le dépouillement et l'analyse des résultats (en cours) permettront d'apprécier le comportement et les capacités de la nappe pour des situations contrastées, aussi bien en termes de recharge hivernale que de prélèvement et ainsi de proposer :

- un programme de simulations complémentaires afin de préciser les conditions et la répartition des situations d'étiage ou, au contraire, de forte crue (zones d'assèchement ou de débordement),
des règles de gestion des prélèvements agricoles, objectif final de la modélisation.

Références bibliographiques

- [1] M. Caudron, N. Desprez, 1969 - Etude hydrogéologique du calcaire de Beauce, Synthèse géologique et bilan. BRGM 69 SGL 149 BDP
- [2] J. Margat , 1978 - Nouvelle légende de la carte hydrogéologique. BRGM 78 SGN 473 HYD
- [3] Géométrie du réservoir et limites de la nappe de Beauce, 1999 – BRGM R 40571
- [4] Connaissance des prélèvements, 2000 - ANTEA A 19374/A
- [5] Volet hydrométrie – Hydrologie , 1999 – CACG
- [6] Topographie des principaux exutoires de la nappe de Beauce , 1999 DIREN hydrométrie Jaugeages
- [7] Base de données forages et points d'eau , 2000 – ANTEA A17351/B
- [8] Caractéristiques de l'aquifère , 2000 – BRGM/RP-50348-FR
- [9] Etude de la recharge de la nappe de Beauce – Esquisse cartographique des réserves utiles potentielles en eau des sols - INRA
- [10] Piézométrie du système aquifère de Beauce : basses eaux 1994 , 1995 – BRGM R38752
- [11] Piézométrie de la nappe de Beauce. Bilan du réseau piézo. Etat corrigé de hautes eaux 1986, 1999 – BRGM R 40739
- [12] Nappe de Beauce – piézométrie hautes eaux du printemps 2002, 2003 DIREN I. de F. et Centre.
- [13] C. Zunino, M. Bonnet, F. Lelong . Le Val d'Orléans : un exemple d'aquifère karstique à alimentation latérale, 1980 –C.R. somm. Soc. Géol. Fr. fasc 5 p.195 199.
- [14] Reprise du modèle de gestion de la nappe de Beauce ; calage en régime permanent et transitoire, 2004 HYDROEXPERT RP03M046B.

Couche 1	Termes du bilan	1990 - année sèche		1997 - année moyenne		1999 - année humide	
		Entrées	Sorties	Entrées	Sorties	Entrées	Sorties
Sables et argiles de Sologne	Emmagasinement	167.18	-26.29	116.06	-80.57	87.90	-178.71
	Echange vertical couche inférieure	46.30	-165.60	38.47	-123.43	42.38	-123.75
	Puits injection et pompage	0.00	-3.72	0.00	-2.31	0.00	-1.67
	Recharge	44.35	0.00	104.00	0.00	233.93	0.00
	Mailles à charges imposées	0.00	-34.14	0.00	-27.66	0.00	-27.65
	Mailles à débordement	0.00	-28.07	0.00	-24.56	0.00	-32.43
	Bilan total de la couche 1	257.83	-257.83	258.53	-258.53	364.21	-364.21
Calcaires de Pithiviers	Emmagasinement	406.68	-103.64	259.41	-332.92	218.79	-637.67
	Echange vertical couche supérieure	73.78	-20.75	51.39	-16.51	54.09	-20.40
	Echange vertical couche inférieure	153.64	-342.23	114.05	-228.68	126.19	-250.36
	Puits injection et pompage	0.00	-113.49	0.00	-68.04	0.00	-52.57
	Recharge	133.18	0.00	397.71	0.00	825.21	0.00
	Mailles à charges imposées	7.51	-83.35	2.29	-73.16	1.71	-81.92
	Mailles à débordement	0.00	-111.35	0.00	-105.54	0.00	-183.06
Bilan total de la couche 2	774.79	-774.79	824.84	-824.84	1225.99	-1225.99	
Calcaires d'Etampes, de Brie et sables de Fontainebleau	Emmagasinement	432.75	-158.14	340.65	-355.23	309.67	-700.23
	Echange vertical couche supérieure	431.01	-179.19	297.56	-136.01	317.24	-148.12
	Echange vertical couche inférieure	135.03	-278.89	109.40	-213.83	109.81	-235.66
	Puits injection et pompage	0.00	-147.15	0.00	-86.40	0.00	-69.78
	Recharge	230.52	0.00	449.50	0.00	973.39	0.00
	Mailles à charges imposées	15.82	-90.23	8.33	-33.31	5.93	-39.01
	Mailles à débordement	0.00	-391.58	0.00	-380.70	0.00	-523.46
Bilan total de la couche 3	1245.13	-1245.17	1205.44	-1205.48	1716.04	-1716.25	
Calcaires éocènes	Emmagasinement	87.00	-79.64	84.76	-115.91	76.73	-216.78
	Echange vertical couche supérieure	250.32	-130.37	196.54	-105.83	216.64	-105.45
	Echange vertical couche inférieure	78.43	-149.85	73.07	-133.31	73.51	-152.77
	Puits injection et pompage	0.00	-50.58	0.00	-32.74	0.00	-26.26
	Recharge	86.09	0.00	118.73	0.00	239.06	0.00
	Mailles à charges imposées	50.03	-95.41	51.44	-88.80	50.42	-90.64
	Mailles à débordement	0.00	-46.63	0.00	-48.71	0.00	-65.58
Bilan total de la couche 4	551.86	-552.48	524.54	-525.30	656.36	-657.48	
Craie	Emmagasinement	227.94	-166.15	216.69	-209.56	174.28	-419.38
	Echange vertical couche supérieure	181.45	-83.10	153.76	-76.65	174.57	-77.93
	Puits injection et pompage	0.00	-156.26	0.00	-96.40	0.00	-81.23
	Recharge	180.11	0.00	226.81	0.00	502.97	0.00
	Mailles à charges imposées	161.16	-266.77	139.79	-295.99	133.58	-320.18
	Mailles à débordement	0.00	-78.39	0.00	-58.44	0.00	-86.69
	Bilan total de la couche 5	750.67	-750.67	737.04	-737.04	985.40	-985.40

Tableau 1 – Bilan du système de Beauce par couches pour trois années caractéristiques.

pour l'irrigation à raison de 150 à 450 millions de m³ en fonction de l'année climatique.

Au début de la décennie 90, les sécheresses hivernales ont engendré une alimentation naturelle très réduite de la nappe ; les sécheresses printanières et estivales qui ont suivi ont en outre provoqué une augmentation des pompages pour l'irrigation et à l'automne 1994 les niveaux les plus bas jamais observés ont été enregistrés.

Cette situation de basses eaux extrêmes ont été sans conséquences néfastes pour l'aquifère lui-même mais ont induit des tarissements de sources et de puits, des assèchs des cours d'eau drainants ou des débits insuffisants de ceux-ci.

Un programme d'études a été engagé pour mieux connaître la nappe (piézométrie, géométrie, alimentation, exploitation, sorties par les cours d'eau ...) et la modéliser ; l'objectif de ce programme est de déterminer, en fonction du niveau de la nappe, le volume exploitable qui permet de maintenir un débit satisfaisant dans les cours d'eau exutoires.

Le présent article traite du volet piézométrie et de son apport pour la gestion quantitative de cette ressource.

II. PIEZOMETRIE

Nous avons la chance de disposer d'une chronique de mesures piézométriques extraordinaire grâce au suivi de la sucrerie de Toury (28) depuis 1875 (figure 2). On y remarque que la nappe des calcaires de Beauce présente un cycle pluriannuel très marqué grâce à de fortes capacités d'emmagasinement dues à la puissance du réservoir et à l'absence de cours d'eau exutoires dans sa partie centrale ; elle peut ainsi faire face à quelques années de sécheresse grâce au stock réalisé lors d'années à pluviométrie hivernale excédentaire.

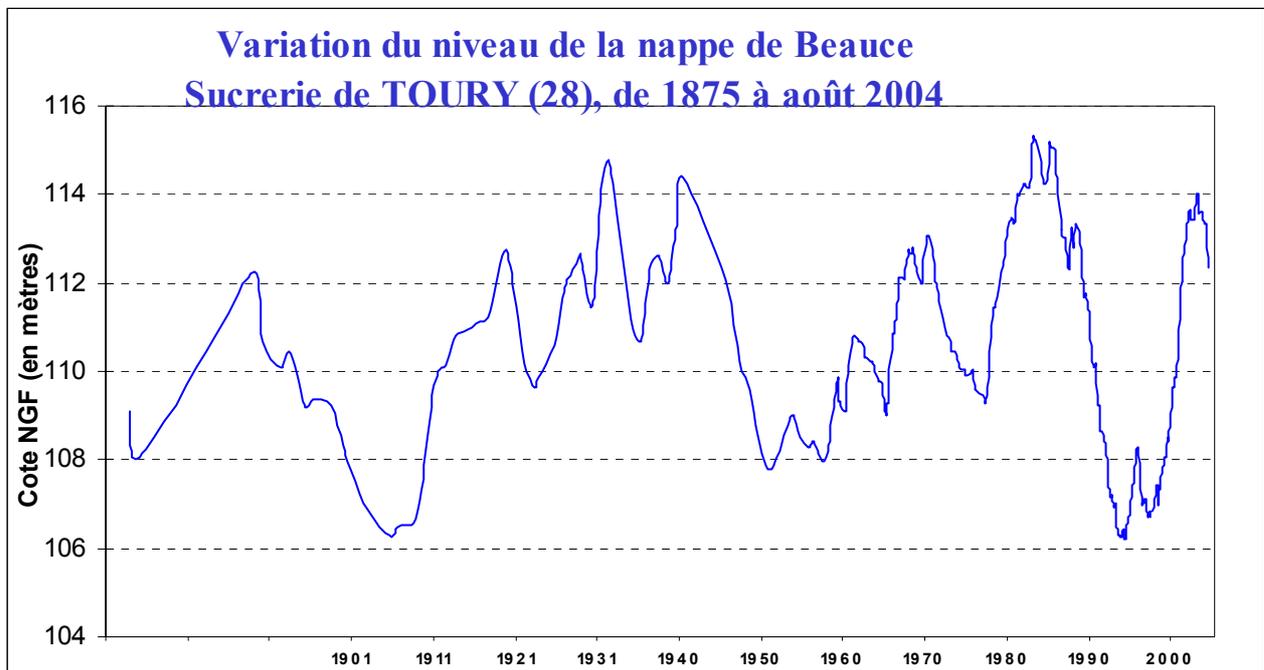


Figure 2 - Chronique piézométrique de Toury (DIREN Centre)

Au regard de cette chronique nous avons eu l'opportunité de réaliser les cartes piézométriques de cette nappe lors de deux de ses plus grands extrêmes jamais observés : en 1994 pour les basses eaux et en 2002 pour les hautes eaux (en 2002, de nombreux piézomètres dépassaient les plus hauts jamais observés de 1983).

Alors que l'amplitude moyenne annuelle de cette nappe est de l'ordre du mètre, l'amplitude

moyenne entre ces deux campagnes est de l'ordre de 6 mètres dans sa partie centrale (figure 3), ce qui reflète bien sa forte capacité de stockage.

Cette zone représentant environ 40 % de la surface totale, on obtient une mise en réserve dans le secteur concerné de quelques 300 millions de m³ par an entre les deux mesures pour un emmagasinement moyen de 10 %, ce qui est remarquable.

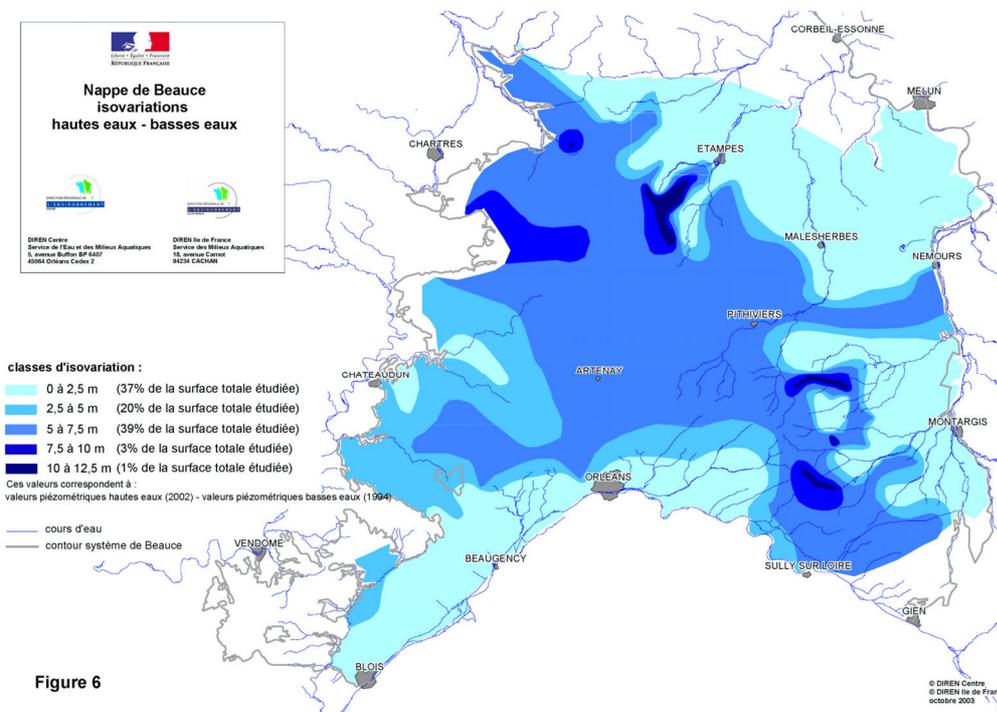


Figure 3 - Isovariations piézométriques 1994 / 2002

A titre anecdotique on confirme que la ligne de partage des eaux souterraines s'éloigne franchement de celle des eaux de surface dans la partie nord ouest du système : une partie des eaux souterraines des eaux du bassin Seine Normandie est ainsi drainée par la Loire et le Loir (figure 4).

Le système Beauce est suivi par un réseau de 86 piézomètres ; pour faciliter l'interprétation de cet ensemble et mieux communiquer avec les acteurs locaux, la DIREN Centre a établi un indicateur piézométrique calculé à partir de la valeur de 9 piézomètres pondérée respectivement par la surface des bassins versants souterrains dont ils sont représentatifs (figure 5).

La chronique de cet indicateur est disponible depuis 1974, mise à jour chaque semaine et accessible via internet sur le site de la DIREN ; elle synthétise remarquablement le fonctionnement de la nappe de Beauce et l'on distingue parfaitement le cycle pluriannuel, les deux extrêmes de 1994 et 2002 et l'importante variabilité de la recharge et des prélèvements.

Cet indicateur, admis par l'ensemble des acteurs, administration et usagers, constitue un formidable support pour la mise en œuvre de la gestion quantitative de la nappe.

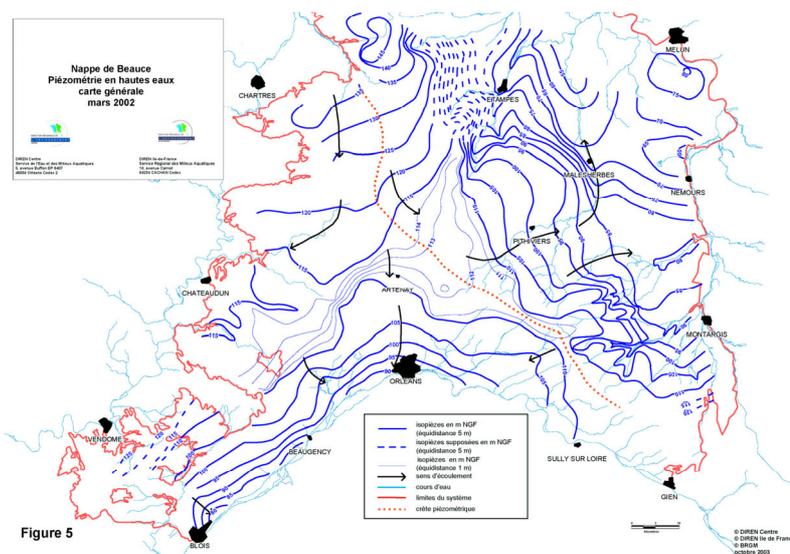


Figure 4 - carte piézométrique de la nappe de Beauce en hautes eaux 2003

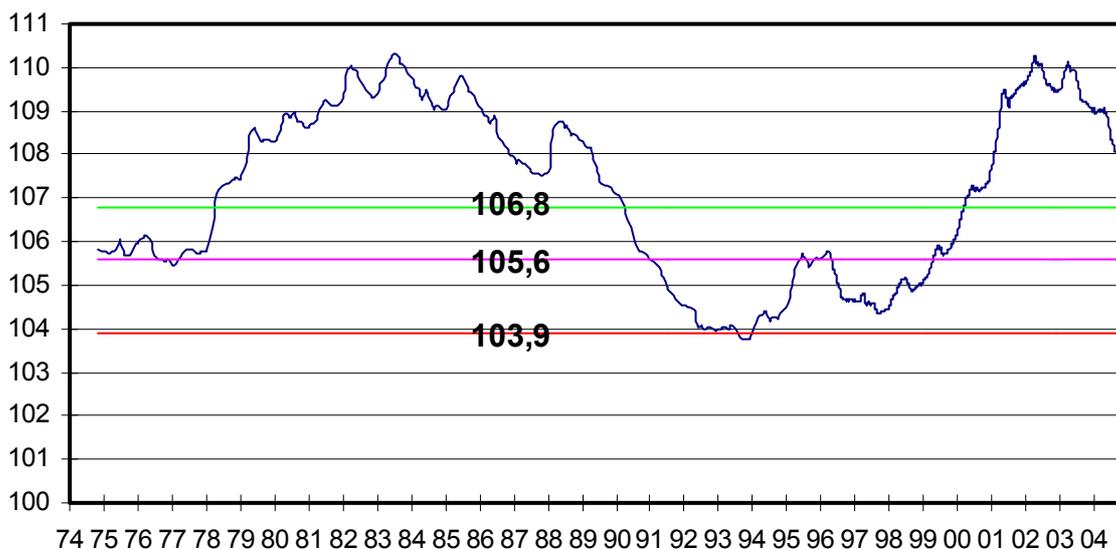


Figure 5 - Indicateur piézométrique de la nappe de Beauce (DIREN Centre)

III. GESTION

Parallèlement aux études de connaissance et de modélisation, la profession agricole et les administrations ont engagé en 1999 une démarche de gestion volumétrique de la nappe dont le principe est d'attribuer aux irrigants un volume garanti en début d'année en fonction du niveau de la nappe à cette époque ; il est entendu que le volume exploité pour l'AEP est lui aussi garanti et même prioritaire.

La gestion s'appuie sur l'indicateur piézométrique sur lequel sont surimposés 3 seuils d'alerte qui permettent de moduler le volume global attribué.

Les principales règles sont les suivantes :

Le volume global attribué pour l'irrigation est de 450 millions de m³ lorsque la nappe est au

dessus du premier seuil d'alerte en début d'année ; un coefficient réducteur de 0,9 et 0,8 est appliqué si la nappe a franchi à la baisse l'un ou l'autre des 2 premiers seuils à cette même date ; le troisième seuil (103,9) est considéré comme seuil de crise.

Ce volume est réparti pour chaque département en fonction de la S.A.U. des irrigants ; puis, dans chaque département, les professionnels agricoles ont choisi les clefs de répartition qui paraissaient les mieux adaptées pour attribuer un volume d'eau à chaque irrigant en fonction des types de sols, de la nature des cultures irriguées, des surfaces déclarées irriguées, etc.... Pour mieux gérer les aléas climatiques, un écart de plus ou moins 20 % sur le volume alloué est toléré, écart que l'irrigant reporte sur le volume de l'année suivante.

Ce système de gestion n'est possible que grâce à la très grande inertie de la nappe et son cycle pluri-annuel ; la garantie d'un volume en début d'année et le report d'une année sur l'autre ne sont en effet pas envisageables sur la plupart des autres nappes à cycle annuel.

Les conditions climatiques favorables de 1999 à 2002 ont permis de rôder le système de gestion et de retrouver les niveaux de plus hautes eaux de la nappe ; la sécheresse de 2003 s'est déroulée sans contraintes pour les pompages avec un volume attribué maximal.

Enfin, ce système de gestion ne peut bien entendu fonctionner de façon équitable et transparente que si chaque point de pompage est équipé d'un compteur volumétrique, ce qui est désormais le cas. L'analyse des données acquises à ce jour avec ce dispositif montre clairement qu'à pluviométrie estivale équivalente, les doses d'apport d'eau à l'hectare en maïsiculture ont significativement diminué depuis la mise en place de la gestion volumétrique (figure 6).

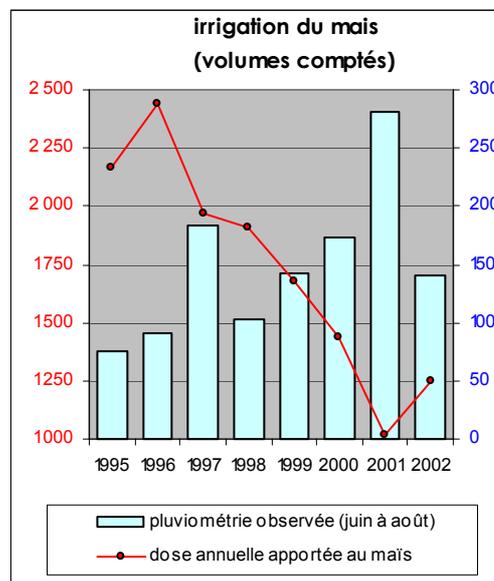


Figure 6 - Evolution des apports d'eau (en m³/ha) en maïsiculture en Beauce

La comparaison des années 97 et 2000 ou 99 et 2002 révèle bien l'impact positif de la mise en œuvre de la gestion volumétrique ; l'année 1999 était la première année de mise en place et peut être considérée à ce titre comme expérimentale.

La remontée des niveaux d'étiage de la nappe et des rivières drainantes est très nette grâce à des conditions climatiques certes favorables mais aussi à des économies d'eau substantielles (figure 7).

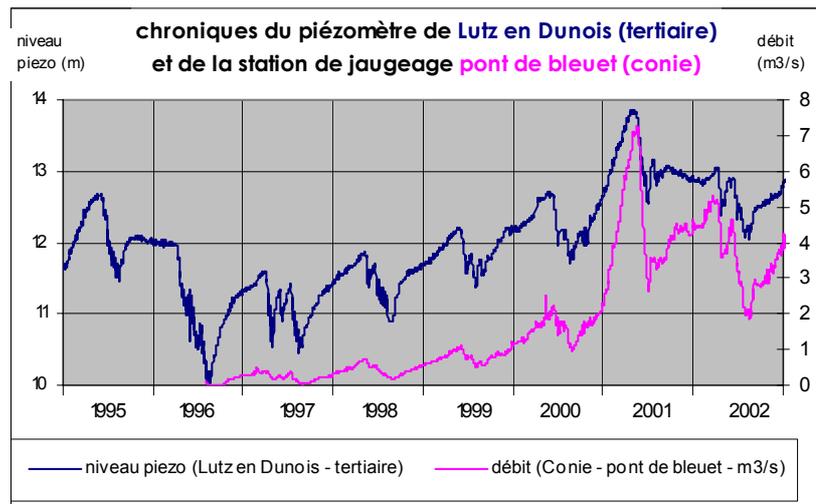


Figure 7 - Evolution comparée nappe / rivière du bassin de la Conie (28)

Le volume global attribué aux irrigants reste toutefois à affiner en fonction du résultat des études et des années d'observation.

IV. LE SAGE BEAUCE

Après le SAGE Gironde, premier du genre consacré exclusivement aux eaux souterraines et dorénavant approuvé, le SAGE Beauce trouve logiquement sa raison d'exister ; la problématique de gestion du complexe nappe / rivières a toutefois conduit la CLE (Commission Locale de l'Eau) à s'intéresser aux milieux souterrains et superficiels d'où sa dénomination de SAGE de la nappe de Beauce et des milieux aquatiques associés.

La CLE de 72 membres s'attaque donc simultanément aux problèmes d'inondations, de pollutions diffuses, de préservation des milieux naturels et de gestion quantitative pour ne citer que les priorités mises en avant dans le diagnostic.

En ce qui concerne la gestion volumétrique, après quelques années de fonctionnement, deux points importants seront à examiner :

- les mesures à prendre en cas de franchissement du seuil 3 (103,9 m NGF).
- les modalités de gestion dans le sud-est (bassin rive droite du Loing) où des assecs ont encore été observés à l'étiage en position de nappe haute sur l'indicateur.

V. CONCLUSION

La nappe de Beauce est une ressource remarquable qui permet de satisfaire de nombreux usages économiques et naturels ; le début des années 90, marqué par une succession de sécheresses hivernales et estivales, a néanmoins mis en évidence la nécessité d'une gestion quantitative au vu des impacts négatifs sur les milieux naturels associés à la nappe.

Avec pour support un indicateur piézométrique reflétant le comportement moyen de la nappe, une gestion volumétrique est opérationnelle depuis 1999 et permet d'attribuer aux irrigants, les plus importants consommateurs d'eau de cette région, un volume garanti en début d'année, fonction du niveau de la nappe à cette époque ; ce dispositif doit son existence au cycle pluriannuel très marqué qui permet une gestion glissante sur plusieurs années.

Le SAGE en cours d'élaboration donnera un appui juridique renforcé au système provisoire actuellement en place.

SESSION 8

Nouveaux concepts et axes de recherche

Le sondage par résonance magnétique protonique : une méthode non invasive pour caractériser les aquifères

Jean-François Girard ¹, Jean-Michel Baltassat, Anatoly Legchenko ², Jean-Michel Vouillamoz ², Stéphane Sabatier ³, Dominique Chigot ³, Jean-Claude Schmidt ⁴

BRGM ¹, IRD ², ANTEA ³, Conseil Général Eure-et-Loir ⁴

⁽¹⁾BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans, France, jf.girard@brgm.fr

Le sondage par résonance magnétique des protons (RMP ou « Magnetic Resonance Sounding, MRS » en anglais) est une technique non-invasive spécialement adaptée à la prospection hydrogéologique. Les sondages RMP se distinguent des autres méthodes géophysiques utilisées pour étudier l'eau souterraine par le fait que le signal mesuré est directement généré par les molécules d'eau. Les autres méthodes géophysiques utilisées sont le plus souvent basées sur la mesure des variations de résistivité électrique du sous-sol qui sont liées à la présence d'eau, mais pas de manière univoque. Le signal RMP mesuré est directement lié à la présence d'eau, et son amplitude est proportionnelle à la quantité d'eau présente dans le volume investigué [1]. Initialement développée pour des sondages en milieux tabulaires (1D) cette technique est également utilisée en profilage pour étudier des cibles bi- ou tridimensionnelles comme les réseaux karstiques et les cavités remplies d'eau [2].

I. METHODOLOGIE

La mise en œuvre d'un sondage MRS consiste à disposer sur le sol une boucle (circulaire ou carrée de taille décamétrique) dans laquelle l'injection d'un courant de forte intensité et à la fréquence spécifique dite de Larmor (environ 2kHz en France) va générer un champ magnétique. Cette impulsion électromagnétique (notée Pulse) d'une durée de quelques dizaines de millisecondes va perturber les moments magnétiques des spins des protons, jusque là à l'état d'équilibre dans le champ magnétique terrestre. Lorsque l'impulsion cesse, les moments magnétiques des protons vont retourner à leur état d'équilibre en générant un signal du au phénomène de résonance magnétique protonique. Le signal est enregistré aux bornes de la boucle qui sert à la fois d'antenne émettrice et d'antenne réceptrice.

Le signal est la tension enregistrée aux bornes de la boucle après que le champ magnétique perturbateur a été émis (caractérisé par le paramètre $q = \text{intensité} \times \text{durée}$ en A.ms). Appelé (FID, « Free Induction Decay » en anglais) c'est un signal décroissant dans le temps, de la forme :

$$e(t, q) = e_0(q) \exp(-t/T_2^*) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

où $e_0(q)$ est l'amplitude initiale de la réponse (directement liée à la quantité d'eau dans le volume investigué) et T_2^* la constante de temps de décroissance du signal. La fréquence est celle de Larmor et le déphasage est mesuré par rapport au courant injecté dans la boucle. Cette méthode est sélective parce que seules les molécules d'eau génèrent un signal par résonance magnétique à la fréquence utilisée.

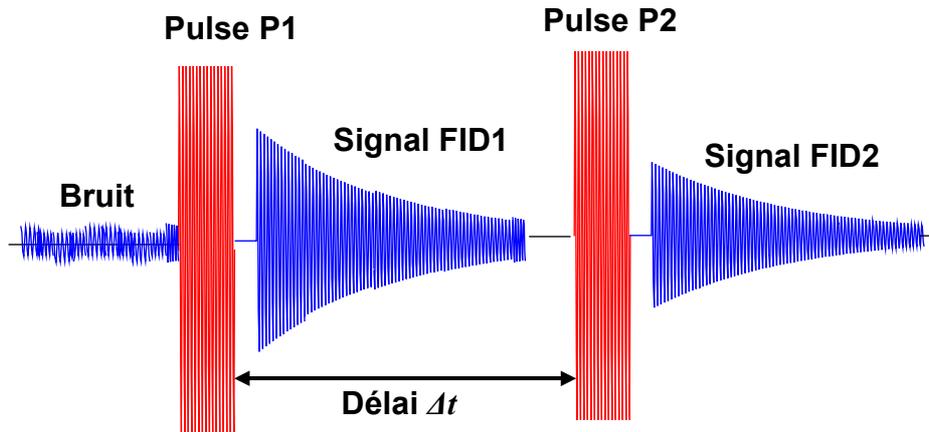


Figure 1 - Séquence de mesure du signal RMP

On définit également la constante de temps T_1 qui correspond au temps de retour à l'équilibre des spins. On la mesure en utilisant deux injections séparées d'un temps Δt et on obtient alors :

$$\frac{e_{o\ FID2}}{e_{o\ FID1}} = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_1}\right)$$

Si le temps de retour à l'équilibre est trop court par rapport au délai Δt entre les deux pulses, alors les deux signaux sont de même amplitude et T_1 ne peut être estimé (on peut juste en déduire que sa valeur maximum est inférieure à Δt). On a toujours $T_1 > T_2^*$ qui nous renseigne sur la taille des pores saturés en eau : plus les molécules d'eau sont loin des parois des pores, et plus les temps de décroissance sont élevés, de quelques dizaines de ms jusqu'à 2 secondes pour l'eau dans un lac. T_1 est utilisé plutôt que T_2^* qui est beaucoup plus sensible aux hétérogénéités de champ magnétique à l'échelle des pores.

La mesure décrite ci-dessus est répétée pour des valeurs croissantes de pulse q correspondant à des profondeurs d'investigation croissantes. Le graphe des valeurs de $e_0(q)$ (figure 3) mesurées pour des valeurs croissantes de q constitue ainsi un sondage RMP en profondeur. (l'appareil commercial le plus puissant Numis^{plus} de IRIS Instruments permet d'atteindre $q=18000$ A.ms pour des pulses de 40 ms).

Un exemple numérique de sondage MRS a été modélisé au-dessus d'un milieu composé d'un encaissant avec des propriétés proches de celles d'un calcaire massif avec 1% de teneur en eau et un temps de décroissance de 150 ms, et d'une couche avec 20% de teneur en eau mais avec un temps de décroissance de 600ms, caractéristique d'une porosité de gros diamètre (qui pourrait correspondre à un niveau fracturé ou altéré par exemple). L'amplitude et le temps de décroissance du signal ont été calculés pour différentes valeurs de q et sont représentés sur la figure 2.

On observe très clairement la capacité de sondage d'une telle expérience [3]: l'eau superficielle répond aux faibles valeurs de q , puis l'eau de plus en plus profonde répond au fur et à mesure qu'on augmente q . L'écartement entre les courbes FID1 et FID2 traduit l'augmentation du temps de relaxation, il est interprété en terme de T_1 .

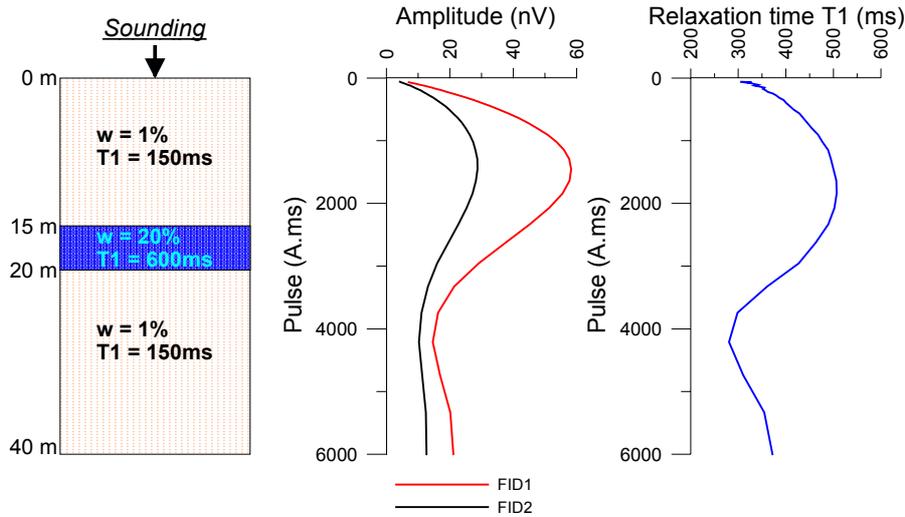


Figure 2 - Exemple numérique de sondage par résonance magnétique (MRS) avec une antenne circulaire de 50m de diamètre

II. TENEUR EN EAU RMP

Dans les sols (ou les roches), le champ magnétique ambiant est perturbé près des grains (ou de la surface des pores). Le champ magnétique y est moins homogène et le phénomène de résonance magnétique s'amortit plus vite. Comme le montre la figure 3, à cause du temps mort instrumental, étant donné que le temps de décroissance diminue près des grains, plus la porosité est importante et plus l'amplitude du signal est importante. Les deux paramètres amplitude et temps de relaxation apparaissent donc directement liés à la teneur en eau et donc liés à la porosité et la saturation du milieu.

Généralement dans les aquifères, le signal provenant de la zone saturée en eau va dominer dans l'enregistrement. Premièrement parce que la quantité d'eau libre est plus importante dans la zone saturée et deuxièmement parce que l'eau liée est caractérisée par des temps de relaxation trop courts (<60 ms) pour être mesurés avec l'équipement standard qui impose un temps mort de 40 ms. On considère classiquement que l'eau dite liée est invisible sur les sondages RMP bien que les résultats RMP n'apportent pas à l'heure actuelle une délimitation claire entre eau liée et eau libre. Dans la zone saturée, si la porosité non connectée est négligeable, la teneur en eau RMP est ainsi considérée comme une bonne évaluation du coefficient d'emmagasinement (« =effective porosity » en anglais).

L'accès aux paramètres hydrodynamiques de l'aquifère est obtenu au travers de lois empiriques reliant la transmissivité évaluée par pompage d'essai et les paramètres RMP. Dans la région de Chartres (28), une relation empirique a été établie à partir des essais de pompage sur 14 forages dans la craie, les calcaires de Beauce et les sables associés. Elle a ensuite été appliquée pour 8 nouveaux sites de forage hydrogéologiques et validée sur un site foré et testé.

III. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

La principale faiblesse de cette méthode est sa sensibilité au bruit électromagnétique (d'origine naturelle ou anthropique) mais grâce à divers procédés de filtrage, un rapport signal/bruit suffisant est atteint dans la plupart des cas, au prix d'un temps d'acquisition plus ou moins long (de 2h jusqu'à 10h en fonction des situations). Des progrès importants ont été réalisés dans ce domaine ces dernières années mais de nouvelles solutions sont envisagées qui restent encore à développer.

Aujourd'hui, le sondage par résonance magnétique des protons est une méthode opérationnelle utilisée dans la Beauce pour implanter des forages à forts rendements. Elle a déjà été utilisée également pour la caractérisation hydrodynamique dans des contextes de socles fracturés, d'aquifères sableux, pour l'étude de réseaux karstiques de grandes dimensions...etc.

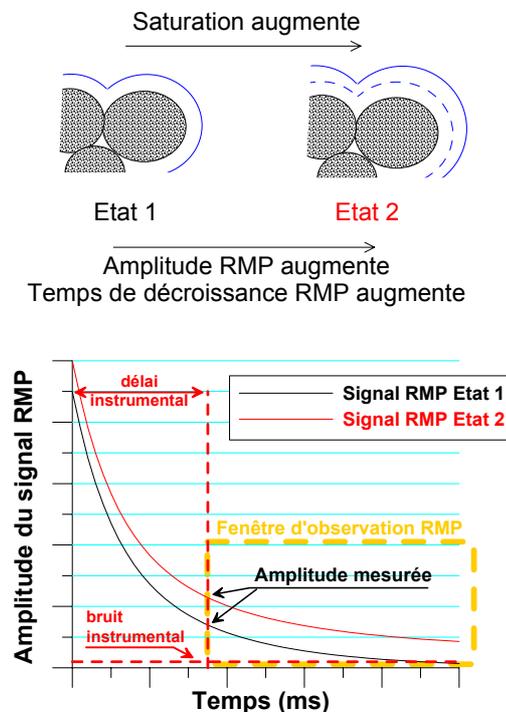


Figure 3 - Teneur en eau mesurée par la RMP

REFERENCES

- [1] Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Beauce, A., Bernard, J. (2002) - Nuclear resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *Journal of Applied Geophysics*. 50 : pp. 21-46.
- [2] Vouillamoz, J.-M., Legchenko, A., Albouy, Y., Bakalowicz, M., Baltassat, J.-M., Al-Fares, W. (2003) - Localization of karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. *Journal of Ground Water*. 41 (5) : 578-587.
- [3] Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Bobachev, A., Martin, C., Robain, H., Vouillamoz, J.-M. (2004) – Magnetic Resonance Sounding Applied to Aquifer Characterization. *Ground Water*. 42(3) : pp. 363-373.

Les occurrences de sélénium dans les forages d'alimentation en eau de la région parisienne : origine et perspectives d'études

Laurence Chery¹, Maryse Castrec-Rouelle²

¹ BRGM Service EAU BP 6009 45060 ORLEANS cedex 2 l.chery@brgm.fr

² LGM, Université Paris VI Tour 26 75252 PARIS cedex 05 castrec@ccr.jussieu.fr

I. CADRE ET OBJECTIFS

L'occurrence dans les eaux souterraines de sélénium à des concentrations dépassant la norme de la directive européenne 98/83/CE du 03/11/98 et son décret d'application français 1220 du 20/12/2001 concernant les limites de réglementation relatives aux eaux souterraines destinées à l'AEP, soit 10 µg/L, est un problème qui se pose maintenant dans plusieurs régions de France. En particulier en Ile-de-France, les DDASS des départements de Seine-et-Marne et de l'Essonne, ont étudié ce problème en réalisant notamment de nombreux dosages de sélénium [1], [2] au cours de ces dernières années. Mais, jusqu'à présent aucune intoxication par une eau naturelle contenant un excès de sélénium n'a été démontrée. Le mode d'ingestion principal de cet élément est alimentaire.

Les causes possibles de la présence de sélénium sont multiples, et compte tenu de l'emploi de cet élément dans la vie industrielle ou agricole, plusieurs éventualités peuvent être envisagées : une source hospitalière, une origine industrielle, une conséquence de l'épandage de boues de stations d'épuration [3], une origine agricole par l'utilisation d'engrais séléniés, une origine naturelle. Des études ont été réalisées pour tenter de déterminer l'origine des fortes concentrations observées dans les eaux des aquifères du bassin de Paris [4], [5], et même plus largement [6].

Après un rapide aperçu sur les données disponibles sur le sélénium, puis sur les grandes lignes de la géologie du sélénium, les données recueillies par les DDASS de l'Essonne et de la Seine-et-Marne et les résultats des études préliminaires sont présentés pour regarder les relations qui peuvent exister avec le contexte géologique et hydrogéologique régional et quels types de sédiments sont susceptibles d'être une source naturelle de sélénium. Enfin dans une dernière partie les perspectives de recherche et d'études sont proposées.

II. LES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU SELENIUM

Le sélénium est un élément à la fois essentiel et toxique. C'est un oligo-élément entrant dans la composition de protéines indispensables. Dans certains cas, il est même utilisé comme traitement thérapeutique (traitement de maladies cutanées à la Roche-Posay par exemple). Mais le sélénium est aussi, à certaines doses, un élément nocif. Une intoxication au sélénium peut se manifester par des symptômes assez secondaires comme des atteintes cutanées ou respiratoires. D'un point de vue chronique, des troubles gastro-intestinaux, des atteintes dentaires ou encore des anomalies neurologiques ont pu être observés. Aucun effet cancérigène n'a été établi.

Le sélénium existe sous formes organiques (composés méthylés solubles et volatils, acides séléno-amines et sélénoprotéines) et inorganiques dépendant de son état d'oxydation:

- Séléniate Se^{VI} , forme la plus oxydée
- Sélénite Se^{IV}
- Sélénium natif Se^0
- Séléniure $\text{Se}^{-\text{II}}$

La spéciation du sélénium dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la température, le pH, les conditions d'oxydo-réduction, la composition en éléments majeurs et traces dans les eaux, les phases minérales associées au système, la matière organique... Plus simplement, la figure 1 présente la spéciation des composés inorganiques du sélénium dans l'eau en fonction du pH et du potentiel d'oxydoréduction pour une concentration totale en sélénium de 78.96 $\mu\text{g/L}$.

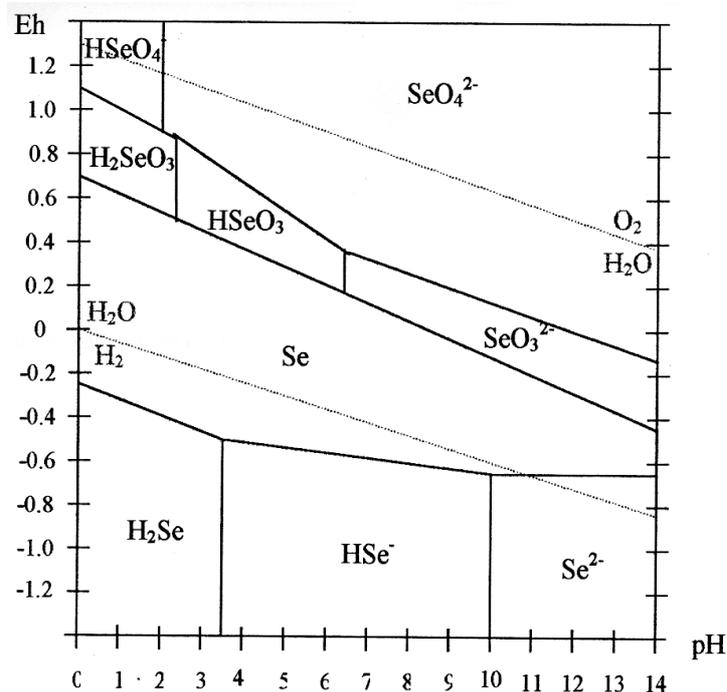


Figure 1 – Diagramme Eh- pH du sélénium

Se^{IV} et Se^{VI} sont stables dans l'eau sous forme d'oxy-anions: sélénites et séléniates sont les ions inorganiques les plus communs dans les eaux et les sols. Se^{IV} existe sous deux formes SeO_3^{2-} ou HSeO_3^{2-} en fonction du pH et Se^{VI} est présent sous la forme anionique la plus oxygénée: SeO_4^{2-} . Les sélénates sont les composés les plus mobiles en raison de leur solubilité élevée et les sélénites moins solubles dans l'eau. La réduction en séléniures n'est possible que dans des conditions anoxiques. A faible pH et/ou dans des environnements anoxiques, le sélénium est immobilisé sous forme de solides ou adsorbé (il est important de noter que le sélénium peut être également immobilisé sous de nombreuses formes organiques: composés méthylés, acides séléno-amines et sélénoprotéines).

Les propriétés chimiques du sélénium sont proches de celles du soufre. Il est souvent associé au fer ou à l'uranium. En présence de fer, il est susceptible de coprécipiter pour former de la ferrosélide FeSe_2 (homologue de la pyrite FeS_2). Les formes les plus oxydées peuvent être adsorbées sur des oxydes ferriques. Les minéraux renfermant du sélénium sont variés mais restent rares. On pourra également citer à titre indicatif: la clausthalite PbSe , la naumannite Ag_2Se , et la berzelianite Cu_2Se .

III. LE SELENIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES

Dans une synthèse bibliographique complète [7], de très fortes concentrations en sélénium sont signalées dans les sources thermales de la Roche-Posay (Vienne). Ces eaux thermo-minérales présentent les plus fortes concentrations connues à ce jour, 17 à 47 µg/l jusqu'à 60 µg/l (source Radegonde). Ces eaux extraites de la craie du Turonien circulent dans les dépôts continentaux sablo-argileux et graveleux de l'Eocène ; dans ces dépôts continentaux, on peut remarquer la présence de matière organique (végétaux fossiles). La présence de sélénium dans ces eaux s'explique le plus souvent par l'oxydation de sulfures.

Dans le département de Seine et Marne, il s'avère que les anomalies constatées intéressent plusieurs niveaux aquifères [4]. Le niveau de l'eau est souvent assez profond, 30 à 50 m parfois. Dans plusieurs forages de la partie orientale du département, la hauteur mouillée dans les forages est relativement faible et de l'ordre de 20 m ; la base des ouvrages se situe alors dans l'Yprésien, représenté par des sables plus ou moins argileux. Ce niveau n'est que rarement capté : en effet, la finesse des grains sableux fait craindre un ensablement des colonnes, une usure des pompes, et par ailleurs impose un choix délicat de crépines. Dans la partie orientale de la Seine-et-Marne, il existe cependant des points d'eau qui ne captent que le niveau le plus bas de la série sédimentaire éocène, (les sables de l'Yprésien). C'est le cas en particulier de la source de Gurcy-le-Châtel et du captage de Rouilly, points d'eau présentant tous deux des anomalies en sélénium. Or le niveau de l'Yprésien doit nous intéresser, en dehors des aspects purement hydrogéologiques, car il peut être considéré comme favorable à des concentrations à uranium et sélénium : nous rappellerons qu'il est assez semblable aux sédiments éocènes de la Brenne, qui contiennent du sélénium et de l'uranium.

En Essonne, 35 % des ouvrages de production d'eau potable présentent des anomalies en sélénium (i.e, concentration > 5µg/l), [5] entre 1990 et 2004. Les principaux aquifères affectés sont les calcaires de Champigny et de Saint-Ouen, les calcaires de Champigny, les calcaires de Brie et les sables Fontainebleau.

Si la plupart des ouvrages traversent l'assise du calcaire de Champigny, les niveaux réellement productifs sont souvent situés plus bas dans la série sédimentaire, en raison notamment du niveau de l'eau. Il s'ensuit que ce n'est pas seulement l'aquifère du calcaire de Champigny au sens strict, mais l'ensemble de l'Eocène supérieur ou moyen, qui est productif selon les secteurs considérés, et affecté ça et là par des anomalies en sélénium.

Enfin, certains aquifères du Jurassique et du Trias (bassin Rhin-Meuse, données ADES) présentent des anomalies en sélénium.

IV. CONTEXTE GEOLOGIQUE FAVORABLE A LA PRESENCE DE SELENIUM

La découverte de minéraux de sélénium dans le Massif Central a eu lieu dans un contexte filonien à uranium. L'association uranium-sélénium est bien connue et a été décrite pour la première fois aux Etats-Unis dans les années 60. Les principaux gisements d'uranium de l'ouest américain (Colorado, Wyoming, Utah) se distinguent par un contexte géologique semblable.

Les lithofaciès dans lesquels se rencontre le sélénium sont caractéristiques d'un milieu de dépôt continental, fluvial. Ce sont en général des sables et graviers plus ou moins argileux,

organiques, associés des débris ligniteux ou des troncs d'arbres silicifiés Les concentrations les plus importantes en sélénium et uranium se situent sur des fronts d'oxydo-réduction à la limite d'eaux oxydées et de milieux réducteurs : les "roll-type deposits" bien connus des géologues miniers. Le sélénium s'y trouve sous forme de séléniure FeSe_2 (ferroselite) et de sélénium natif. Il est associé à des hydroxydes ferriques dans les zones oxydantes et à des sulfures dans les zones réduites.

Il existe plusieurs gisements ou indices uranifères de ce type en France :

- Le gisement de St Pierre du Cantal (Oligocène des petites limagnes du Massif Central,
- Le gisement de Coutras (Eocène moyen et supérieur) associé à des dépôts de mangrove riche en matière organique, issues du Massif Central,
- La formation de la Brenne (Eocène supérieur),
- Les sables et argiles du Bassin de Paris (Yprésien) issus de l'érosion du Massif Central.

A la Roche Posay, l'aquifère du Turonien exploité pour le thermalisme est recouvert de dépôts continentaux fluviaux d'âge Cuisien (Yprésien inférieur). Ces minéraux sablo-graveleux à matière organique constitueraient la source du sélénium identifié dans les eaux thermales. D'après la bibliographie (thèses de J. Quériaud 1983 et Pion 1989), le sélénium dans les eaux de la Roche-Posay serait essentiellement sous forme de Se^{VI} .

V. L'ORIGINE DU SELENIUM DANS LES AQUIFERES DU BASSIN DE PARIS

V.1. Une origine anthropique à écarter

Aucune corrélation entre les concentrations en sélénium et celles liées aux apports anthropiques n'existe. Ces apports peuvent être tracés par les métaux lourds (dans certains cas), ou par les nitrates, entre autres. Les analyses dont nous disposons sont peu nombreuses, mais fournissent néanmoins des renseignements intéressants. Les plus fortes concentrations apparaissent au contraire dans les eaux considérées, sur la base de la relation chlorure- nitrate, comme les mieux protégées des pollutions. Le sélénium serait donc lié à un niveau relativement protégé des influences superficielles.

V. 2. Une relation avec la géologie

La superposition sur les cartes des points avec des teneurs en sélénium supérieures à 5 $\mu\text{g/l}$ permet les observations suivantes :

- dans la partie Est du département de Seine-et-Marne, de nombreuses anomalies en sélénium sont signalées dans les vallées. Dans une bande qui va de Fontainebleau à Nangis puis Esternay, la série sédimentaire yprésienne est peu profonde grâce à plusieurs structures anticlinales.
- A l'inverse, on observe très peu d'anomalies dans les fosses de Pontault-Combault et Draveil.
- Dans le sud-est de l'Essonne, les points présentant une anomalie en sélénium sont situés dans une zone où l'Yprésien est relativement profond (-30 à -60 m NGF pour le toit de la craie et 0 à -40 m NGF pour le toit de l'Yprésien).

Une valeur de - 30 à - 40 m pour la cote du toit de la craie, soit environ - 20 m pour le sommet de l'Yprésien, marque bien la limite vers l'ouest de la majorité des captages à teneur élevée en sélénium. Dans ce secteur, le Sparnacien a un faciès détritique continental de dépôts fluviaux grossiers.

Dans une étude récente (2004) [5], une autre hypothèse est proposée pour expliquer les anomalies dans le département de l'Essonne : dans la partie Est du département, l'origine du sélénium dans l'aquifère de Champigny serait lié aux marnes infragypseuses, tandis qu'au Sud-Ouest, il serait lié soit aux marnes supragypseuses, soit aux calcaires d'Etampes présentant des lignites.

V.3. Des facteurs hydrodynamiques

En plus de l'influence éventuelle de telle ou telle formation géologique, l'existence de facteurs liés au temps doit par conséquent être évoquée :

- modification des écoulements verticaux (drainance) entre nappes
- modification des écoulements par drainage vers les vallées
- modification de la chimie de la nappe à l'interface avec la zone non-saturée.

Ces facteurs sont généralement liés à une variation de la charge hydrostatique. Signalons également que les échanges verticaux peuvent avoir des causes artificielles :

- forages mal réalisés faisant communiquer deux nappes
- travaux miniers : c'est le cas dans la région de Provins

Les phénomènes de **drainance** ont été étudiés en Brie pour la nappe des calcaires de Champigny [8] Cette nappe peut dans certains cas être alimentée à partir de la nappe des calcaires de Brie et elle peut être drainée verticalement au profit de la nappe de l'Yprésien-Lutétien. Ce phénomène n'est pas homogène à l'échelle de la Brie. Il existe une différence de charge piézométrique entre Yprésien-Lutétien et calcaires de Champigny. On peut distinguer trois zones :

- Au nord, la nappe de l'Yprésien-Lutétien a une charge hydrostatique plus faible que celle des Calcaires de Champigny
- Idem dans la région de Provins
- Dans le reste de la Brie les niveaux hydrostatiques sont peu différents.

Une étude récente [9] montre en Seine-et-Marne des fluctuations importantes du niveau aquifère de la nappe. En particulier on remarque en beaucoup d'endroits une baisse importante entre 1983 et 1993. L'amplitude des fluctuations dépasse 5 mètres et peut même atteindre localement 15 ou 20 mètres. A l'inverse le niveau de la nappe du Lutétien-Yprésien n'a pas baissé de manière aussi significative.

L'exploitation des nappes aquifères de l'Oligocène et surtout de l'Eocène supérieur (calcaire de Champigny) a entraîné une **baisse du niveau piézométrique** de cette nappe qui est susceptible d'induire un phénomène de drainance depuis des aquifères semi-captifs, en particulier l'Yprésien. Ce phénomène est d'autant plus vraisemblable que les aquifères de l'Eocène supérieur, de l'Eocène moyen et de l'Eocène inférieur ne sont pas isolés par des écrans imperméables. Seul les Marnes et Caillasses du Lutétien jouent le rôle de semi-perméable avec une épaisseur d'une vingtaine de mètres en Brie et d'une dizaine de mètres dans l'Essonne. Il est donc tout à fait envisageable d'avoir des échanges verticaux entre les niveaux aquifères de l'Eocène sur l'ensemble du secteur où le sélénium est présent.

La nappe de l'Yprésien est caractérisée par une grande variabilité des conditions géologiques et hydrodynamiques conduisant à différents types d'alimentation, d'écoulement et de drainage. Dans la fosse de Draveil, par exemple, la nappe est drainée par les vallées de la Seine, de l'Orge et de l'Yvette, alors que le réservoir aquifère n'affleure pas. Plus

généralement on admet l'existence d'une drainance par les vallées à travers l'ensemble des autres aquifères. Ce phénomène est possible car le gradient de pression est dirigé de bas en haut, la nappe de l'Yprésien restant, en dehors des zones de pompage à un niveau piézométrique plus haut que celui des alluvions.

Ce phénomène permettrait d'expliquer que l'on retrouve du sélénium dans les nappes alluviales (cas de Samois-sur-Seine) et plus généralement dans les captages situés en vallée, ce qui est le cas en particulier dans l'est de la Seine-et-Marne (vallées du Grand-Morin, de l'Aubetin et de l'Yerres).

Ces mécanismes de drainance à partir de l'aquifère yprésien sont illustrés sur la figure 2.

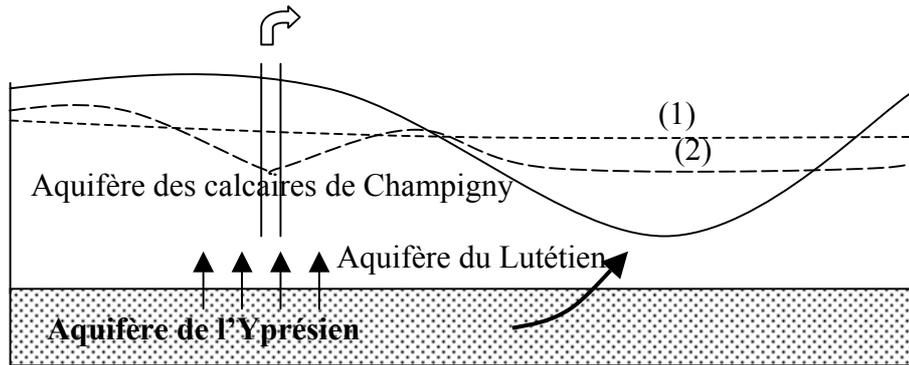


Figure 2 – Représentation schématisée des phénomènes de drainance à partir de l'aquifère Yprésien.
(1) surface piézométrique de la nappe de l'Yprésien
(2) surface piézométrique de la nappe des C. de Champigny

On peut constater une relation entre la baisse du niveau hydrostatique et la modification de la chimie de la nappe. Sur le captage de Champcueil 3 (Nainville-les-Roches / Bois Carré), un suivi en parallèle du niveau de la nappe (statique et dynamique) et de la teneur en sélénium a été réalisé de 1994 à 1996 [2]. Ce forage capte la nappe des calcaires de Champigny. La figure 3 montre que globalement la concentration en sélénium augmente quand le niveau baisse. Cette relation apparaît nettement lorsqu'on compare les concentration en sélénium et les niveaux statiques (Figure 4).

Ce comportement peut s'expliquer par une arrivée d'eau « profonde » enrichie en sélénium sous l'influence du pompage ou par une modification chimique entraînant une mise en solution du sélénium à l'interface avec la zone non-saturée. Au droit de ce forage, le calcaire de Champigny est surmonté par une vingtaine de mètres d'argiles vertes et supragypseuses et le niveau statique est encore à une dizaine de mètres sous la base des argiles.

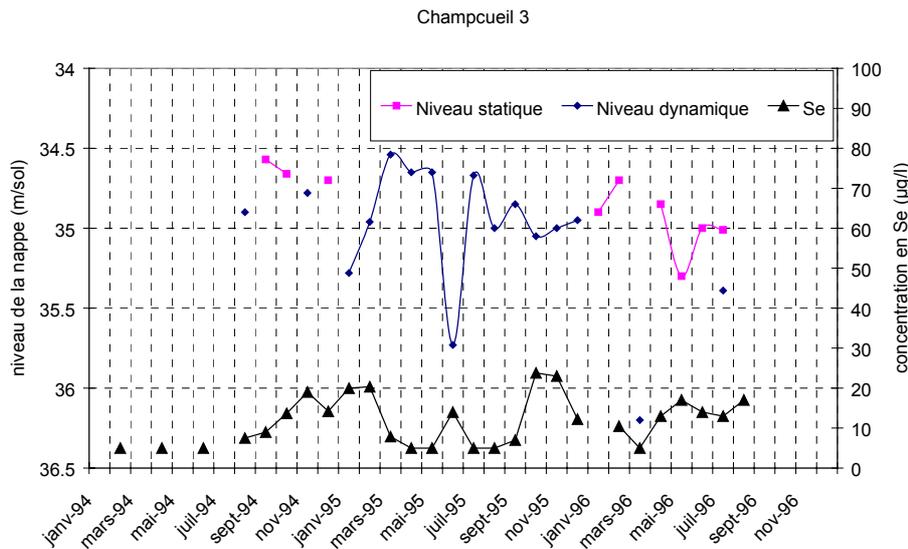


Figure 3 – Forage de Champcueil 3 : suivi du sélénium de 1994 à 1996

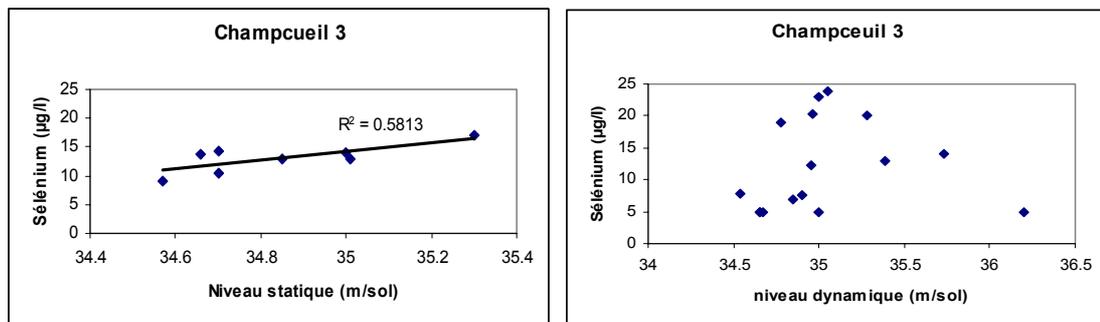


Figure 4 – Forage de Champcueil 3 : relation entre concentration en sélénium et niveau de la nappe

L'invasion de l'aquifère par des eaux plus oxygénées (qui ne s'y trouvaient pas auparavant, la nappe étant captive) peut amener l'oxydation des minéraux sensibles aux variations de conditions d'oxydo-réduction, en particulier des sulfures (pyrite). Ces réactions d'oxydation de sélénures peuvent expliquer la présence de sélénium (sous forme de séléniate) dans les eaux.

VI. PERSPECTIVES DE RECHERCHE ET ETUDES FUTURES

Les connaissances sur les quantités de sélénium en France dans les eaux souterraines comme dans les sols ou la roche sont limitées à des cas isolés. Les données disponibles sont peu nombreuses, et chaque aquifère contaminé mériterait une étude approfondie. Ainsi, même s'il a été possible de définir une lithologie favorable à la présence de sélénium dans les nappes, on ne peut exclure une association avec d'autres contextes géologiques. L'acquisition de nouvelles données dans la roche ou dans le sol, devrait permettre d'affiner ces connaissances et de valider les hypothèses avancées sur une origine naturelle du sélénium dans les niveaux de grès ou de sables d'origine continentale.

Le fait de retrouver du sélénium dans les aquifères en relation plus ou moins directe avec les dépôts fluviatiles de l'Eocène, des altérites et des dépôts détritiques issus du Massif Central est très positif en ce qui concerne l'optique préventive du phénomène.

En ce qui concerne le futur, il serait bon de tester la qualité des eaux des aquifères soupçonnés dans plusieurs zones géographiques pour bien s'assurer de l'origine du sélénium. Ceci concerne les eaux issues des formations Eocène, mio-plio-quadernaires et du Cénomanién inférieur.

Afin de lever les ambiguïtés sur les origines du sélénium dans ces aquifères, les mesures du potentiel d'oxydo-réduction (Eh), du pH, de la concentration en oxygène dissous, le rapport sélénium hexavalent – sélénium tétravalent, ainsi que les concentrations en éléments majeurs et traces, devraient permettre de mieux appréhender les réactions géochimiques contrôlant la solubilité et donc la mobilité du sélénium. Il faut en effet prendre en compte :

- les réactions de complexation vis-à-vis des éléments majeurs et traces présents dans les eaux, par exemple $MnSeO_4^0$, $NiSeO_4^0$, $NaHSeO_3^0$, $KHSe^0$, NH_4HSe^0 ;
- les réactions de dissolution-précipitation (par exemples : $Cu_2Se_{(s)}$, $PbSe_{(s)}$, $SnSe_{(s)}$ peuvent précipiter en milieu réduit ; $CaSeO_3$ et $CaSeO_4$ en présence de Ca^{2+} dans les eaux),
- les réactions d'adsorption [10] sur les oxy-hydroxydes de Fe, de Mn et d'Al, les argiles, les carbonates et la matière organique. L'adsorption sur les oxy-hydroxydes de Fe tels que la goethite ou l'hématite est maximale à faible pH (pH 3-4), et très faible voire nulle à pH neutre ou basique; les sélénites (Se^{IV}) étant mieux adsorbées que les sélénates (Se^{VI}). Concernant les argiles, les quantités adsorbées sont moindres que pour les oxy-hydroxydes de Fe mais à pH autour de 5-6 et varient selon les argiles. Dans tous les cas, les réactions d'adsorption-désorption du sélénium sont en compétition avec d'autres anions tels que les phosphates, les arsénates, les silicates...etc.
- réactions avec la matière organique : le Sélénium est soit incorporé dans la matière organique soit complexé.

Une telle étude sur quelques stations pilotes avec suivi pluri- annuel devrait permettre d'analyser le problème du sélénium et aboutir à des actions bien argumentées au niveau technique.

Références bibliographiques

- [1] DDASS 77, 1997 - Le sélénium dans les eaux souterraines de la Seine-et-Marne. Rapport interne, 13 p.
- [2] DDASS 91, 1997 - Rapport d'étape sur les teneurs en sélénium dans l'Essonne. DDASS de l'Essonne, Tomes 1 & 2
- [3] Anonyme, 1995 - Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduairees des stations d'épuration urbaines - Sélénium. Connaître pour agir, Guides et Cahiers Techniques, pp. 193-197.
- [4] Vernoux J.F., Barbier J., Chery L., 1998 - Les anomalies en sélénium dans les captages d'Ile-de-France (Essonne, Seine-et-Marne), rapport BRGM/RP-40114-FR, 46 p.
- [5] V. Robeaux, 2004 - Evaluation de la présence de sélénium dans les eaux d'alimentation de captages de l'Essonne : caractérisation, évolution. Rapport non publié. Ecole Nationale de la Santé Publique, Rennes, 27 p.
- [6] Karnay G., 1999 – Délimitation des aquifères susceptibles de renfermer du sélénium en Poitou-Charentes (France). Rapport BRGM/RP-40460-FR, 27 p.
- [7] Ihnat M., 1989 - Occurrence and Distribution of Selenium. CRC Press inc., Boca Raton, Florida (USA), 354 p.
- [8] Mégnién C., 1979 – Hydrogéologie du centre du bassin de Paris, mémoire BRGM n° 98.
- [9] BRGM, 1996 - Bilan de la nappe des calcaires de Champigny (Seine-et-Marne). Rapport R38768, 35 p.
- [10] Neal R.H., (1990), Selenium, In : B.J. ALLOWAY (ed), Heavy metals in soils, 2^{ème}ed, Ed Blackie, chap. 12, 261-283

Référentiel géologique de la France

Hanot Franck

BRGM Service CDG Avenue Claude Guillemin 45060 ORLEANS cedex 2 f.hanot@brgm.fr

I. INTRODUCTION

Le projet « Référentiel Géologique » vise à valoriser le patrimoine géologique en s'appuyant principalement sur la mise en place d'un réseau de logs géologiques validés, et sur une information cartographique harmonisée et continue.

Cette approche suivant deux axes complémentaires qui partagent des termes descriptifs communs permet le développement d'une gamme de produits à valeur ajoutée qui intègre des données d'origines diverses : BSS, forages pétroliers, données sismiques....

II. VALIDATION DES LOGS DE LA BSS

II. 1 Le réseau de logs validés

L'ambition du référentiel est de mettre en cohérence carte géologique et données de subsurface et de produire des données numériques valorisées :

- Log de notice
- Log de référence et logs validés
- Carte d'isovaleur
- Carte géologique vectorisée et harmonisée au 1/50 000

Le territoire national a été divisé en quatre ensembles géographiques (voir carte jointe). Chaque ensemble est traité successivement par les géologues régionaux ; ces derniers préparent les lexiques lithostratigraphiques, les logs de notice et les logs de référence. L'effort en premier lieu a été porté sur le Bassin de Paris. Ce dernier a été divisé en six lots confiés à une équipe basée à Orléans et renforcée de géologues régionaux. La validation des logs a été concentrée en premier lieu sur les forages peu profonds (profondeur < 500 mètres), la validation à plus grande profondeur nécessitant l'introduction des diagraphies et de la sismique réflexion.

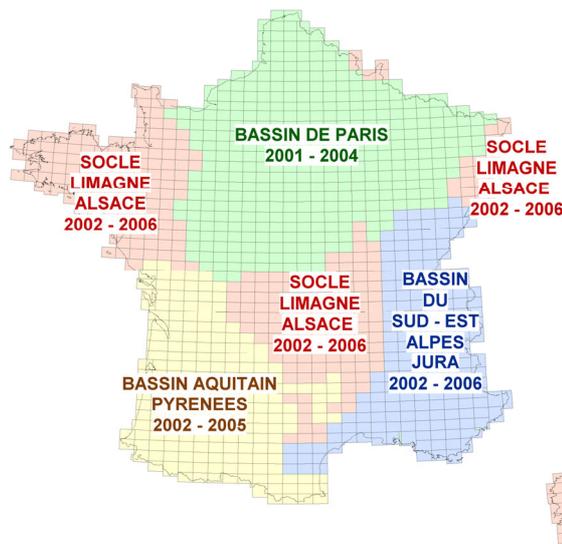


Figure 1 – Découpage géographique et années de production les figures

II. 2 Logs de notice - Lexiques

Réalisés dans le but de vérifier la cohérence des cartes entre elles et de définir les unités à individualiser sur les forages (au moins pour la profondeur jusqu'à 500 m), le log de notice permet de synthétiser et d'illustrer les unités lithostratigraphiques présentes à l'affleurement pour chaque carte (un log par carte). Le lexique lithostratigraphique qui récapitule et codifie près de 2000 formations pour le seul Bassin de Paris est progressivement enrichi au fur et à mesure de la production des logs de notice. Ce lexique lithostratigraphique est établi sur chaque secteur géographique, puis complété par un lexique lithologique et un lexique stratigraphique.

II. 3 Log de référence

Ils sont réalisés dans le but de fournir des points de référence utiles pour la validation de l'ensemble des forages existants et en particulier ceux de la BSS. La densité recommandée est de un à deux logs de référence par huitième de carte géologique. Ces forages doivent, dans la mesure du possible, être accompagnés d'une diagraphie et d'un suivi géologique assuré par un géologue. Ils doivent être suffisamment profonds et reconnaître l'essentiel des terrains figurant sur la carte géologique.

II. 4 Logs validés

Tous les forages ayant un numéro BSS et disposant d'une description géologique même sommaire sont susceptibles d'être validés. Une estimation grossière permet d'évaluer leur nombre à 200 000 pour la France métropolitaine.

Dans les parties de bassin peu structurées, le critère de validation est la cohérence des données retenues. Cette cohérence se concrétise par l'édition pour chaque niveau de cartes sur lesquelles figurent les valeurs des isohypses aux points. Les points doivent s'intégrer dans une carte d'isovaleur conforme.

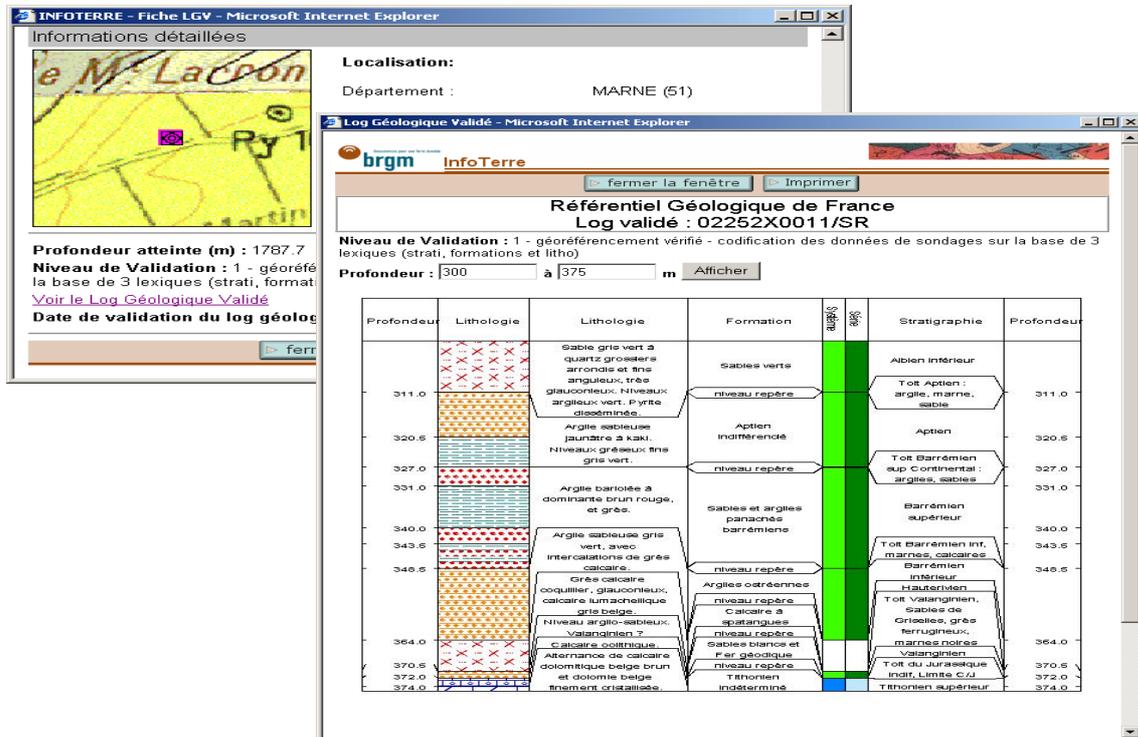


Figure 2 – Représentation d'un log validé sur infoterre

III. CARTES D'ISOVALEURS

Ce sont les cartes d'isohypses. Elles concernent les grandes coupures lithologiques et/ou stratigraphiques corrélables sur les portions importantes des bassins (toit de la craie, toit du Dogger – calcaire, toit du Rhétien...).

Pour la subsurface (profondeur de 0 à 500 mètres) et dans un bassin peu structuré du type Bassin de Paris, les cartes sont construites à partir des valeurs aux puits. Par souci de cohérence verticale des cartes entre elles, deux approches préliminaires de contrôle ont été pratiquées : une approche par coupes corrélatives entre forages (l'interpolation enrichit la carte) et une approche par addition ou soustraction de cartes isopaques par rapport à un niveau père bien contraint.

Pour la **profondeur** (failles scellées, bassins cachés) ou les **zones complexes**, ces cartes prendront en compte un maillage minimum de profils sismiques existants.

Sur le bassin de Paris, l'ensemble des logs de notice (360) a été réalisé aboutissant à la production d'un lexique opérationnel depuis 2000. La validation d' une forte densité de forages menée en parallèle avec la vectorisation et l'harmonisation des cartes géologiques a permis la construction de cartes d'iso valeurs. Les niveaux cartographiés sont les interfaces prioritaires en terme de recherche et gestion des eaux, risques, de stockages souterrains et de recherches pétrolières.

D'autres niveaux partiellement cartographiés dans le Tertiaire et le Jurassique sont en cours de contrôle et d'extension.

Les niveaux cartographiés sur toute leur extension dans le bassin de Paris, en intégrant toutes les données disponibles sont :

- Le toit du Lutétien (36 cartes au 1 / 50 000)
- Le mur du Lutétien (49 cartes au 1 / 50 000)
- Le toit de la craie (85 cartes au 1 / 50 000)
- Le toit du Cénomaniens(165 cartes au 1 / 50 000)
- Le mur du Cénomaniens(165 cartes au 1 / 50 000)
- Le toit du Dogger
- Le toit du Trias

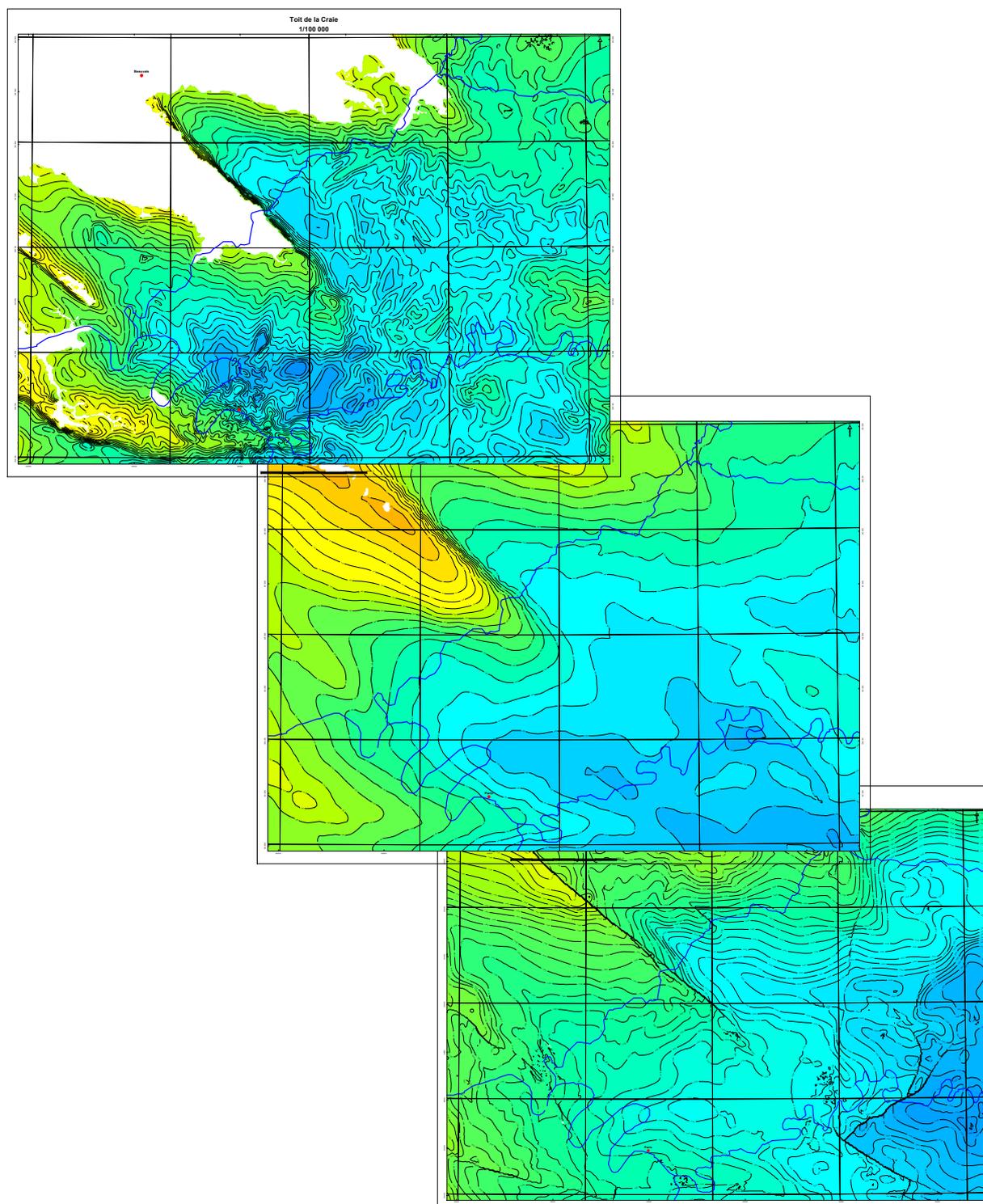


Figure 4 – Carte des isohypses du Toit du Trias, du mur de la craie et du toit de la craie au nord de Paris

IV. VECTORISATION ET HARMONISATION DE LA CARTE GEOLOGIQUE

La phase de vectorisation des cartes géologiques à 1/50 000 est un préalable aux travaux d'harmonisation des cartes géologiques au 1/50 000. Elle permet de conserver une trace de l'ensemble des contours géologiques portés sur les cartes papier depuis le début du programme de la Carte Géologique de France au 1/50 000. Elle est aussi indispensable pour le bon déroulement d'études thématiques qui nécessitent une base cartographique fiable (études de risques, hydrogéologie, environnement, etc.).

Les descriptions de base (noms des roches, âges, etc.) utilisées seront celles de la carte au 1/50 000, ce qui présente l'avantage de disposer a priori des informations les plus précises, même si elles sont restituées à une échelle plus petite. La synthèse permet de mettre en relation les différentes dénominations utilisées. Des rassemblements de différentes formations peuvent être opérés par l'utilisateur en fonction de son objectif : recherche d'eau, identification de zones à risques de glissement, recherche de matériaux, association stratigraphique, pétrographique, etc.).

La carte géologique est livrée dans un format numérique vecteur renseigné (par défaut MapInfo ou ArcView). Il est alors possible d'interroger les polygones géologiques (plage de couleur correspondant à un indice géologique), les éléments linéaires (contours et failles) et les informations ponctuelles d'origine géologique (mesures structurales...) ou de natures diverses (carrière, point BSS...) par simple sélection du ou des objets considérés.

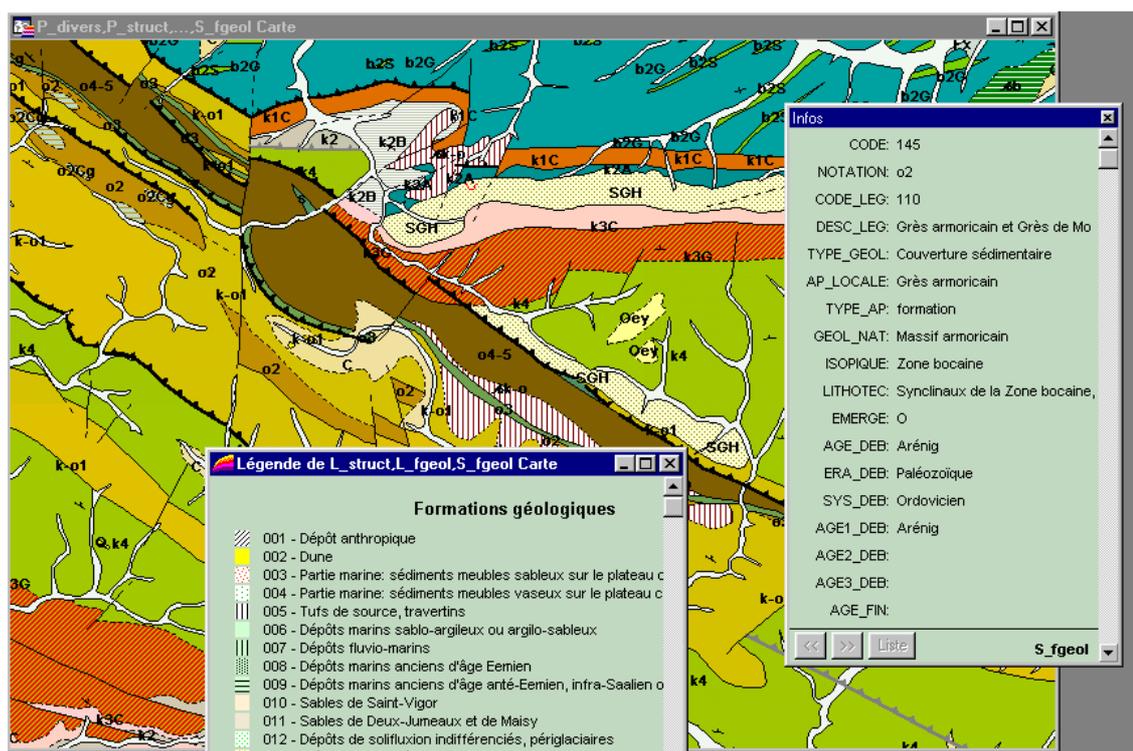


Figure 5 – Extrait de la carte géologique harmonisée du département du Calvados.

Evaluation du risque de non atteinte des objectifs de bon état qualitatif et quantitatif des masses d'eau souterraines du bassin Seine Normandie

Cécile GARNIER¹, Agnès DESSEVRE²

¹ AESN / DEPEE Service Connaissance du Milieu Naturel 51 rue Salvador Allende 92027 Nanterre Cedex GARNIER.Cecile@aesn.fr

² DIREN IDF service de bassin 79 rue Benoît Malon 94257 Gentilly cedex

Le Bassin Seine-Normandie (97000 km², 17 millions d'habitants) est caractérisé par une urbanisation intense située entre la confluence de la Seine avec de la Marne et celle de la Seine avec l'Oise, par une agriculture intensive dans sa partie centrale et plus extensive voire traditionnelle sur les extrémités Est et Ouest, enfin par une activité industrielle importante (le tiers du PIB national du secteur secondaire).

Il s'agit d'un bassin sédimentaire dans lequel 53 masses d'eaux souterraines ont été identifiées, suivant la méthodologie nationale pour répondre aux exigences de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE).

Masses d'eau souterraine (parties affleurantes)

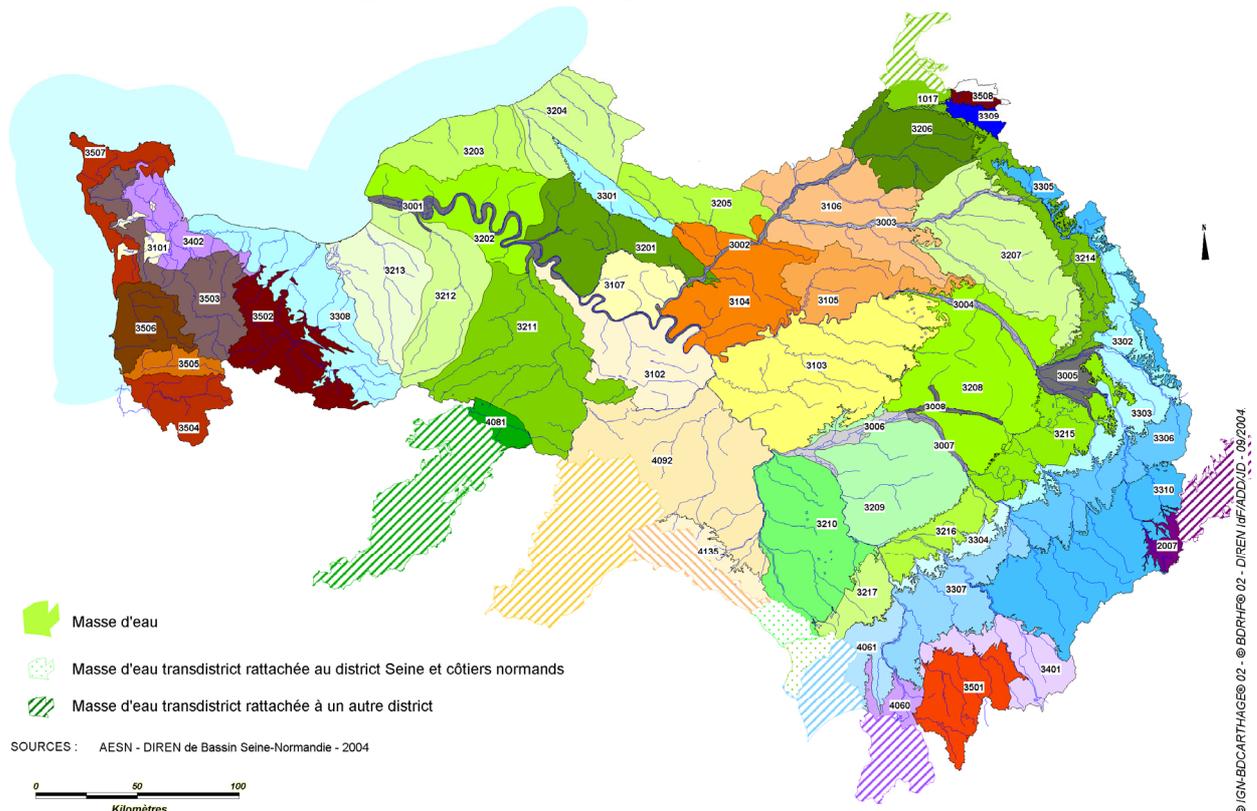


Figure 1 - Masses d'eau souterraine du District Seine et Côtiers Normands, parties affleurantes

Outre la désignation des masses d'eaux souterraines, la DCE demande à chaque District hydrographique d'évaluer le risque éventuel de ne pas atteindre le bon état en 2015. Pour ce travail, sur le District Seine et Côtiers Normands (sensiblement identique au bassin Seine-Normandie), un groupe de travail eaux souterraines a été formé, rassemblant de nombreux acteurs du domaine de l'eau (établissements publics, recherche, distributeurs d'eau,...)

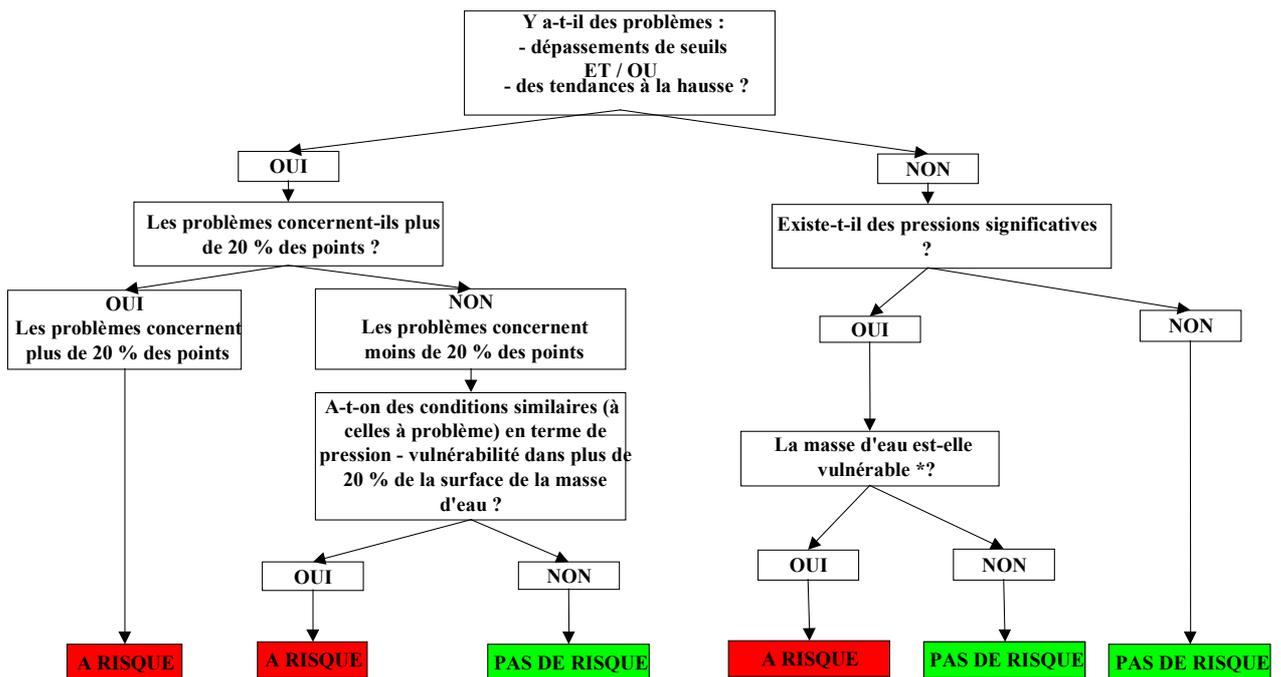
Au niveau chimique, une méthodologie nationale [1] a été élaborée par le BRGM à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, alors qu'au niveau quantitatif la méthodologie relève davantage d'une appréciation générale.

I. EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE

Du point de vue qualitatif, un projet de Directive Fille a permis de cibler les paramètres ou familles de molécules à considérer notamment : nitrates, pesticides, sulfates, chlorures, certains métaux..., ainsi que les concentrations à ne pas dépasser : normes retenues au niveau français pour les eaux distribuées destinées à l'alimentation en eau potable.

La méthodologie nationale d'évaluation du risque peut alors se résumer par le logigramme en figure 2.

Les seuils retenus au niveau français pour estimer le risque qualitatif sont alors de 80 % de la norme AEP pour les nitrates (soit 40 mg/l), les sulfates (soit 200 mg/l), ... et la norme AEP pour les substances à seuil déjà faible, en particulier les pesticides où l'on considère 0,1µg/l par molécule.



*vulnérabilité intrinsèque de la masse d'eau

Figure 2 - Méthodologie nationale de détermination du risque de non atteinte du bon état chimique

Pour appliquer cette méthodologie, nous nous sommes appuyés sur le Réseau de suivi de la qualité des Eaux Souterraines du bassin (RES) : 414 points, 2 à 4 analyses par an (hautes

eaux, basses eaux) sur plus d'une centaine de paramètres (paramètres physico-chimiques, métaux, OHV, Triazines, Urées Substituées et Carbamates, autres pesticides, HAP, BTEX).

Les résultats analytiques sur les années 1997 à 2001 ont été interprétés par le Système d'Évaluation de la Qualité des Eaux Souterraines (SEQ-Eaux Souterraines), permettant d'attribuer à chaque station de contrôle une classe de qualité ou un niveau de dégradation en fonction d'un usage de l'eau ou de l'État patrimonial, et d'une altération (groupement de paramètres de même nature ou ayant un même effet). L'interprétation de la qualité vis-à-vis des nitrates est présentée pour exemple en figure 3.

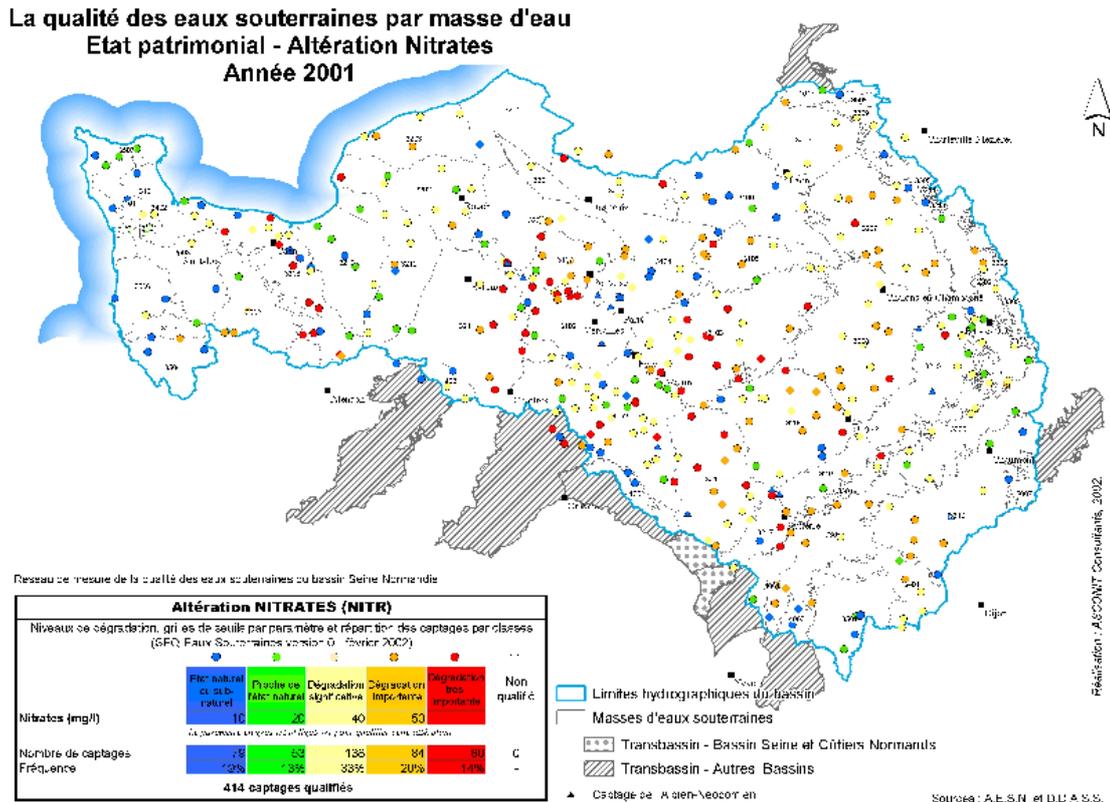


Figure 3 - Carte d'interprétation de la qualité des eaux souterraines vis à vis des Nitrates par le SEQ-Eaux Souterraines

Une synthèse de la qualité de chaque masse d'eau a été élaborée à partir de la proportion des ouvrages appartenant à chaque classe ou niveau de qualité d'après les résultats donnés par le SEQ-Eaux Souterraines.

Des graphiques (figure 4) ont aussi permis d'analyser les évolutions des nitrates et pesticides (triazines en particulier) sur chaque masse d'eau.

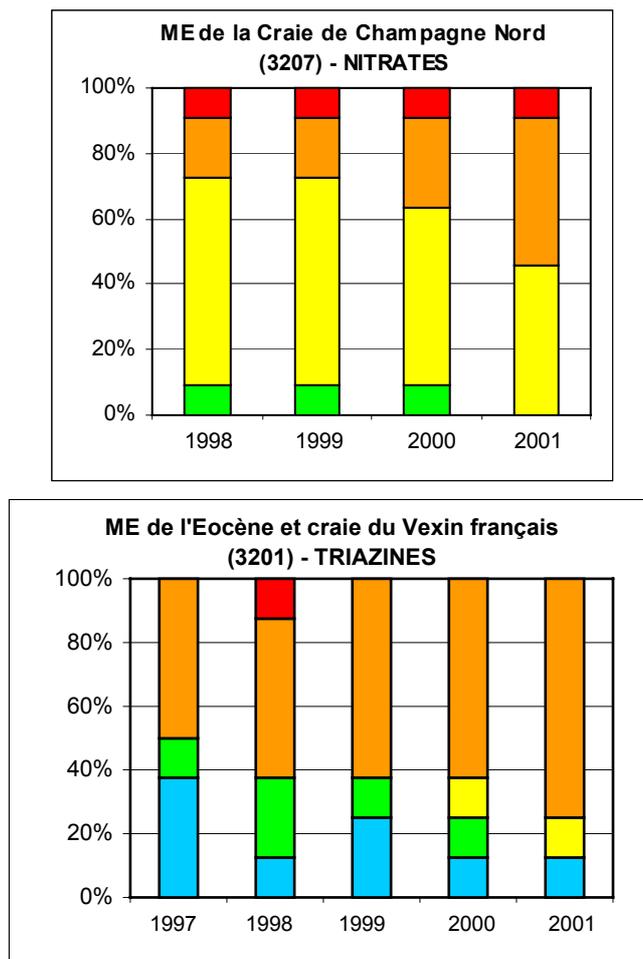


Figure 4 - Exemples de graphiques d'évolution de la qualité vis-à-vis des nitrates et des triazines

Une analyse plus fine de l'évolution des concentrations en chaque point, par régression linéaire, est venue compléter l'observation de tendances sur ce même réseau. Les tableaux 1 et 2 synthétisent les données.

Nitrates	1998-2001 (4 ans)	243 sites	augmentation $\geq 1,5$ mg/l/an (plus de 4,5 mg/l en 4 ans)
Triazines	1997-2001 (5 ans)	249 sites	augmentation $\geq 0,005$ $\mu\text{g/l/an}$ (plus de 0,02 $\mu\text{g/l}$ en 5 ans)

Tableau 1 - Critères pris en compte pour l'analyse de l'évolution des concentrations

	% de points en augmentation de concentration	Augmentation de concentration & qualité médiocre
Nitrates	31% (76 sites)	45 sites (59 %) > 40 mg/l
Triazines	28% (70 sites)	64 sites (91 %) > 0,1 $\mu\text{g/l/paramètre}$

Tableau 2 - Synthèse des résultats obtenus

Bien que ce travail reste sommaire – sans corrélation avec les évolutions des précipitations et donc la recharge – il permet tout de même d'apporter des éléments généralisés à l'ensemble

du bassin pour répondre à la DCE. Ces résultats ont notamment été confortés par les DDASS par rapport à leurs connaissances et observations, même sur de plus longues périodes.

L'évaluation du risque s'est alors basée sur : la proportion d'ouvrages (au moins 20%) dépassant les seuils indiquant l'état médiocre du RES (état en 2001 et/ou tendance) et d'autres réseaux de mesures (suivis des zones vulnérables, réseaux régionaux des produits phytosanitaires) notamment lorsque les stations de contrôle par masse d'eau ne paraissaient pas représentatives (manque de points), ainsi que des avis d'experts.

Ceci a mené à la réalisation de la carte en figure 5 indiquant le risque et les facteurs responsables, qui a été présentée, discutée et validée par des commissions géographiques sur le Bassin : 46 masses d'eaux souterraines présentent un risque de non atteinte du bon état qualitatif en 2015 (dont 39 vis-à-vis des nitrates et des pesticides), ce qui représente plus de 80 % de la superficie du bassin.

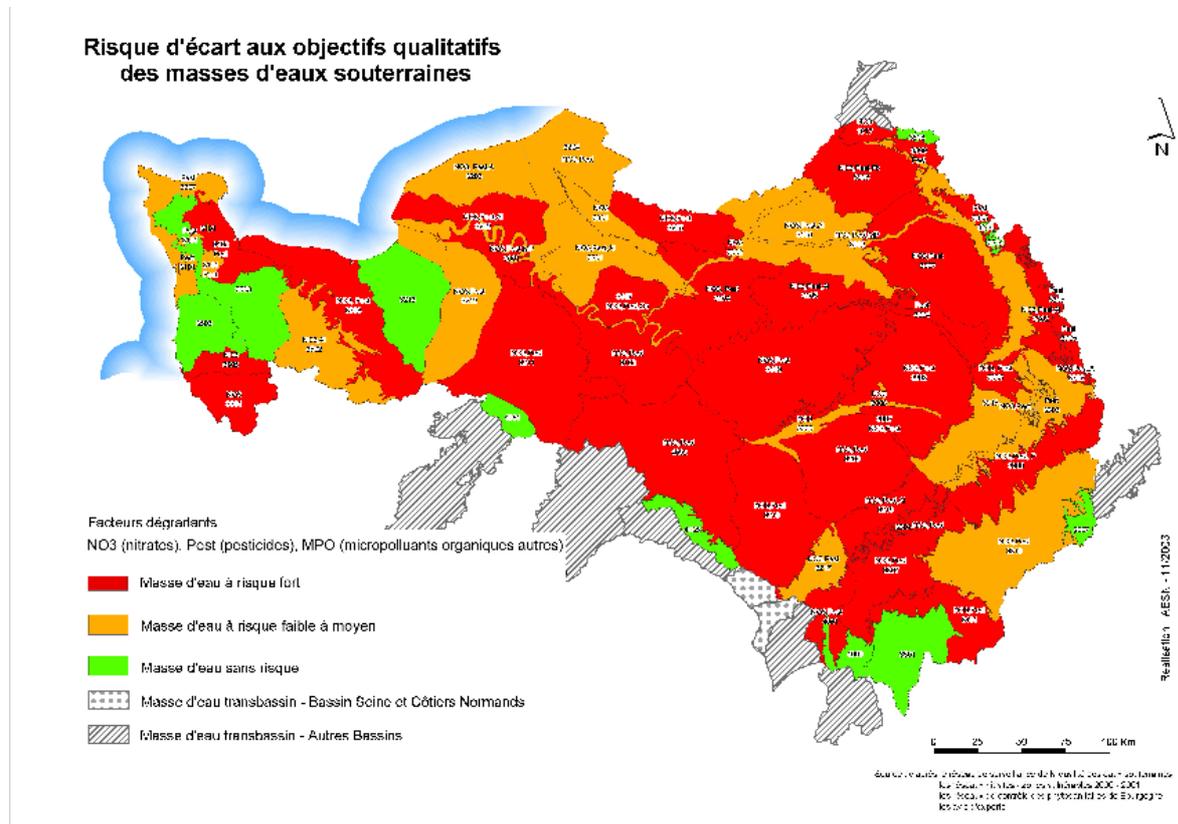


Figure 5 - Carte du risque de non atteinte des objectifs qualitatifs

D'autres perspectives d'évaluation de l'évolution des concentrations en polluants sont envisageables au niveau du bassin par le biais de la modélisation hydrodynamique. Le programme de recherche PIREN-Seine et l'équipe de l'Ecole des Mines de Paris a d'ores et déjà mis en œuvre un modèle couplé agronomique, hydrologique et hydrogéologique (STICS-MODCOU-NEWSAM) modélisant les flux de nitrates dans les trois aquifères Eocène, Oligocène et Craie [2]. Des affinements et compléments s'opèrent afin de répondre aux besoins liés à la DCE. Un nouveau modèle s'appliquant aux transferts de phytosanitaires vers le milieu souterrain est en cours de réalisation sur le même principe.

II. EVALUATION DU RISQUE QUANTITATIF

Le bon état quantitatif est défini dans l'annexe de la directive cadre. Il est atteint si les prélèvements ne dépassent pas la ressource disponible sur le long terme, ce qui induit que les eaux de surface et les écosystèmes terrestres en relation avec les eaux souterraines ne doivent pas être affectés. En particulier, les prélèvements ne doivent pas entraîner de risque d'invasion d'eau salée le long du littoral.

Disposant sur le bassin Seine Normandie d'un réseau piézométrique déjà ancien (certaines chroniques enregistrent 30-40 années de mesures), une étude piézométrique[3] a été réalisée en 2002 en vue de caractériser l'état quantitatif des eaux souterraines. Elle exploite les données piézométriques acquises sur le bassin pour analyser les comportements des nappes d'eau souterraine au regard des caractéristiques hydrogéologiques et des pressions de pompage.

Une première analyse est effectuée sur chacun des 256 points du suivi piézométrique : chronique, tendance d'évolution du niveau statique, statistiques annuelles et interannuelles, statistiques mensuelles pour caractériser la saisonnalité, évolution conjointe du niveau statique et des précipitations efficaces pour caractériser la réactivité de la nappe. Puis, une synthèse par masse d'eau est effectuée (on compte de 0 à 21 piézomètres par masse d'eau). Elle consiste en une comparaison des résultats statistiques (niveaux, battements, zone non saturée...) mettant en évidence des similitudes ou non de comportement (cycles, sensibilité aux aléas climatiques, capacité de restauration, tendances d'évolution). Autant d'éléments nécessaires pour l'évaluation de l'état quantitatif puis du risque de non atteinte des objectifs en 2015.

Il est cependant apparu difficile de faire la part de l'influence humaine sur l'évolution des niveaux des nappes, qu'il s'agisse de nappes présentant des fluctuations pluriannuelles, telle la nappe de Beauce, ou de nappes très réactives dont la rapidité de vidange et de recharge ne permet pas de déceler des anomalies liées aux prélèvements anthropiques (nappes karstifiées par exemple).

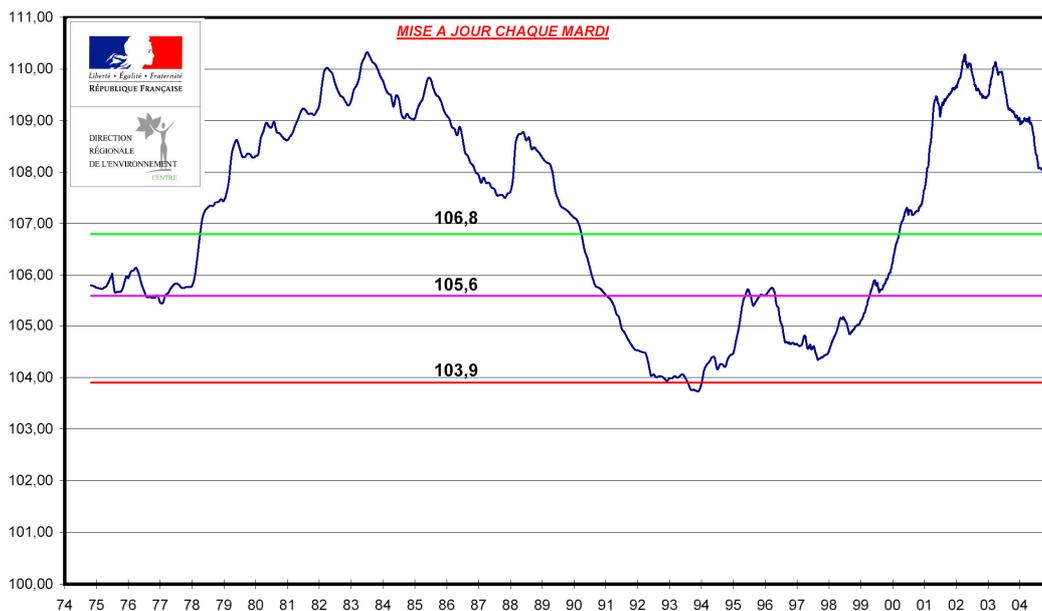


Figure 6 - Courbe piézométrique de la nappe de la Beauce
(indicateur de la situation générale)

La nappe de Beauce est un bon exemple de l'influence des prélèvements anthropiques combinés à un déficit de recharge (figure 6). Le niveau alarmant atteint après les années sèches 1989-1992 a été très probablement accentué par les prélèvements faits dans la nappe. Toutefois, suite à l'application de mesures de gestion appropriées, le niveau est rapidement remonté, aidé en cela par quelques années particulièrement humides. La mise en place d'un SAGE et d'un outil de gestion (modélisation) sont autant d'éléments qui permettent d'estimer que cette masse d'eau ne court pas de risque en 2015.

D'après l'étude des variations piézométriques, aucune masse d'eau ne présente une réelle baisse chronique de son niveau et, de ce fait, un risque de non atteinte du bon état. Seule exception : la masse d'eau de l'Albien captif.

La nappe de l'Albien est connue pour sa surexploitation qui, en Ile-de-France, en a supprimé l'artésianisme puis a entraîné une dépression piézométrique dès le 19^e siècle. Cependant des réductions drastiques de prélèvements ont inversé la tendance, les niveaux remontent. La partie captive de la nappe a été inscrite dans le SDAGE comme nappe de secours pour l'alimentation en eau potable, et ses prélèvements sont réglementés. Pour conclure, la nappe de l'Albien autrefois fortement déprimée, ne devrait plus courir de risque quantitatif.

L'étude des niveaux piézométriques n'ayant permis ni de déceler de risques actuels, ni d'évaluer l'impact anthropique, nous avons cherché à déterminer si l'équilibre entre prélèvements et ressource est assuré en comparant par masse d'eau, les volumes prélevés pour les besoins humains et la recharge. Pour cet exercice, nous nous sommes appuyés sur la base de données redevances de l'agence de l'eau, ce qui appelle des réserves à deux niveaux : concernant l'affectation des prélèvements à une masse d'eau puisque les aquifères captés ne sont pas indiqués, ainsi que concernant les volumes d'irrigation qui proviennent initialement de déclarations (généralement sous-estimés) et plus récemment de relevés de compteurs. Arbitrairement, les prélèvements ont été attribués à la première masse d'eau souterraine rencontrée, excepté pour l'Albien qui est renseigné. Les données concernant la recharge sont des données calculées par le modèle couplé STICS-MODCOU élaboré dans le cadre du PIREN Seine (Ecole Supérieure des Mines de Paris, M. LEDOUX), pour des mailles allant de 1 à 36 km². La recharge retenue pour cet exercice correspond à une moyenne calculée sur 30 ans (1974-2001). La moyenne des prélèvements porte sur une période de 5 ans (1997-2001).

La figure 7 montre l'importance des prélèvements effectués dans chaque masse d'eau, proportionnelle à la taille du camembert, et le rapport existant entre les volumes moyens prélevés et le volume moyen de la recharge. On peut considérer dans une première approche que plus cette proportion est forte, plus le risque potentiel est important. Les masses d'eau les plus exposées (colorées en jaune vif), situées le long de la Seine depuis Paris jusqu'à l'estuaire, ont, au plus, le tiers de leur recharge exploité directement par les prélèvements. Le risque de déséquilibre ne semble pas exister.

Le même exercice a été fait en cherchant à évaluer le risque maximum. Les volumes moyens prélevés ont été comparés à la recharge la plus petite observée au cours des 30 dernières années (cf figure 8) . Dans ce cas, les prélèvements viennent à dépasser la recharge sur plusieurs masses d'eau (en couleur rouge).

Les prélèvements et la recharge des masses d'eaux souterraines

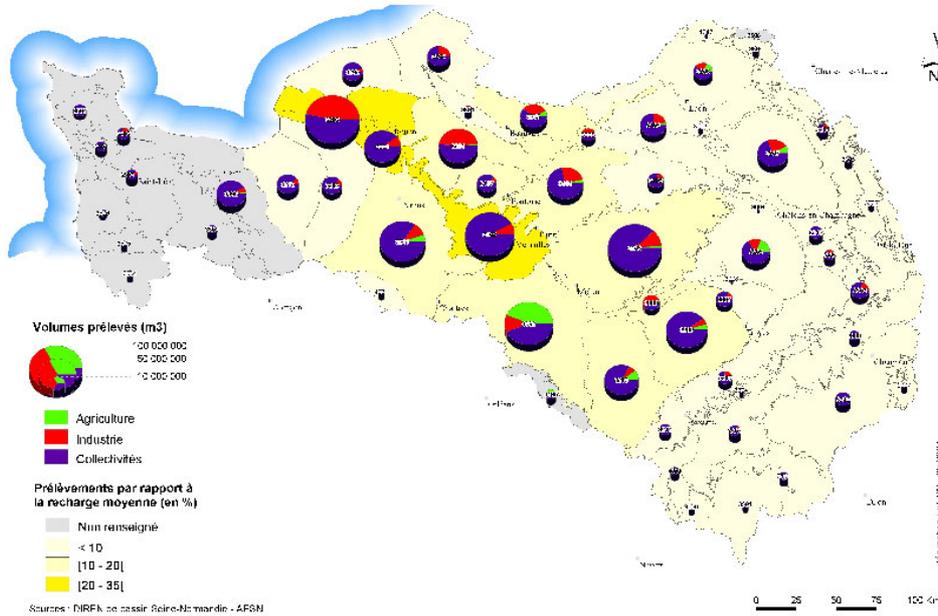


Figure 7 - Risque quantitatif encouru par les masses d'eau en année moyenne

Risques quantitatifs encourus par les masses d'eau souterraine

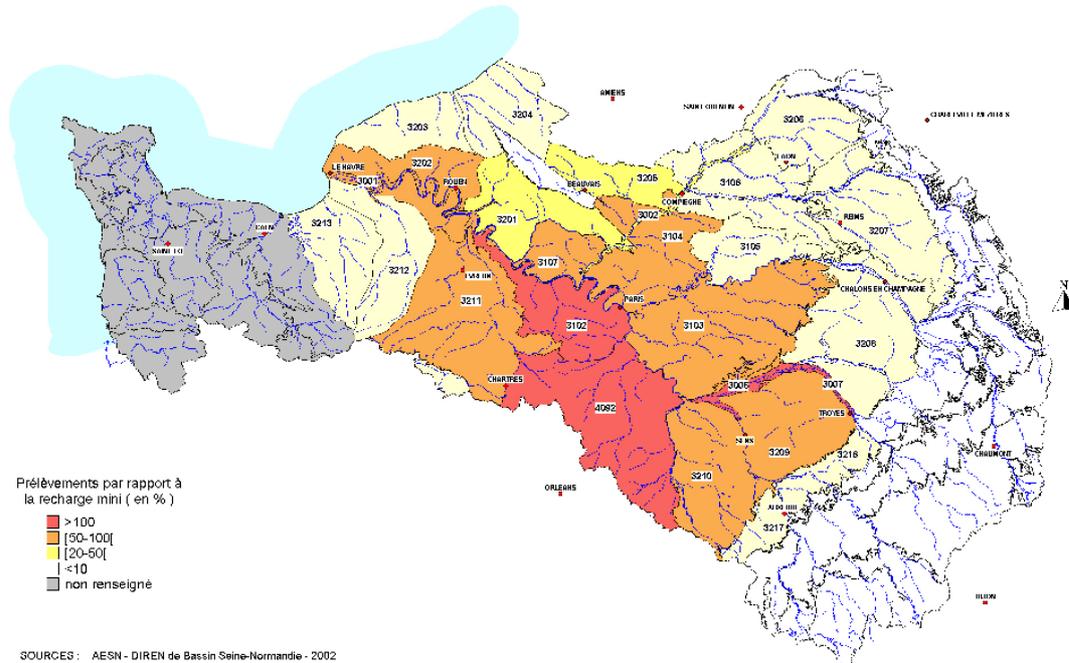


Figure 8 - Risque quantitatif maximal

Pour conclure, il convient d'insister sur le fait que ces résultats doivent être relativisés en fonction des observations piézométriques et d'avis d'experts sur les relations existant entre masses d'eau souterraine et eaux de surface notamment. En effet les masses d'eau qui pourraient présenter des risques, sont généralement réalimentées par les eaux de rivière en cas de prélèvements intensifs. Ce phénomène a pu être quantifié sur de nombreux forages effectués dans la craie à proximité des zones alluviales, les eaux prélevées peuvent alors provenir pour plus de 80% du cours d'eau. En l'absence de modélisation de chacune des masses d'eau, les interprétations resteront qualitatives. Toutefois, il est clair que les problèmes quantitatifs ne sont pas majeurs dans notre district.

Références bibliographiques

- [1] Michel Normand - BRGM , 2003 – Mise en œuvre de la DCE - Caractérisation initiale des masses d'eau souterraine - Guide méthodologique.
- [2] Eric Gomez , 2002 – Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse, ENSMP, 292 pages.
- [3] Anouk Desgeorges, Cécile Garnier, Septembre 2002 - Analyse de l'état quantitatif des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie - dans l'optique de la mise en oeuvre de la directive cadre européenne sur l'eau. AESN.

SESSION POSTERS

Pollution de la nappe libre de la craie

P. Benoit, B. Stavot

Laboratoire d'Hydrologie Benoit, 10170 Méry-sur-Seine

I. INTRODUCTION

L'aquifère crayeux, dans la région Champagne-Ardenne, correspond à un aquifère libre sollicité à la fois par l'agriculture, l'alimentation humaine et l'industrie.

De par ce caractère de nappe libre, il présente une vulnérabilité plus importante aux pollutions diffuses, quelque-en soient les origines.

La faible densité de population régionale sur la craie associée à la révolution agricole des années cinquante, consécutive au déboisement massif, est à l'origine du développement d'industries agroalimentaires pratiquant l'épandage de leurs effluents. Cet épandage, sur pentes faibles (<7%) a pour finalité première une épuration des eaux avant leur percolation dans la nappe. Le retour d'épandage sur parcelle agricole est de trois ans ou plus.

La pratique de l'épandage est actuellement bien maîtrisée et fait l'objet d'un suivi attentif par les industries agroalimentaires régionales dans le cadre de l'ASAE (association de suivi agronomique de l'épandage). outre le suivi agronomique des sols, la DRIRE impose un contrôle important de la qualité de la nappe phréatique sous les parcelles épandues, en ce qui concerne la physico-chimie de l'eau.

II. ORIGINE DES DONNEES

Elles proviennent des piézomètres sur zone d'épandage de quatre sites industriels proches, soit 170 piézomètres répartis sur 1400 kilomètres carrés. Les données les plus anciennes ont dix ans.

Les valeurs (deux mille deux cents séries d'analyses avec au moins douze paramètres par série) sont complétées par celles issues de deux autres sites industriels de même importance, à cent kilomètres au Nord, pour une surface de 300 kilomètres carrés et 23 piézomètres sur un même substrat géologique, pour comparaison.

Les analyses ont été réalisées par des méthodes normalisées ou validées par des laboratoires accrédités COFRAC. Elles ne portent que sur les éléments minéraux et les polluants organiques majeurs (DCO et NK).

Ces données nous ont permis de définir la notion de fond géochimique de l'eau de l'aquifère libre crayeux régional. De surcroît, elles montrent le caractère efficace du complexe argilo-humique des sols dans l'épuration des effluents. Enfin, elles permettent la mise en évidence de marqueurs géochimiques simples de pollution minérale.

III. RESULTATS

L'analyse des données permet l'approche du fond géochimique de la nappe pour un certain nombre d'éléments (chlorures, nitrates, nitrites, phosphates, sulfates, calcium, magnésium, sodium, potassium et ammonium).

Le rôle majeur de l'horizon pédologique est bien mis en évidence pour la fixation des cations. Cette fixation correspond à un échange d'ions de plus en plus marqué du calcium vers le potassium via le sodium, comme on l'observe dans la matrice de corrélations des éléments lessivés par les battements de nappe.

La minéralisation en CO₂ est liée majoritairement à l'horizon de surface. Les métaux lourds migrent sous forme de complexe organique et persistent en milieu réducteur ; l'azote ammoniacal fixé par le complexe argilo-humique est minéralisé rapidement en nitrate avant migration de la fraction non assimilée par les plantes.

Cette minéralisation peut également s'effectuer dans la frange capillaire. Le milieu réducteur est également à l'origine de la dénitrification dans la nappe. Enfin, il est observé une bonne corrélation entre chlorures et nitrates. Ce dernier point est à prendre en compte dans la problématique nitrate pour une approche raisonnées des solutions à apporter au problème.

Références bibliographiques

Duchaufour Ph. : Pédologie et classification, 1977, pp73 à 111, Masson éditeur
Lemaire G., Nicolardot B. : Maîtrise de l'azote dans les agro-systèmes, 318p, 1996, INRA édition.

Apport de la microgranulométrie à la connaissance du fonctionnement hydrologique d'un aquifère crayeux karstique exploité pour l'alimentation en eau potable

Matthieu Fournier¹, Nicolas Massei¹, Ludivine Dussart-Baptista¹, Michel Bakalowicz², Joël Rodet¹, Jean-Paul Dupont¹

¹ UMR CNRS 6143, Dépt. de Géologie, Université de Rouen 76821 Mont Saint Aignan
Cedex matthieu.fournier@univ-rouen.fr

² UMR CNRS Hydrosiences, Dépt. de Géologie, Université de Montpellier 2

I. INTRODUCTION

La granulométrie des matières en suspension (MES) constitue un traceur du transport particulaire. Ce transport s'effectue selon les conditions d'écoulement au sein des systèmes hydrologiques. Les MES ne constituent pas à elles seules un danger pour la qualité des eaux et la santé humaine. Cependant, elles offrent des sites d'adsorption sur lesquels les bactéries et les polluants peuvent se fixer. En cela, il convient de suivre et de comprendre leurs origines et leurs modalités d'engouffrement, de transport et de restitution au sein des aquifères karstiques exploités pour l'alimentation en eau potable.

La comparaison des distributions granulométriques des MES de 3 sites d'un système crayeux karstique de l'ouest du Bassin de Paris permet d'appréhender les propriétés de transport au sein de celui-ci et de mettre en évidence les connexions hydrauliques existantes. Ces données ont été traitées par analyse factorielle de Hill et Smith utilisant les variables quantitatives et qualitatives. Reliée aux comportements dynamiques de l'aquifère et de la Seine, cette étude met en évidence l'influence de la Seine et des séquences de pompage sur les propriétés de transport de l'aquifère.

II. SITE ET METHODES

II.1. Site d'étude

Le système karstique du Hannebot (fig.1) situé près de Villequier en Seine-Maritime est étudié depuis 1998 [1, 2] par le département de Géologie de l'Université de Rouen. Ce système binaire est constitué d'un cours d'eau permanent (le Bébec) qui draine un bassin versant de 8,6km² voué à l'agriculture et à l'élevage. Les eaux du Bébec s'engouffrent dans la craie cénomaniennne au droit d'une perte située sur la faille de Triquerville. La résurgence du Hannebot constitue l'exutoire de ce système karstique.

La résurgence karstique de ce système alimentait en eau les habitants des communes voisines jusqu'en 1994, les fréquentes interruptions d'alimentation causées par des pollutions turbides ont poussé le syndicat intercommunal d'alimentation en eau potable (SIAEP) à implanter un forage AEP dans la plaine alluviale à 130m de la source. Cependant, depuis bientôt 10ans de fonctionnement, le suivi sanitaire des eaux pompées au niveau de ce forage met en évidence une dégradation sensible de la qualité de celles-ci caractérisée par une augmentation de l'occurrence des restitutions turbides [1] et bactériennes [2].

Massei et al [1, 3, 4] ont montré que les vitesses apparentes entre la perte et la source sont de l'ordre de 70 à 180 m.s⁻¹ selon les conditions hydrodynamiques. Ceci met en évidence un transport typiquement karstique entre ces deux points séparés d'environ 2 km.

La source du Hannebot est une source de surverse à écoulement permanent. Son débit résulte du drainage de l'aquifère crayeux et de l'engouffrement des eaux de surface à la perte (eau du Bébec + eau de ruissellement lors des crues). La source est mise en charge au contact avec la nappe alluviale semi-perméable recouvrant l'aquifère crayeux dans la vallée de Seine. Un forage est situé dans la plaine alluviale à 130 m de la source. Il est tubé dans les alluvions et crépiné dans la craie. Il a été mis en service en 1994. L'essai de pompage effectué en 1993 a révélé un aquifère très transmissif ($2.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) et capacitif ($1.0 \cdot 10^{-3}$) permettant une production quotidienne de 4000 m^3 [5].

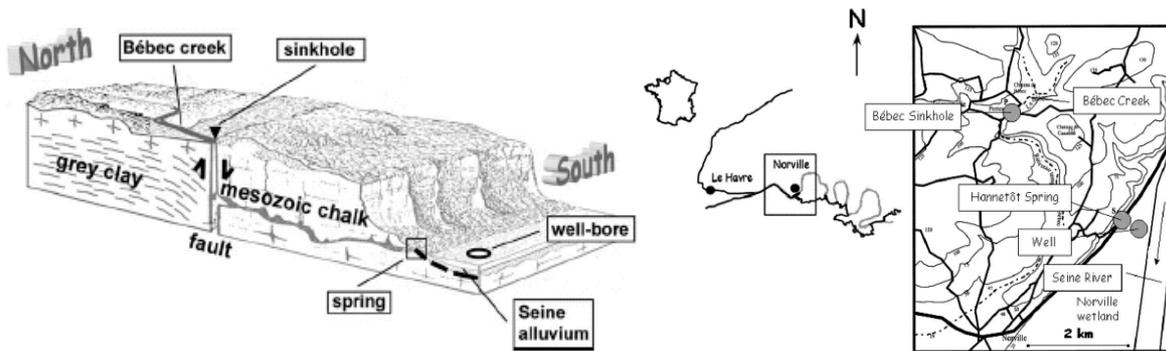


Figure 8 - Présentation du système karstique du Hannebot

Il alimente en eau potable un réservoir souterrain et deux châteaux d'eau qui distribuent l'eau à environ 5.000 habitants. La hauteur d'eau du réservoir contrôle les périodes de pompages au forage. En cycle de jour (6h-22h), les pompages se déclenchent lorsque la hauteur d'eau du réservoir atteint 2,5m. En cycle de nuit (22h-6h), les pompages se déclenchent lorsque cette hauteur atteint 1,5m. La journée, les séquences de pompages sont donc plus fréquentes mais moins longues. La nuit, il n'y a qu'une séquence de pompage d'environ 4h [6].

II.2. Jeux de données

Des traçages artificiels à la fluorescéine ont été effectués pour identifier les connexions hydrauliques au sein de l'hydrosystème. Ils ont montré que la connexion hydraulique entre les systèmes perte-source et perte-forage est artificielle et réalisée uniquement lors des séquences de pompage au forage. Les temps de transit moyen étant connus, chaque prélèvement d'eau à la perte peut être comparé aux prélèvements d'eau à la source et au forage. Les conditions de drainage de ces deux systèmes peuvent donc être étudiées en comparant les distributions granulométriques des MES restituées à la source et au forage à celles engouffrées à la perte. Ces distributions granulométriques sont calculées en fonction de la classe de taille des particules (argile $\leq 2\mu\text{m}$; $2\mu\text{m} < \text{silt très fin} \leq 4\mu\text{m}$; $4\mu\text{m} < \text{silt fin} \leq 8\mu\text{m}$; $8\mu\text{m} < \text{silt moyen} \leq 16\mu\text{m}$; $16\mu\text{m} < \text{silt grossier} \leq 31\mu\text{m}$; $31\mu\text{m} < \text{silt très grossier} \leq 63\mu\text{m}$). A partir de ces distributions par classe de taille, nous calculons des indices afin de caractériser le transport au sein de l'aquifère :

$$\text{indice de transfert : } A_{ct} = P_{ct} - (S_{ct} + F_{ct})$$

$$\text{indice de restitution des particules au forage : } D_{ct} = F_{ct} / A_{ct}$$

$$\text{indice de transport: } T_{ct} \text{ si } A_{ct} < 0 \Rightarrow \text{érosion, si } A_{ct} > 0 \Rightarrow \text{sédimentation}$$

$$\text{avec } ct = \text{classe de taille, } P = \text{perte, } S = \text{source, } F = \text{forage}$$

Les distributions granulométriques, les 2 premiers indices et les valeurs de piézométrie de la nappe et de hauteur d'eau en Seine définissent des variables quantitatives. Nous avons ajouté des variables qualitatives concernant la dynamique de la Seine (flot/jusant, revif/déchet), du pompage (présence/absence, cycle de nuit/cycle de jour/pompage forcé), ainsi que le

troisième indice de transport afin d'étudier le positionnement de ces variables dynamiques par rapport aux distributions granulométriques.

7 crues entre 1999 et 2003 ont été ainsi échantillonnées à la perte, la source et le forage, pour 3 d'entre elles nous connaissons les séquences de pompage et pour l'une d'entre elle, nous avons réalisé un pompage en continu afin d'observer l'incidence de l'exploitation sur les propriétés de transport de l'aquifère karstique. L'échantillonnage des 7 crues constitue le premier jeu de données, le second correspond aux 3 crues pour lesquelles nous connaissons les chroniques de pompage au forage.

II.3. L'analyse mixte de Hill et Smith

La méthode d'analyse statistique multidimensionnelle la plus répandue est l'analyse en composantes principales (ACP). Elle a été proposée pour la première fois par Pearson [7]. Elle s'applique aux variables quantitatives. L'analyse des correspondances multiples (ACM) est une méthode analogue à l'ACP qui s'applique aux variables qualitatives. Elle a été éditée la première fois par Hirschfeld [8].

Avec le développement de la micro-informatique, ces méthodes d'analyses multivariées ont été massivement utilisées par toutes les disciplines scientifiques, essentiellement les écologistes. En géologie, l'intérêt pour ces méthodes est venu plus tardivement. L'intérêt est de pouvoir traiter statistiquement de grands tableaux de données pour en tirer des facteurs synthétiques que l'on interprète ensuite. Cependant, il n'est pas rare que ces tableaux conjuguent des variables quantitatives et qualitatives. Quand on désire traiter de tels tableaux, la technique couramment utilisée est de coder les variables quantitatives pour les transformer en variables qualitatives afin de réaliser une ACM [9]. Cependant, coder une variable quantitative d'une part, pose des problèmes du codage, du choix de la partition etc... ; d'autre part entraîne une perte d'information. Mais surtout, on a bien mis en évidence le fait que la variable numérique disparaît pour être remplacée par l'ensemble de toutes les fonctions de cette variable codée. Donc on considère cette variable, non pas pour ses valeurs numériques, mais pour la structure qu'elle définit sur l'ensemble des observations. Cette technique souvent employée, n'est pas satisfaisante [9].

Nous devons utiliser une méthode d'analyse multivariée qui tolère à égalité les variables quantitatives et qualitatives. La notion « à égalité » veut dire qu'une variable quantitative, qui compte pour une colonne, doit être de même poids qu'une variable qualitative quelque soit le nombre des modalités. Nous présentons ici une telle méthode : l'analyse de Hill et Smith (AHS). Cette analyse est parfaitement adaptée aux mélanges de types de variables. Les résultats sont très lisibles : l'interprétation pour les variables quantitatives se fait comme en ACP, et celle pour les variables qualitatives se fait comme en ACM.

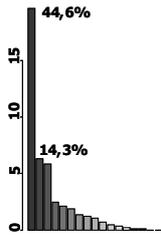
L'AHS constitue tout simplement un nouveau triplet statistique en accolant purement et simplement les tableaux des deux analyses de base (ACP et ACM). L'analyse contrôle que la compatibilité entre l'ACP et l'ACM est assurée en vérifiant que les pondérations des analyses de départ sont identiques. La pondération commune des lignes des tableaux de départ est conservée comme pondération des lignes du nouveau tableau de l'AHS. Par contre, les pondérations des colonnes sont modifiées. En effet, dans l'ACM chaque colonne est une modalité. On somme alors les poids des porteurs de cette modalité et on divise par le nombre de variables. Ceci attribue des poids aux modalités tel que chaque variable totalise (par ses modalités) un poids égal à un sur le nombre de variables. Dans l'AHS, on fait la même chose pour les variables qualitatives mais en plus on divise par le nombre de variables total (qualitatives et quantitatives) et on attribue aux variables quantitatives le poids uniforme de un sur le nombre total de variables. La somme totale des poids des colonnes du tableau vaut ainsi 1. On obtient ainsi ce nouveau triplet statistique qui donne une analyse d'inertie

III.2. Impact des pompages sur les propriétés de transport de l'aquifère karstique

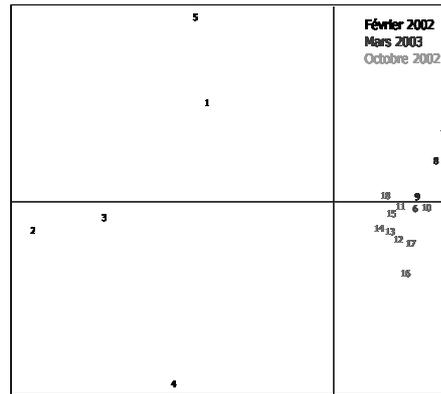
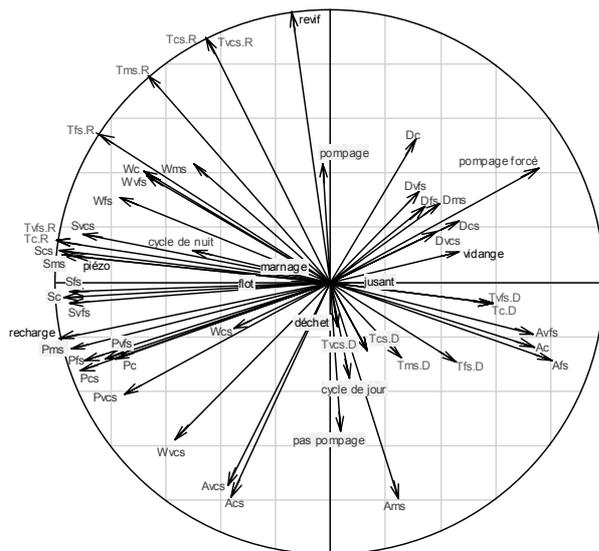
Nous avons ici effectué une AHS sur le jeu de données pour lequel nous connaissons les cycles de pompage au forage. Ce jeu de données regroupe 3 périodes d'échantillonnage dont celle de mars 2003 durant laquelle nous avons réalisé un pompage en continu en conservant le débit d'exploitation de $40\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ pendant 14h. Ce jeu de données permet de focaliser notre étude sur l'impact des pompages sur les distributions granulométriques et donc sur les propriétés de transport de l'aquifère karstique.

Le diagramme des valeurs propres (figure 3a) de l'analyse de Hill et Smith montre que les deux premiers axes factoriels expriment 58,9% de la variance totale. Le premier axe (figure 3) discrimine sur sa partie négative les distributions granulométriques de la perte, de la source et du forage, quelles que soient les tailles des particules, ainsi que la remise en suspension au sein du système. Celles-ci sont associées aux variables témoins d'un hydrodynamisme fort (piézométrie, recharge de l'aquifère, flot, marnage, et cycle de pompage de nuit). En opposition, sur la partie positive de F1, nous avons les variables de dépôts au sein du système et de fortes restitutions au forage en association avec la vidange de l'aquifère et le pompage au forage. L'axe F2 oppose sur sa partie positive un fort hydrodynamisme avec le revif, les pompages, le pompage continu, et les phénomènes de remise en suspension de matériels intrakarstiques de toutes tailles, puis sur sa partie négative un faible hydrodynamisme avec le déchet, les absences de pompages et le cycle de jour permettant le dépôt de matériel à l'intérieur du système.

Les séquences de pompages influent donc sur les distributions granulométriques des MES au forage. Le pompage en continue de 14h a engendré les taux de restitution des MES au forage les plus forts. Les pompages en cycle de nuit engendrent le même phénomène mais d'amplitude plus faible.



3a : valeurs propres des axes factoriels



3b : plan F1F2 (espace des individus)

3c : plan F1F2 (espace des variables)

Figure 3 - AHS du 2^{ème} jeu de données : étude du fonctionnement contraint par le forage.

IV. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les restitutions granulométriques dépendent en premier lieu de ce qui s'engouffre à la perte, mais les propriétés de transport au sein de l'aquifère, définies par la dynamique de l'aquifère, celle de la Seine et le fonctionnement du forage, vont moduler ces restitutions. Nous observons des restitutions similaires pour les fractions fines (argiles, silts très fins et fins) puis pour les fractions grossières (silts grossiers et très grossiers), les silts moyens ayant des restitutions intermédiaires entre ces deux groupes. Ceci montre que les conditions de transport sont différentes pour ces 3 groupes de tailles.

Cette étude montre que les propriétés de transport, régissant les distributions granulométriques au sein du système, dépendent naturellement de la dynamique de l'aquifère (piézométrie, période de hautes ou basses eaux), et de la dynamique de la Seine (flot/jusant, revif/déchet) constituant ainsi une limite à condition de Fourier (limite à condition de potentiel et de flux) (10). Ces deux dynamiques déterminent un gradient hydraulique et donc les conditions d'écoulement au sein de l'aquifère. Les séquences de pompage augmentent artificiellement ce gradient hydraulique au niveau du forage. L'impact du pompage sur les propriétés de transport des particules est moins forte que la dynamique de l'aquifère mais plus que celle de la Seine sur les restitutions granulométriques au forage.

Nous pouvons donc conclure à la suite de cette analyse statistique particulière que le système karstique du Hannebot est un aquifère drainé naturellement et principalement par la source de surverse du Hannebot et par la Seine pour la partie de l'aquifère située sous les alluvions. Le forage réalise un drainage artificiel de cette partie de l'aquifère. Ceci permet d'établir une connexion hydraulique avec le système perte-source, d'augmenter la granulométrie et la concentration des MES restituées au forage. Ce phénomène est à relier à la dégradation de la qualité des eaux du forage (augmentation en fréquence et en importance des pics turbides et bactériologiques).

Références bibliographiques

- [1] Massei, N., 2001 - Transport de particules en suspension dans l'aquifère crayeux karstique et à l'interface craie/alluvions. *PhD, Université de Rouen, Rouen, 189p.*
- [2] Dussart-Baptista, L., 2003 - Transport des particules en suspension et des bactéries associées dans l'aquifère crayeux Haut-Normand. *PhD, Université de Rouen, 234 p.*
- [3] Massei, N., Lacroix, M., Wang, H.Q., Mahler, B.J. and Dupont, J.P., 2002 - Transport of suspended solids from a karstic to an alluvial aquifer: the role of the karst/alluvium interface. *Journal of Hydrology, 260[1-4]: 88-101.*
- [4] Massei, N., Wang, H.Q., Dupont, J.P., Rodet, J. and Laignel, B., 2003 - Assessment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. *Journal of Hydrology, 275[1-2]: 109-121.*
- [5] De La Quèrière, P., 1994 - SIAEP de Saint Maurice d'Etelan: réalisation d'un nouveau forage. 94 HNO 001, rapport BRGM.
- [6] Fournier, M., 2003 - Impact anthropique sur le fonctionnement et les propriétés de transport d'un aquifère crayeux karstique exploité pour l'AEP, *rapport DEA, Université de Montpellier II, 78p.*
- [7] Pearson, K., 1901 – On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *Philos. Mag., Ser.6.2:559.*
- [8] Hirschfeld, H.O., 1935 – A connection between correlation and contingency. *Proc. Camb. Phil Soc. 31:520.*

[9] Escofier, B., 1979 – Traitement simultané de variables qualitatives et quantitatives en analyse factorielle [qualitatives et quantitatives]. *Les cahiers de l'Analyse des Données*, vol. IV, 1979, n°2, p.137-146.

[10] De Marsily, G., 1994 – Hydrogéologie : comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants. *Ecoles des mines de Paris*, 244p.

Les méthodes multitableaux : une alternative à l'analyse factorielle des données environnementales (application à la géochimie d'un système karstique crayeux du Bassin de Paris)

Matthieu Fournier¹, Michaël Aubert², Nicolas Massei¹, Ludivine Dussart-Baptista¹, Michel Bakalowicz³, Joël Rodet¹, Jean-Paul Dupont¹

¹ UMR CNRS 6143, Dépt. de Géologie, Université de Rouen 76821 Mont Saint Aignan
Cedex matthieu.fournier@univ-rouen.fr

² Laboratoire d'Ecologie, Département de Biologie, Université de Rouen

³ UMR CNRS Hydrosociences, Dépt. de Géologie, Université de Montpellier 2

I. INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, les analyses factorielles (ACP, AFC, ACM) ont démontré leur efficacité dans l'étude de grands tableaux de données. Les graphiques, qui transforment en distances euclidiennes les proximités statistiques entre les éléments, permettent de distinguer des regroupements, des oppositions, des tendances, impossibles à discerner directement sur un grand tableau de données. Mais ces analyses ont été conçues pour étudier un seul tableau rectangulaire de données à la fois. Or les personnes qui analysent des données multivariées sont de plus en plus fréquemment confrontées à l'étude simultanée de plusieurs tableaux rectangulaires.

Aussi, les méthodes multitableaux, utilisant les mêmes principes que les analyses factorielles, ont été mises au point pour permettre l'analyse conjointe de plusieurs tableaux de données. Il s'agit le plus souvent d'une suite de tableaux indicés par le temps, d'un ensemble de tableaux rectangulaires provenant d'un unique tableau de dimension trois, ou d'un tableau initialement unique dans lequel on distingue des sous-tableaux.

II. SITE ET METHODES

II.1. Site d'étude

Le système karstique du Hannebot (figure 1) situé près de Villequier en Seine-Maritime est étudié depuis 1998 [1, 2] par le département de Géologie de l'Université de Rouen. Ce système binaire est constitué d'un cours d'eau permanent (le Bébec) qui draine un bassin versant de 8,6 km² voué à l'agriculture et à l'élevage. Les eaux du Bébec s'engouffrent dans la craie cénomaniennes au droit d'une perte située sur la faille de Triquerville. La résurgence du Hannebot constitue l'exutoire de ce système karstique.

La résurgence karstique de ce système alimentait en eau les habitants des communes voisines jusqu'en 1994, les fréquentes interruptions d'alimentation causées par des pollutions turbides ont poussé le syndicat intercommunal d'alimentation en eau potable (SIAEP) à implanter un forage AEP dans la plaine alluviale à 130m de la source. Cependant, depuis bientôt 10ans de fonctionnement, le suivi sanitaire des eaux pompées au niveau de ce forage met en évidence

une dégradation sensible de la qualité de celles-ci caractérisée par une augmentation de l'occurrence des restitutions turbides [1] et bactériennes [2].

Massei et al [1, 3, 4] ont montré que les vitesses apparentes entre la perte et la source sont de l'ordre de 70 à 180 m.s⁻¹ selon les conditions hydrodynamiques. Ceci met en évidence un transport typiquement karstique entre ces deux points séparés d'environ 2 km.

La source du Hannetot est une source de surverse à écoulement permanent. Son débit résulte du drainage de l'aquifère crayeux et de l'engouffrement des eaux de surface à la perte (eau du Bébec + eau de ruissellement lors des crues). La source est mise en charge au contact avec la nappe alluviale semi-perméable recouvrant l'aquifère crayeux dans la vallée de Seine.

Un forage est situé dans la plaine alluviale à 130 m de la source. Il est tubé dans les alluvions et crépiné dans la craie. Il a été mis en service en 1994. L'essai de pompage effectué en 1993 a révélé un aquifère très transmissif ($2.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) et capacitif ($1.0 \cdot 10^{-3}$) permettant une production quotidienne de 4000 m³ [5].

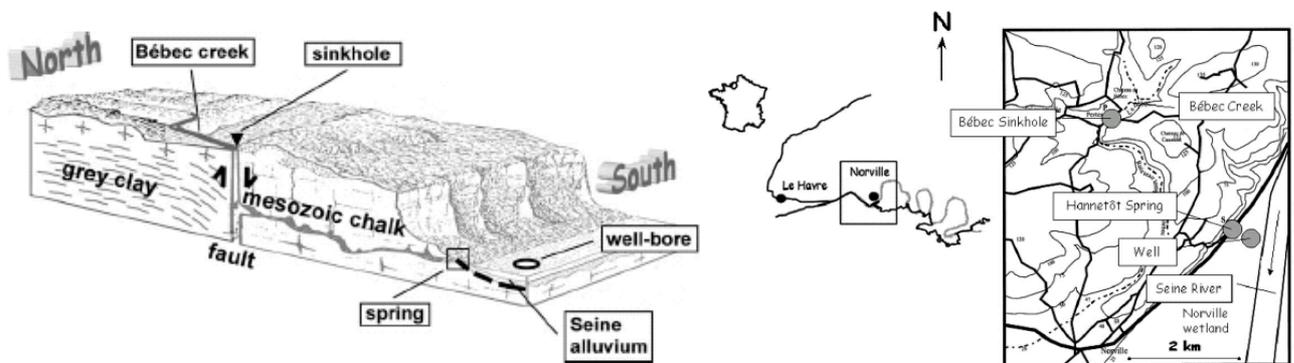


Figure 1 - Présentation du système karstique du Hannetot.

II.2. Jeux de données

Les données traitées ici comprennent un tableau de 12 variables quantitatives physico-chimiques (turbidité, conductivité électrique, indice de saturation de la calcite, K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Na^+ , SiO_2) mesurées sur 95 échantillons répartis sur les 3 sites du système karstique (perte du Bébec, source, forage) et prélevés durant 3 crues (décembre 1999, avril 2000, novembre 2000). Ce tableau est divisé en 9 sous-tableaux selon le site et l'événement pluvieux correspondant (tableau 1). A ce même tableau, 4 variables (PO_4^{3-} , Fe , NH_4^+ , flow) sont disponibles à la perte du Bébec et à la source pour les mêmes dates. Comme la méthode Statis nécessite que les variables ou les échantillons soient communs à l'ensemble des sous-tableaux du jeu de données, nous devons réaliser deux analyses différentes : l'une avec les 12 variables communes aux 9 sous-tableaux (1B, 1S, 1F, 2B, 2S, 2F, 3B, 3S, 3F), puis l'autre avec les 16 variables communes aux 6 sous-tableaux (1B, 1S, 2B, 2S, 3B, 3S). La première analyse nous donnera une typologie par date et par site de l'évolution des variables, la seconde permettra de focaliser notre étude sur le fonctionnement naturel du système entre la perte et la source et d'observer notamment le positionnement du débit par rapport aux autres variables.

<i>sous-tableaux</i>	Déc. 1999 perte	Déc. 1999 source	Déc. 1999 forage	Avr. 2000 perte	Avr. 2000 source	Avr. 2000 forage	Nov. 2000 perte	Nov. 2000 source	Nov. 2000 forage
code	1B	1S	1F	2B	2S	2F	3B	3S	3F

Tableau 1 - Définition des sous-tableaux.

Le fait de traiter plusieurs tableaux simultanément pose le problème de la méthode de normalisation des variables. Face à un tableau de variables quantitatives exprimées dans des unités différentes, l'ACP normée est généralement utilisée. Mais dans le cas des analyses multitableaux cela n'est pas toujours souhaitable. Nous avons centré les variables par bloc de lignes (toutes les variables de chacun des blocs ont une moyenne nulle) et réduit globalement (la variance globale est alors ramenée à 1). Cette procédure de normalisation des variables des données multitableaux (figure 2) a été initiée par Bouroche [6].

II.3. Les méthodes multitableaux.

Les méthodes multitableaux (ATP, AFM, Statis) [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18] permettent l'analyse conjointe de plusieurs tableaux à deux entrées [ligne (stations) x colonne (variables)]. Leurs bases théoriques ont été développées par Escoufier [9, 10, 11]. Le principe général est de définir dans un premier temps la structure commune à ces tableaux, appelée "compromis", puis d'étudier la variabilité de cette structure à travers chaque tableau. Elles procèdent en 3 phases : la comparaison des tableaux (interstructure), la description de la structure commune aux tableaux (compromis), et l'étude de chaque tableaux et de leurs différences (intrastructure). L'interstructure et le compromis permettent de définir le plan factoriel moyen dans lequel seront projetés les nuages des variables puis des individus des différents tableaux lors de l'intrastructure (figure 3). Ainsi les résultats de chaque tableau sont comparables ; ce qui n'est pas le cas avec les analyses factorielles.

III. RESULTATS ET INTERPRETATION

III.1. Statistiques sur les 9 sous-tableaux

III.1.a. interstructure

Les deux premières valeurs propres de l'interstructure (Figure 4) expriment 79,09% de la variance totale, il est donc possible de conserver uniquement les 2 premiers axes factoriels. L'interstructure montre que les sous-tableaux 1B, 1S, 2B, 3B et 3S sont groupés sur la partie positive de l'axe F1. Ceci révèle de fortes corrélations entre ces 5 sous-tableaux. Ces 5 sous-tableaux déterminent fortement l'interstructure puisqu'ils ont les poids les plus forts (Tableau 2). Les 4 autres sous-tableaux (1F, 2F, 3F et 2S) sont moins groupés et sont positionnés sur la partie négative de l'axe F2 (Figure 5).

Tous les individus de la perte du Bébec (1B, 2B, 3B) et ceux de la source (1S, 3S), dès lors que l'événement pluvieux est intense, subissent la même évolution puisqu'ils sont fortement corrélés entre eux. L'interstructure met en évidence à la fois le forçage climatique sur les échantillons et la vulnérabilité des sites.

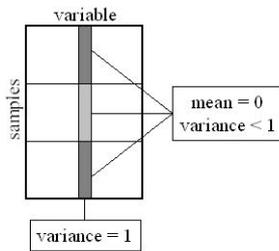


Figure 2 - Normalisation de Bouroche

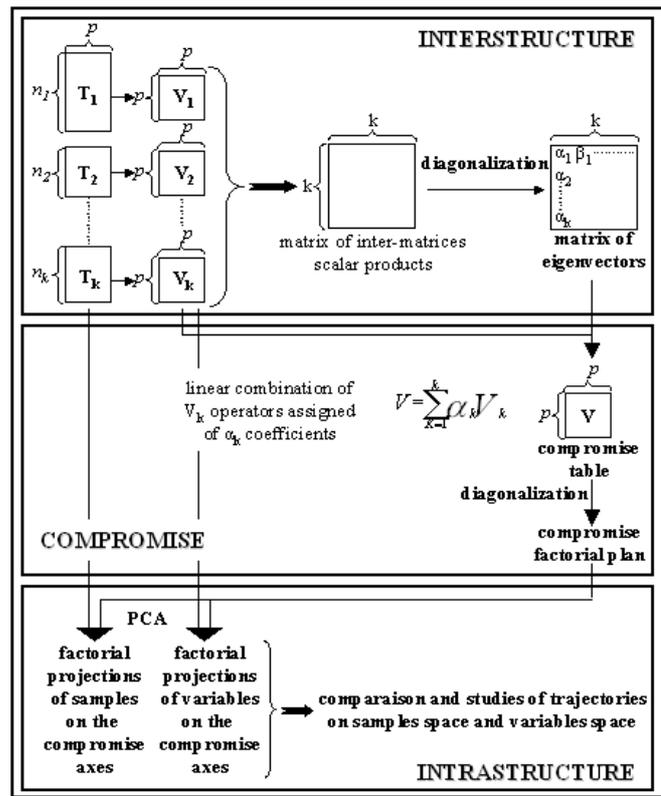


Figure 3 - Schéma du principe général des méthodes multitables (modifié d'après [12])

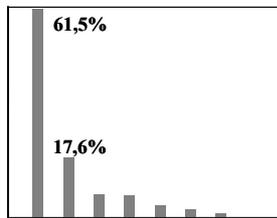


Figure 4 - Valeurs propres des axes

sub-table	weights	Cos ²
1B	3,958e-01	0,919
1S	3,953e-01	0,942
1F	3,071e-01	0,385
2B	3,761e-01	0,787
2S	1,318e-01	0,011
2F	2,970e-01	0,301
3B	3,731e-01	0,779
3S	3,948e-01	0,885
3F	2,251e-01	0,128

Tableau 2 - Poids et adéquation entre les sous-tableaux et le plan du

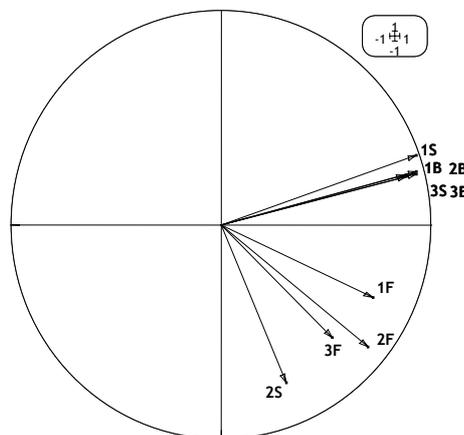


Figure 5 - Interstructure de l'analyse des 9 sous-tableaux

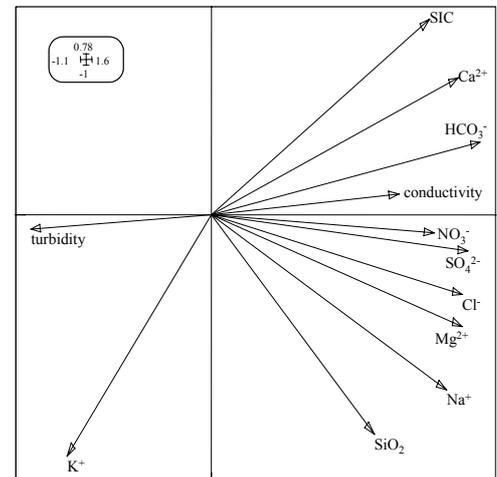


Figure 6 - Compromis de l'analyse des 9 sous-tableaux

III.1.b. Compromis.

Dans le plan du compromis (figure 6), l'axe F1 du compromis est défini positivement par toutes les variables sauf la turbidité et le K^+ qui déterminent la partie négative. L'axe F2 oppose SIC et Ca^{2+} dans sa partie positive, avec K^+ , SiO_2 et Na^+ dans sa partie négative. Le compromis sépare donc, dans la partie positive de F1 et de F2 des variables caractéristiques des eaux de nappe (SIC, Ca^{2+} , HCO_3^- et la conductivité), sur la partie positive de F1 et négative de F2 des variables caractérisant la géochimie naturelle du Bébec (SiO_2 , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), puis sur la partie négative de F1 et de F2 la turbidité et K^+ qui mettent en évidence la présence d'eau de ruissellement.

III.1.c. Intrastructure

Les sous-tableaux 1B et 1S présentent une projection des variables très voisine de celle du compromis (Figure 7). Ceci est normal puisqu'ils ont une adéquation maximale avec le plan compromis (\cos^2 respectivement égal à 0,919 et 0,942). Les 5 sous-tableaux (1B, 1S, 2B, 3B, 3S), ayant les plus fortes adéquations avec le compromis, présentent des projections de leurs variables plus ou moins proches de celles du compromis. Ceci témoigne d'une évolution semblable à celle définie par le compromis. Ainsi dans ces 5 sous-tableaux, on retrouve l'opposition de la turbidité et de K^+ au reste des variables notamment celles caractéristiques de la nappe de la craie. Les individus de ces sous-tableaux sont séparés selon cette opposition. On constate que l'évolution, qui se fait principalement selon l'axe F1, est la même pour ces 5 sous-tableaux. Les premiers individus de l'épisode pluvieux sont positionnés sur la partie positive de F1 en opposition à la turbidité et au K^+ . Les suivants mettent en évidence l'arrivée des eaux de ruissellement marquées par la proximité de la turbidité et de K^+ . On observe ensuite un retour vers la partie positive de F1 matérialisant la fin du pic de crue.

Les 4 autres sous-tableaux (1F, 2S, 2F, 3F) possèdent des poids, et des \cos^2 beaucoup plus faibles (Tableau 2) ; l'adéquation avec le compromis est moins bonne expliquant ainsi les projections des variables très différentes de celles du compromis. La répartition des individus se fait selon l'axe F2. La conductivité et la turbidité ont une faible contribution voire nulle pour la conductivité au forage en décembre 1999 et avril 2000. Ceci met en évidence un comportement différent pour ces 4 groupes. Cependant, l'évolution des individus de la source en avril 2000 (2S) met en évidence le forçage climatique vu avec les individus des 5 sous-tableaux précédents. Celui-ci est beaucoup moins marqué mais il est mis en évidence avec la proximité des individus de milieu de crue (pic turbide) par rapport à la turbidité. Ceci marque le fait que la connexion entre la perte et la source est permanente. Les eaux de la nappe de la craie à la source sont constamment diluées par des eaux de surface qui sont plus ou moins turbides. Ainsi, les sous-tableaux 1S, 2S et 3S mettent en évidence un gradient de dilution des eaux de nappe par les eaux de surface dépendant directement du forçage climatique (intensité et durée de l'événement pluvieux). Celui-ci est croissant entre l'événement d'avril 2000, celui de novembre 2000 puis celui de décembre 1999, et de fait l'apport d'eau de ruissellement à la source augmente entre ces 3 événements comme l'atteste la position de la turbidité et de K^+ (plus la position est éloignée du centre de gravité, plus la variable contribue à la discrimination des individus et participe à l'expression de la variance totale).

L'évolution des individus au forage semble être beaucoup plus aléatoire. On observe plus le forçage climatique pourtant des traçages artificiels à la fluorescéine [1, 3, 4] ont mis en évidence la connexion entre la perte et le forage.

Mais le fonctionnement totalement anthropique du forage explique les évolutions aléatoires des groupes 1F, 2F et 3F.

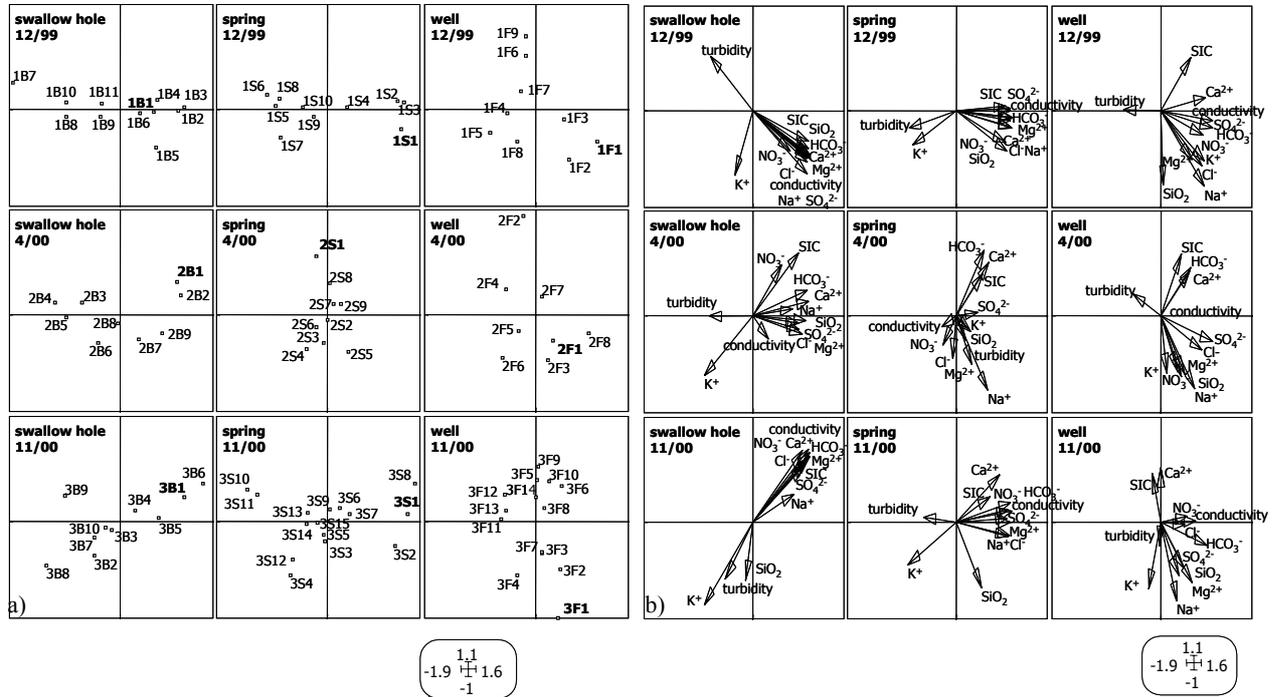


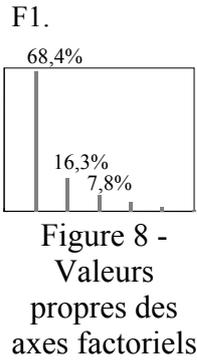
Figure 7 - Intrastructure de l'analyse des 6 sous-tableaux
 a) projection des individus
 b) projection des variables

III.2. Statistiques sur les 6 sous-tableaux

Ce second jeu de données permet de focaliser notre étude sur le fonctionnement naturel du système entre la perte et la source puisque nous enlevons le site du forage dont les variations sont artificielles. De plus, il permet d'observer notamment le positionnement du débit par rapport aux autres variables.

III.2.a. Interstructure

Les valeurs propres des deux premiers axes factoriels de l'interstructure (Figure 8) expriment 84,79% de la variance totale, il est donc possible de conserver uniquement ces 2 axes. L'interstructure montre que les sous-tableaux 1B, 1S, 2B, 3B et 3S sont groupés sur la partie positive de l'axe F1. Ceci révèle de fortes corrélations entre ces 5 sous-tableaux qui déterminent fortement l'interstructure puisqu'ils ont les poids les plus forts (Tableau 3). Le sous-tableau (2S) détermine la partie négative de l'axe F2 (Figure 9). Par comparaison avec l'analyse précédente (Figure 5), on remarque que l'opposition entre ce sous-tableau et les autres est beaucoup mieux exprimée puisque le groupe 2S détermine plus fortement F2 et les autres déterminent plus fortement.



sub-table	weights	Cos ²
1B	4,530e-01	0,867
1S	4,776e-01	0,947
2B	4,326e-01	0,712
2S	8,510e-02	0,006
3B	4,301e-01	0,706
3S	4,327e-01	0,711

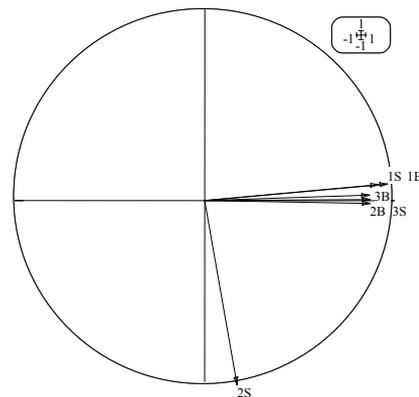


Figure 9 - Interstructure de l'analyse des 6 sous-

Tableau 3 - Poids et adéquation entre les sous-tableaux et le plan du compromis

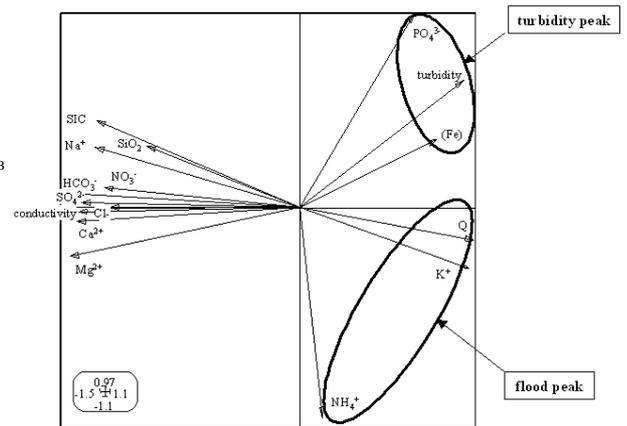


Figure 10 - Compromis de l'analyse des 6 sous-tableaux

III.2.b. Compromis

Dans le plan du compromis (Figure 10), l'axe F1 du compromis est défini positivement par la turbidité, le débit, PO_4^{3-} , (Fe) , K^+ , toutes les autres variables sauf NH_4^+ déterminent la partie négative. L'axe F2 est défini, dans sa partie positive, par la turbidité et PO_4^{3-} , en opposition avec NH_4^+ . Le débit et K^+ ajoutés aux variables caractéristiques des eaux de ruissellement (turbidité, PO_4^{3-} et (Fe)) forment un groupe de variables mettant en évidence les ondes de crues. Ce groupe est en opposition avec les autres variables. La position de la turbidité et du débit est une donnée importante pour caractériser les processus de transfert du matériel particulaire au sein du système karstique. Le plan du compromis montre que ces deux variables ne sont pas proches l'une de l'autre et en opposition sur l'axe F2. Cette « ACP moyenne » met en évidence que les pics de turbidité et de débit ne sont pas restitués simultanément.

III.2.c. Intrastructure

Nous remarquons que la structure du compromis est assez bien conservée au niveau de l'intrastructure de chaque sous-tableau (Figure 11) sauf pour l'épisode d'avril 2000 à la source qui présente de faibles variations, proches du centre de gravité, témoignant de la faible dilution des eaux de la nappe par les eaux de surface introduite à la perte. Cette faible dilution est due à la faible intensité de cet événement pluvieux.

Les trajectoires (flèches noires) matérialisent l'évolution chronologique des individus dans chaque sous-tableau. Comme les plans factoriels et les échelles sont les mêmes, la projection de ces trajectoires dans l'espace des variables permet d'observer l'évolution chronologique des individus par rapport aux variables. Avec ce moyen, l'analyse des événements pluvieux de décembre 1999 et de novembre 2000 met en évidence des phénomènes de remise en suspension. Les sous-tableaux 1B et 3B montrent une évolution classique du pôle des variables caractéristiques des eaux de nappe à gauche vers le pôle eau de ruissellement puis le pic de crue pour enfin retourner vers des valeurs initiales. Ceci met en évidence que

l'introduction du pic turbide se fait avant celle du pic de crue. Massei, [1, 3, 4] et Dussart-Baptista [2, 19] ont déjà observé et expliqué ce phénomène.

A la source, les restitutions sont différentes. Les amplitudes de variations sont plus faibles ce qui matérialise l'effet et l'importance de la dilution des eaux de la nappe par les eaux de surface introduites à la perte. Dans l'évolution chronologique des échantillons, la restitution du pic turbide observé à la perte est matérialisée par l'individu 1S8. Celui-ci correspond à une restitution par transfert direct. Nous observons à la source la restitution d'un 1^{er} pic turbide qui n'est pas observé à la perte. Cette turbidité, restituée à la source sans avoir été engouffrée à la perte, correspond donc à la remise en suspension de sédiments intrakarstiques.

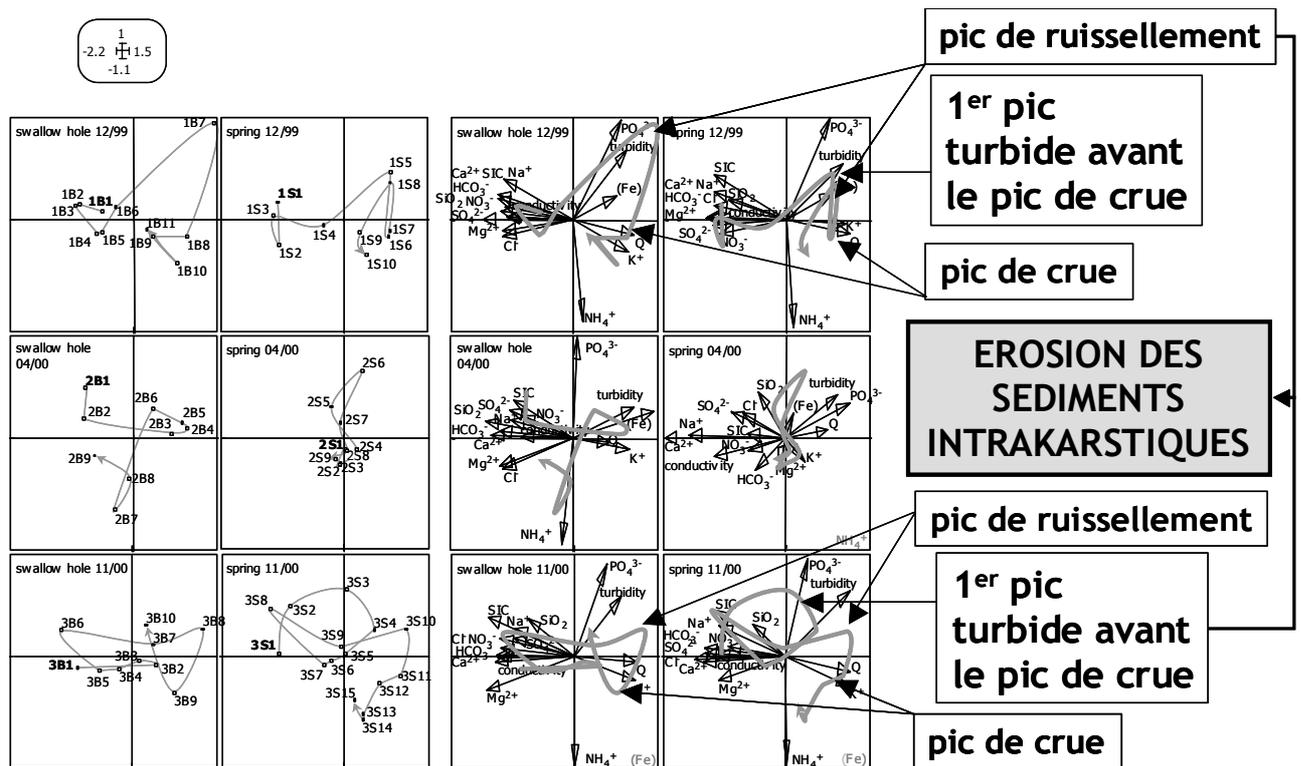


Figure 11 - Intrastructure de l'analyse des 6 sous-tableaux

- a) projection des individus
- b) projection des variables

Pour la crue de novembre 2000, nous observons également la restitution à la source de deux pics turbides. En effet, la géochimie des échantillons suit une évolution partant du pôle eau de nappe pour aller vers un premier pic turbide, puis pour retourner vers le pôle eau de nappe. A partir du retour vers ce pôle, nous remarquons, en comparant les graphes de la perte et de la source pour la crue de novembre 2000, que l'évolution géochimique des échantillons de la source est identique à celle des échantillons de la perte. Ceci marque le transfert direct, avec une évolution partant du pôle eau de nappe, vers un pic turbide, puis vers le pic de crue pour enfin retourner vers le centre de gravité. Le premier pic turbide caractérise de la remise en suspension. Comme cet événement pluvieux correspond à la première crue après le régime d'été, il est fortement probable que l'engouffrement des eaux de surface à la perte ait permis, par effet piston, la remise en suspension des sédiments intrakarstiques déposés lors de la période d'été.

IV. DISCUSSION ET CONCLUSION

Le système karstique du Hannefort est de faible dimension avec des vitesses de transfert rapides. Il est très réactif et faiblement inertiel. Le fonctionnement typiquement karstique du système engendre la dilution des eaux de nappe par des eaux de surface introduites à la perte. Le transfert et la restitution rapides de ces eaux mélangées au sein de la zone noyée permettent de conserver la chronologie de l'engouffrement des eaux de surface à la perte.

L'analyse du premier jeu de données par la méthode Statis a permis de caractériser la vulnérabilité des différents sites en fonction du forçage climatique et de distinguer le fonctionnement naturel du système perte-source et le fonctionnement artificiel du forage. La possibilité de focaliser notre étude sur le système naturel (2^{ème} jeu de données) avec l'utilisation du débit a permis de caractériser très finement les processus au sein du système karstique avec la mise en évidence des remises en suspension de sédiments intrakarstiques avant les ondes de crue.

Ces résultats mettent en avant les possibilités des méthodes multitableaux par rapport à celle des ACP employées classiquement pour des grands tableaux de données afin de distinguer des phénomènes généraux, différencier des groupes d'individus et de variables. Mais les ACP présentent des limites lorsque l'on étudie un ensemble de données regroupées en plusieurs tableaux. Notamment, elles ne permettent pas de comparer les études entre-elles puisque les plans factoriels obtenus sont tous différents.

Dès lors que des prélèvements ont été répétés aux mêmes endroits à différents moments, les méthodes d'analyses multitableaux permettent de rendre compte à la fois des phénomènes globaux comme le font les ACP, mais aussi de focaliser l'étude sur les phénomènes spécifiques ayant lieu en certains endroits et en certains moments. Avec la méthode Statis, nous avons dégager une évolution commune à tous les sous-tableaux lors de l'interstructure et du compromis puis d'identifier et de comparer les phénomènes spécifiques ayant lieu dans chacun des sous tableaux lors de l'intrastructure.

Finalement, les méthodes multitableaux offrent à l'utilisateur la possibilité de considérer ses données sous différents aspects. Le choix entre les différentes possibilités est lié aux objectifs de l'étude et les résultats obtenus différeront selon la solution adoptée. L'étude de la structure et de l'évolution des sites correspond à considérer les données comme une suite chronologique de tableaux [stations*variables]. L'autre point de vue, un tableau [dates*variables] par station, privilégie l'étude de la cyclicité des mesures des différentes variables et sa variabilité spatiale [22, 23]. Ceci permet à l'utilisateur d'observer ses données sous une multitude d'angles chacun illustrant un processus spécifique et un niveau de compréhension et de fonctionnement des systèmes. Les analyses multitableaux apparaissent ainsi comme une alternative plus complète à l'analyse statistique classique des données multivariées.

Références bibliographiques

- [1] Massei, N., 2001 - Transport de particules en suspension dans l'aquifère crayeux karstique et à l'interface craie/alluvions. *PhD, Université de Rouen, Rouen, 189p.*
- [2] Dussart-Baptista, L., 2003 - Transport des particules en suspension et des bactéries associées dans l'aquifère crayeux Haut-Normand. *PhD, Université de Rouen, 234 p.*

- [3] Massei, N., Lacroix, M., Wang, H.Q., Mahler, B.J. and Dupont, J.P., 2002 - Transport of suspended solids from a karstic to an alluvial aquifer: the role of the karst/alluvium interface. *Journal of Hydrology*, 260[1-4]: 88-101.
- [4] Massei, N., Wang, H.Q., Dupont, J.P., Rodet, J. and Laignel, B., 2003 - Assessment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. *Journal of Hydrology*, 275[1-2]: 109-121.
- [5] De La Quèrière, P., 1994 - SIAEP de Saint Maurice d'Etelan: réalisation d'un nouveau forage. 94 HNO 001, rapport BRGM.
- [6] Bouroche, J.M., 1975 - Analyse des données ternaires: la double analyse en composantes principales. *PhD, Université de Paris VI*, 57p.
- [7] Amanieu, M., Guelorget, O. and Nouguièr-Soule, J., 1981 - Analyse de la diversité de la macrofaune benthique d'une lagune littorale méditerranéenne. *Vie milieu*, 31: 303-312.
- [8] Baran, E., 1995 - Dynamique spatio-temporelle des peuplements de poissons estuariens en Guinée [Afrique de l'Ouest]. *PhD, Université de Bretagne Occidentale*, 204p.
- [9] Escoufier, Y., 1973 - Le traitement des variables vectorielles. *Biometrics*, 29: 750-760.
- [10] Escoufier, Y., 1980 - L'analyse conjointe de plusieurs matrices de données. In: *J.e. al. [Editor], Biométrie et temps*, pp. 59-76.
- [11] Escoufier, Y., 1987 - The duality diagram: a means of better practical applications. In: *P.L. Legendre, L. [Editor], Development in numerical ecology. Serie G.*, pp. 139-156.
- [12] Gaertner, J.C., Chessel, D. and Bertrand, J., 1998 - Stability of spatial structures of demersal assemblages: a multitable approach. *Aquatic Living Resources*, 11: 75-85.
- [13] Glaçon, F., 1981 - Analyse conjointe de plusieurs matrices de données. Comparaison de différentes méthodes. *PhD, Université scientifique et médicale de Grenoble*, 73p.
- [14] L'Hermier des Plantes, H., 1976 - Structuration des tableaux à trois indices de la statistique. Théorie et application d'une méthode d'analyse conjointe. *PhD, Université Montpellier II*.
- [15] Jaffrenou, P.A., 1978 - Sur l'analyse des familles finies de variables vectorielles. Bases algébriques et application à la description statistique. *PhD, Université de Lyon I*, 97p.
- [16] Lavit, C., 1988 - Analyse conjointe de tableaux quantitatifs. *Masson*, 240p.
- [17] Lavit, C., Escoufier, Y., Sabatier, R. and Traissac, P., 1994 - *The ACT [STATIS method]. Computational Statistics & Data Analysis*, 18: 97-119.
- [18] Pernin, M.O., 1986 - Contribution à la méthodologie d'analyse de données longitudinales. Exemple de la croissance chez l'être humain. *PhD, Université de Lyon*, 264p.
- [19] Dussart-Baptista, L., Dupont, J.P., Zimmerlin, I., Lacroix, M., Saiter, J.M., Junter, G.A. and Jouenne, T., 2003 - Occurrence of sessile *Pseudomonas oryzyhabitans* cells from a karstified chalk aquifer. *Water Research*, 37: 1593-1600.
- [20] Fournier, M., 2003 - Impact anthropique sur le fonctionnement et les propriétés de transport d'un aquifère crayeux karstique exploité pour l'AEP, rapport DEA, Université de Montpellier II, 78p.
- [21] Fournier, M., Massei, N., Bakalowicz, M., Dussart-Baptista, L., Rodet, J. and Dupont, J.P., in submission - A study of the global functioning and vulnerability of a karst hydrosystem by means of geochemical and physico chemical analyses. *Journal of Hydrology*.
- [22] Thioulouse, J. and Chessel, D., 1987 - Les analyses multitableaux en écologie factorielle: de la typologie d'état à la typologie de fonctionnement par l'analyse triadique. *Acta Oecologica, Oecologica Generalis*, 8[4]: 463-480.
- [23] Thioulouse, J., Chessel, D., Dolédec, S. and Olivier, J.M., 1997 - ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing*, 7: 75-83.

Géochimie de la craie campano-maastrichtienne et événement dolomitique.

L. Le Callonnec¹, P. Benoit², M. Renard¹, N. Labourdette¹ et M. Thomas¹

¹ Département de géologie sédimentaire UPMC case 116, 4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05 lecallon@ccr.jussieu.fr

² Laboratoire d'hydrogéologie 10 170 Méry sur Seine

I. INTRODUCTION

La dolomitisation de la craie du Bassin de Paris et sa répartition en lentilles plus ou moins étendues sont encore assez mal expliquées. L'apport en magnésium reste encore une énigme quant à sa source et aux quantités impliquées dans ces phénomènes.

Les accidents dolomitiques et leur ampleur ont été mis en évidence par l'existence d'anomalies sismiques sur les profils établis dans le cadre de recherches pétrolières. La craie dolomitisée est caractérisée par des vitesses des ondes intermédiaires (3600m/s) à celles circulant dans la dolomie massive primaire (4500m/s) et dans la craie pure (2400m/s, [1], [2]).

Dans le bassin parisien, la craie dolomitisée est souvent associée à des fonds durcis et à des structures chenalisantes plus ou moins érosives ([3], [4]). Ce faciès peut être également lié à une tectonique syn-sédimentaire ([5], [6]) ou à des variations du taux d'accommodation ([7]). Enfin, la dolomitisation se situe souvent préférentiellement dans les zones les plus subsidentes du Crétacé du Bassin Parisien.

La répartition stratigraphique des accidents dolomitiques est relativement vaste. Ils ont été signalés dans le Coniacien au niveau de l'anticlinal de la Seine entre Meudon et Mantes ([8]). Dans la région de Mantes-Gargenville, ils sont observés dans des séries coniaciennes à campaniennes ([9]). Dans la partie centrale du Bassin de Paris, sous la Brie, ce sont les niveaux du Santonien et du Campanien inférieur qui sont les plus affectés.

Plusieurs hypothèses ont déjà été évoquées pour tenter d'expliquer la dolomitisation de la craie : une origine marine, une zone de mélange d'eaux marine et météorique ou un lessivage de formations latérales à évaporites d'âge indéterminé ([10], [11], [12]). Cette étude propose de discuter ces hypothèses en apportant des données géochimiques supplémentaires (éléments traces, sulfates et isotopes stables du carbone et de l'oxygène). Pour cela, différents faciès : craie blanche, craie à dolomie diffuse et la dolomie massive, d'âge Cénomaniens à Campanien sont comparés dans trois forages du Sud-Est du Bassin Parisien (Figures 1 et 2). En intégrant à cette étude les cartes de reconstitution des dépôts de la craie, tirées de la bibliographie, le mode de circulation des fluides magnésiens vis à vis des structures morphologiques existantes (dômes, dépressions et failles) sera précisé.

II. LOCALISATION ET METHODES

Les sondages du programme Craie 700 (près de Provins) sont distants l'un de l'autre de deux kilomètres, tandis que le forage de la Grande Paroisse se situe à une trentaine de kilomètres au Sud-Ouest, près de Montereau (Figure 2). Ces trois forages recourent plus de 700 m de

sédiments dont la craie, d'environ 500m d'épaisseur, qui est recouverte par les formations tertiaires d'épaisseur variable (0m à 90m). La craie des forages 701 et de la Grande Paroisse est blanche et relativement homogène du Turonien au Campanien. Par contre, le site 702 recoupe plusieurs accidents dolomitiques pouvant correspondre à une dolomite diffuse dans la micrite calcitique des sédiments turoniens à campaniens et à un niveau de dolomie massive de 15 m de puissance à la transition Campanien inférieur/supérieur ([14]). Ce niveau particulier est défini à sa base par un contact progressif avec une augmentation de la quantité de cristaux de dolomites tandis que son toit est une surface nette qui est recouverte d'un niveau métrique de craie dédolomitisée ([15]). Enfin, de la dolomite en faible proportion est également présente dans les dépôts du Turonien des trois forages étudiés ([14], [15]). La détermination des biozones à nannofossiles calcaires et à foraminifères planctoniques a permis une corrélation précise des trois sites ([16], [17]).

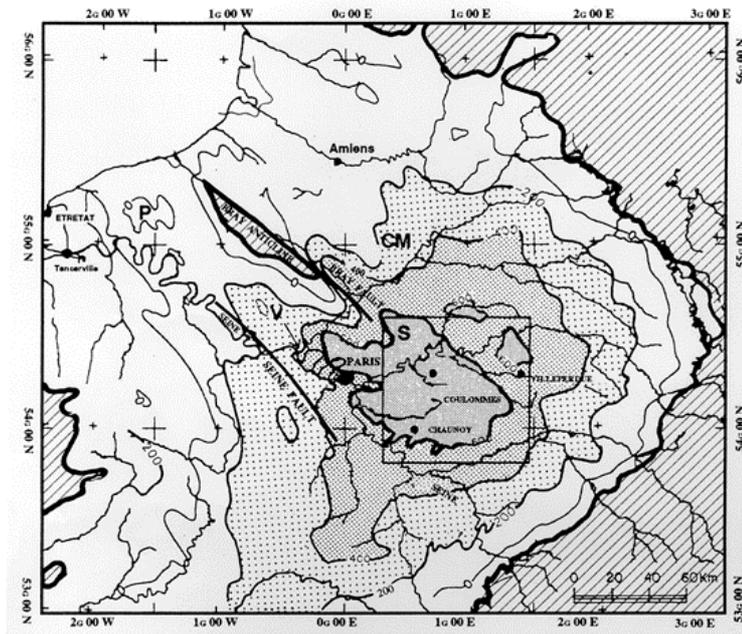


Figure 1 - Carte du Bassin Parisien indiquant l'extension des dépôts du Crétacé supérieur dans la zone étudiée.

Les contours de la base du Crétacé relatifs au niveau moyen des mers ont été reportés. La profondeur maximum est localisée à l'aplomb de la ville de Paris. Le carré indique la zone étudiée. CM= anticlinal de Magny-les-compiègne, P= structure de Pavilly-Yvetot, V= anticlinal de Vigny. Les traits correspondent aux limites des affleurements du Crétacé supérieur. D'après Hanot et Renoux ([13]).

Les analyses géochimiques portent sur les sédiments d'âge Santonien et Campanien, suivant un pas d'échantillonnage moyen de 2m50. Une attaque ménagée (acide acétique à température ambiante] sur roche totale, préalablement réduite en poudre, permet la mise en solution de la phase carbonatée et des ions échangeables. Les dosages des éléments traces ont ensuite été réalisés par absorption atomique en flamme et par ICP-OES. La détermination de la teneur en sulfate a été réalisée par colorimétrie après une attaque à l'acide chlorhydrique (10%) des échantillons en poudre. Les rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène ont été analysés en spectrométrie de masse à partir du CO₂ produit lors de l'attaque des échantillons à l'acide orthophosphorique (à 25°C).

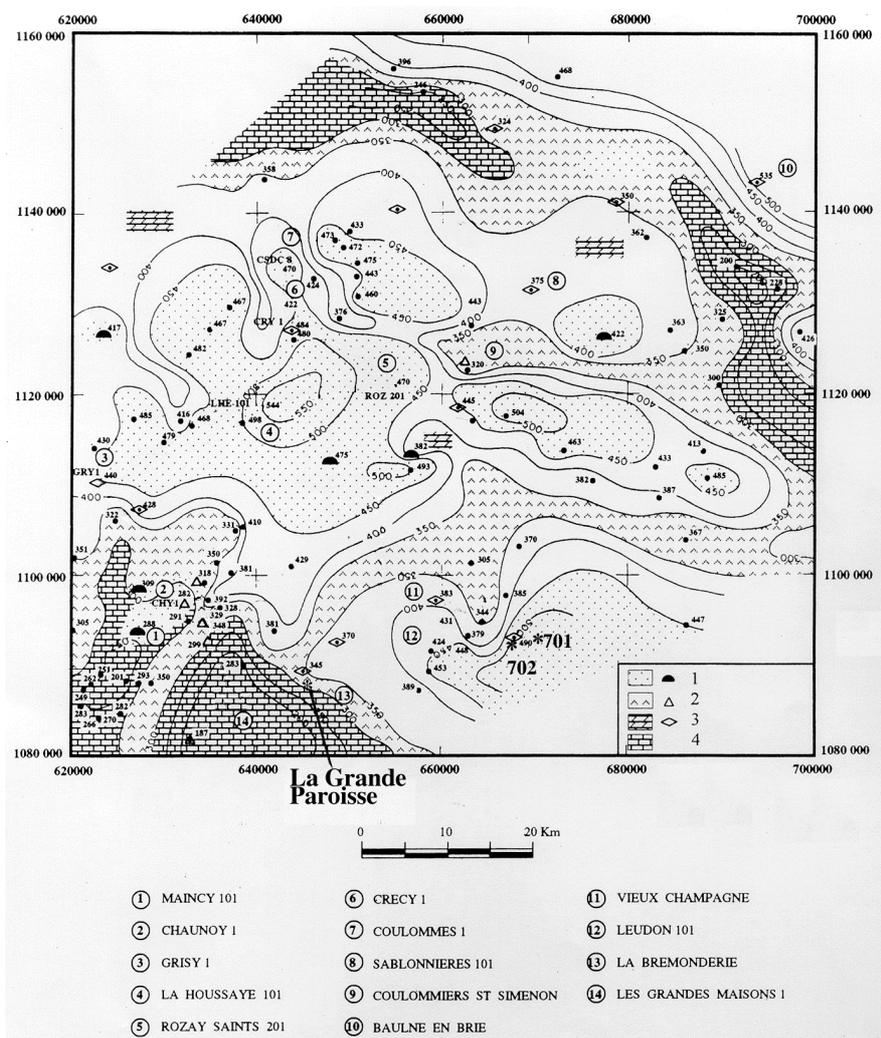


Figure 2 – Isopaque de la craie rapide (toit du Cénomaniens à niveau repère] établie à partir de diagraphies.

Les lithofaciès d'un niveau repère ont été superposés mettant en relation la lithologie et la position structurale. Les faciès gréseux se situent sur les hauts structuraux, la dolomie saccharoïde sur les flancs et les faciès anhydritiques entre 300 et 350 mètres, suggérant un paléoenvironnement complexe directement lié à la bathymétrie. On notera les directions préférentielles SW-NE et SE-NW des paléodépressions. 1 = grès et calcaires gréseux; 2 = anhydrite; 3 = dolomie; 4 = craie à vitesse lente. D'après Hanot et Renoux ([13]). Les sites 701, 702 et de la Grande paroisse sont reportés sur cette figure.

III. INTERPRETATIONS

III. 1. Signature géochimique de la dolomitisation

La dolomie massive se marque par une diminution importante du pourcentage de la fraction carbonate de calcium, de la teneur en calcium et par de fortes quantités en magnésium, sodium, nickel et Zinc (Tableau 1). Une perte de strontium dans ce niveau s'interprète par une compétition avec le magnésium pour l'occupation de son site cristallographique. Des teneurs plus importantes en potassium ont également été observées.

La dolomie diffuse est caractérisée par des concentrations nettement moins élevées en Mg, Na et K que dans le niveau massif. Les cristaux de dolomite étant moins abondants et diffus dans la matrice calcitique, l'enregistrement géochimique correspond alors aux deux phases. Pour certains éléments, les données géochimiques sont relativement proches de celles observées dans la craie blanche (Ca, Sr, Zn et Ni). Les teneurs en fer sont relativement élevées par rapport à la dolomie massive et à la craie blanche. Gély et Blanc (sous presse) ont observé la présence en cathodoluminescence de zonations dans les cristaux de dolomite dont certaines sont riches en fer. Par contre, la dolomie massive est constituée de rhomboèdres non zonés et appauvri en fer.

Les faciès de craie blanche dans le sondage 701 et dans celui de la Grande-Paroisse diffèrent très nettement des niveaux de craie dolomitisée. Cependant, la craie de la Grande-Paroisse montre souvent des teneurs en Na, Zn et Ni relativement proche de celles observées dans la craie dolomitisée du sondage 702.

	CaCO ₃	Ca (%)	Mg	Na (ppm]	Sr (ppm)	Fe (ppm)	K (ppm)	Zn (ppm)	Ni (ppm)
Dolomie massive 702	43%	17-30	13%	3500-4000	180	100-200	100-300	25	90
Dolomie diffuse 702	92-95	40-42	2000-3000 ppm	400-500	800-1000	500-800	120-250	10-15	0
Craie blanche 701	97	39-42	1200-1500 ppm	250-300	800-1000	70-150	20-100	10-15	0
Craie blanche G. P.	92-99	38-42	1200-1500 ppm	300-500	800-1000	50-150	10-100	20-30	0-40

Tableau 1 – Comparaisons du pourcentage de CaCO₃ et des concentrations moyennes en éléments traces dans les trois principaux faciès de la craie d'âge Santonien-Campanien dans les sondages Craie 700 et de la Grande-Paroisse.

La présence de sulfate a été observée dans le niveau de dolomie massive (5400 ppm) et en plus faible quantité dans la craie dolomitisée sous-jacente (650 ppm). La craie à dolomie diffuse est beaucoup plus appauvrie en sulfate (200 à 300 ppm) et aucune trace n'a été décelée dans la craie blanche.

Les données isotopiques sur le bulk (cette étude) et sur les cristaux de dolomite ([11], [12]) montrent un $\delta^{18}\text{O}$ plus élevé (2 ‰) dans les faciès de dolomie massive que dans la craie blanche (-1 à -2 ‰, figure 3). Le rapport isotopique de l'oxygène pour la dolomie diffuse évolue du pôle dolomie massive (pour les niveaux proches) à un pôle beaucoup plus négatif (-3 à -4 ‰) pour la craie dolomitisée située à des profondeurs croissantes. Le $\delta^{13}\text{C}$ est assez similaire pour la craie blanche et la dolomite massive (2 ‰) alors que la dolomite diffuse est plus enrichie en isotope lourd (3 ‰). La craie altérée (influence d'eau météorique) montre un $\delta^{13}\text{C}$ et un $\delta^{18}\text{O}$ particulièrement faibles.

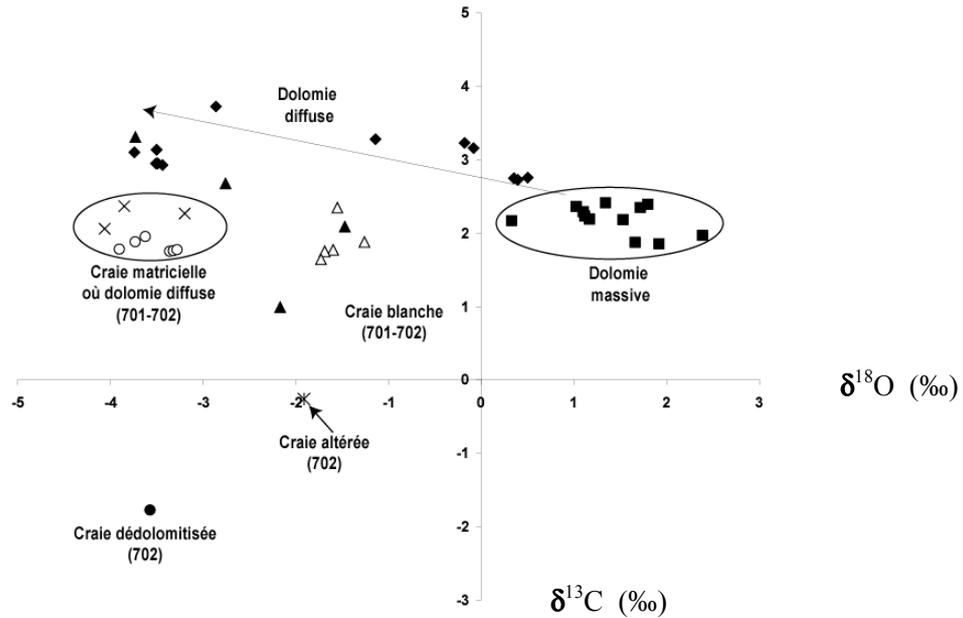


Figure 3 – Caractérisation par les isotopes stables du carbone et de l'oxygène des différents faciès de la craie sénonienne dans les sondages Craie 700. Les données proviennent de Thiry et al ([11]) et de Gély et Blanc ([12]).

III. 2. Origine des fluides

L'enregistrement géochimique indique que les fluides à l'origine de la dolomitisation massive devaient présenter une salinité relativement importante par rapport à l'eau de mer normale (forte teneurs en Na et fort $\delta^{18}\text{O}$) et doivent renfermer des sulfates. Plusieurs sources peuvent être envisagées : une eau de mer « évoluée », les formations triasiques ou les séries à tendance évaporitique du Tertiaire, les calcaires du Dogger ou encore les formations cénomano-turonniennes. Peu d'échanges existent entre les formations triasiques et du Dogger ([18]). Cela exclue donc une origine triasique. Les calcaires du Jurassique qui renferment un mélange de saumure et d'eau météorique (90 %, [18]) sont également peu probables. En effet, ces fluides devraient traverser les sables verts de l'Albien or cette formation ne montre aucun indice de la présence de fluides salés. Par conséquent, il faut rechercher une origine des fluides dolomitisants dans des sédiments plus récents comme la craie du Crétacé supérieur ou dans les formations de l'Eocène moyen à supérieur. L'observation de sulfate plaiderait en faveur d'un mélange d'eaux interstitielles et de venues d'eaux tertiaires. Toutefois, la présence de sulfates lors de la dolomitisation pose un problème parce qu'il a tendance au contraire à inhiber la formation de dolomite. Les sulfates peuvent aussi être liés à l'oxydation microbienne (thiobacille) de composés sulfurés (H_2S , mercaptans). Cependant, nous ne pouvons tout à fait exclure une origine cénomano-turonienne des fluides. En effet, les teneurs de la phase carbonatée en K, Ni et Zn enregistrées dans ces faciès sont tout à fait similaires à celles rencontrées dans le niveau de dolomie massive. Des sulfures de ces formations sédimentaires ont pu être entraînés lors de la migration des fluides et être ensuite oxydés. Dans la région de Nogent-sur-Seine, à 120km au Sud-Est des forages 701 et 702, la dolomitisation de la craie peut atteindre ponctuellement le Turonien et le sommet du Cénomaniens (Données fournies par la Régie Autonome des Pétroles, 1962, 1963). Une étude des isotopes du soufre pourrait peut-être apporter plus de précisions sur l'origine des sulfates. L'hypothèse d'une dolomitisation massive au Campanien inférieur à l'interface eau-sédiment ([12]) semble peu probable compte tenu de l'analyse géochimique de la dolomie massive. Des

venues latérales marines d'âge Eocène supérieur sont possibles à partir de chenaux à remplissage sableux qui incisent les dépôts lacustres plus ou moins argileux de la base du Tertiaire ([11]). Le lessivage des faciès évaporitiques (source des sulfates), des argiles de type palygorskites et sépiolites ([19]) expliquerait la géochimie des faciès dolomitiques étudiés. Mais la majeure partie des sulfates du Tertiaire est bloquée sous forme de pyrite dans les lignites sparnaciennes.

III. 3. Circulation des fluides

La reconnaissance de structures sédimentaires, de bioturbations originelles et d'inclusions de calcite micritique dans les rhomboèdres de dolomite ([12]) indique une dolomitisation relativement tardive et diagénétique. Les accidents dolomitiques sont limités en extension et la craie blanche non dolomitisée peut s'intercaler entre des niveaux dolomitisés. Le front de dolomitisation ne peut donc être continu et homogène. Il faut donc faire intervenir une circulation différentielle de fluides interstitiels et qui implique plus de 400m d'épaisseur de craie.

L'homogénéité en cathodoluminescence et dans les analyses géochimiques à la microsonde des cristaux de dolomite massive témoigne d'une phase principale de dolomitisation ([12]). Par contre, la zonation des rhomboèdres dans les faciès de dolomie diffuse indiquerait une cristallisation suivant plusieurs phases de circulation de fluides de composition chimique différente (dont une phase riche en fer) ou éventuellement une évolution chimique au cours du transfert. Gély et Blanc proposent des conditions distinctes de température de précipitation de la dolomite à partir de l'étude de la position du Mn^{2+} dans le cristal. La dolomie massive se formerait dans des conditions ambiantes alors que la dolomie diffuse à des températures plus importantes. Cette observation peut être confirmée par les données isotopiques de l'oxygène sur les cristaux ([11], [12]). Nous pourrions en partie associer les valeurs plus négatives du rapport isotopiques pour la dolomite diffuse par des températures de cristallisation plus importantes.

Dans le cas d'une origine tertiaire des fluides, les transferts ne peuvent se faire *per-descensum* étant donné que la dolomie massive est recouverte de plus de 100m de craie blanche non dolomitisée. Les fluides ne peuvent donc venir que latéralement ou *per-ascensum*. Cela expliquerait dans ce dernier cas un contact progressif entre la craie à dolomie diffuse et la dolomie massive et une limite supérieure nette. Des mouvements de convection pourraient être envisagés d'autant plus que la craie des sites 700 montre de nombreuses microfractures. Le moteur de ces courants est la densité des fluides et donc une différence de température ou de salinité. Le flux thermique était particulièrement élevé à la fin du Crétacé et pourrait être le moteur principal ([20], [21], [22]). Des transferts convectifs de fluides dans la craie ont déjà été mis en évidence en Mer du Nord ([23]) ou dans des formations carbonatées de plate-forme de type Bahamas ([24]). Dans le cas de la Mer du Nord, la cellule de convection est centrée à l'aplomb des dépressions (courant descendant) tandis que les parties plus hautes sont caractérisées par les courants ascendants. Une analyse des microfaciès montre une dissolution de la calcite dans la partie supérieure de ces cellules et une précipitation dans la partie inférieure et à proximité des zones de fractures ([23]). Les auteurs ont estimé la durée de ces mouvements de convections entre 10 et 30 Ma et des flux de matières de l'ordre de $10^6 m^3/m^2$. Les différences de températures de cristallisation de la dolomite pourraient ainsi trouver une explication par un refroidissement des fluides lors de la remontée et un réchauffement durant la descente. La fracturation joue ainsi un rôle important dans l'initiation de ces circulations. Les sites étudiés sont en effet situés dans une zone fortement fracturée correspondant au système de la faille d'Omey-Metz et de ses accidents conjugués. Ce n'est pas la première fois

que des circulations préférentielles de fluides le long des accidents tectoniques sont observées. Par exemple, la dolomitisation à l'Ouest de Paris était surtout concentrée le long de la faille de la Seine ([9]). Des remontées de fluides salés (30 à 35g/l) ont aussi été mis en évidence au niveau de la faille de Bray à l'Est du Bassin de Paris ([25]).

III. 4. Dolomitisation localisée

La dolomitisation n'affecte que le site 702 alors que le site 701 est très proche. La craie du forage de la Grande Paroisse bien qu'elle ne soit pas affectée par la dolomitisation au Campanien est relativement similaire du point de vue géochimique aux niveaux dolomitisés du 702. Une porosité primaire et une perméabilité différentes de la craie dans les différents sondages peuvent expliquer en partie l'absence de dolomite ([26], [12]). De plus, le sondage de la Grande Paroisse est plus éloigné de la zone de fracturation et pourrait être moins fracturé que les sites Craie 700. La circulation tardive de fluides aurait ainsi été plus difficile par une porosité plus faible, ou des venues de fluides trop insuffisantes (peu d'apports d'eau douce ou limite latérale de fluides riches en Mg).

Enfin, une localisation différente par rapport à la paléotopographie peut également intervenir. Le site 701 est localisé à l'aplomb d'un dôme tandis que le site 702 se situe au niveau d'une paléocuvette présentant un dénivelé de près de 50 m en relation avec un paléochenal à remplissage tertiaire.

Références bibliographiques :

- [1] Hanot F., 2000 – Apport industriel des forages du Programme Craie 700 pour la correction statique de vitesses dans la craie du Bassin de Paris. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 8-17.
- [2] Torne X., 1984 – Etude des anomalies dans la craie du Sénonien du bassin de Paris. *Rapport de fin de stage Ste Nationale ELF Aquitaine Production*.
- [3] Frohlich F., 1994 – Craie diagénisée et faciès associés (carriers de Le Plessis-sur-Bulles et de Saint-André-Farivillers, Oise). *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 31, 1, 31-56.
- [4] Quine M. et Bosence D., 1991 – Stratal geometries, facies and sea-floor erosion in Upper Cretaceous chalk, Normandy, France. *Sedimentology*, 38, 1113-1152.
- [5] Pomerol B. et Mortimore R., 1990 – Lithostratigraphie et cycles sédimentaires dans la craie du bassin anglo-parisien. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 310, 553-558.
- [6] Mortimore R. et Pomerol B., 1991 – Upper Cretaceous tectonic disruption in a placid Chalk sequence in the Anglo-Paris Basin. *J. Geol. Soc. London*, 148, 391-404.
- [7] Mettraux M., Homewood P., Schwab A. et Guillocheau F., 1999 – Sedimentology and accomodation cycles of Paris Basin Campanian chalk : the key to high-resolution stratigraphy and seismic signature. In Harris P.M., Saller A.H. Simo J.A., eds., *Advances in carbonate sequence stratigraphy: Application to reservoirs, Outcrops and models. SEPM, Special publication*, 63, 317-334.
- [8] Guy M., 1959 – Etude d'un anticlinal de la Seine entre Mantes et Vermon. *DES Paris*.
- [9] Mégnyen C., 1979 – Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. *Mémoire BRGM*, 98, 532pp.
- [10] Le Callonnec L., Renard M., Pomerol B., Janodet C. et Caspard E., 2000 – Données géochimiques préliminaires sur la série Cénomano-Campanienne des forages 701 et 702 du Programme Craie 700. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 112-119.
- [11] Thiry M., Hanot F. et Pierre C., 2003 – Chalk dolomitization beneath localized subsiding tertiary depressions in a marginal marine setting in the Paris Basin (France). *J. Sedim. Res.*, 73, 2, 157-170.
- [12] Gély J.P. et Blanc Ph., sous presse – Evolution diagénétique dans la craie pélagique dolomitisée du Crétacé supérieur du Bassin de Paris (Région de Provins, France). *Eclogae*

- [13] Hanot F. et Renoux P., 1999 – Variations pétrophysiques dans la craie sénonienne du bassin parisien et leur influence sur les corrections statiques. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 36, 2, 3-12.
- [14] Barrier P., 2000 – Etude microfaciologique de deux forages profonds dans la craie de Provins (701 : Poigny et 702 : Sainte Colombe) : empilement des faciès, biodiversité et découpage séquentiel. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 32-43.
- [15] Blanc Ph. et Gély JP., 2000 – Etude pétrographique et minéralogique de la diagenèse carbonatée de la craie du Crétacé supérieur des forages profonds 701 (Poigny) et 702 (Sainte-Colombe, région de Provins, Seine-et-Marne). *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 87-100.
- [16] Damotte R., Destombes P., Fauconnier D., Magniez F., Manivit H., Mégnién F. et Monciardini C., 1980 – Etude stratigraphique du sondage crétacé de la Grande Paroisse, près de Montereau (Seine-et-Marne, France). *Congrès Géologique International, Paris, BRGM*
- [17] Robaszynski F., Pomerol B., Masure E., Janin MC., Bellier JP. et Damotte R., 2000 – Corrélations litho-biostratigraphiques et position des limites d'étages dans le Crétacé des sondages de Poigny et de Sainte-Colombe. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 74-85.
- [18] Matray JM., Meunier A., Thomas M. et Fontes JC., 1989 – Les eaux de formation du Trias et du Dogger du Bassin Parisien : Histoire et effets diagénétiques sur les réservoirs. *Bull. Centres Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine*, 13, 2, 483-504.
- [19] Blanc-Valleron MM. et Thiry M., 1997 – Clay minerals, paleoweathering, paleolandscapes and climatic sequences : the Paleogene continental deposits in France. In: *Paquet H. et Clauer N., eds., Soils and sediments: Mineralogy and geochemistry. Berlin, Springer, 223-247.*
- [20] Guilhaumou N. et Gaulier JM., 1991 – Détermination de paléotempératures dans les roches mères du bassin de Paris : Etudes d'inclusions fluides et implications pour l'histoire thermique du bassin. *C. R. Acad. Sci Paris*, 313, 773-778.
- [21] Guillocheau F., Robin C., Allemand P., Bourquin S., Brault N., Dromart G. *et al.*, 1999 Evolution géodynamique du bassin de Paris : Apports d'une base de données stratigraphiques 3D. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 4, 3-35.
- [22] Guillocheau F., Robin C., Allemand P., Bourquin S., Brault N., Dromart G. *et al.*, 2000 Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin : 3D stratigraphic constraints. *Geodynamica Acta*, 13, 189-246.
- [23] Rabinowicz M., Dandurand JL., Jakubowski M., Schott J. et Cassan JP., 1985 – Convection in a North Sea Oil reservoir : inferences on diagenesis and hydrocarbon migration. *Earth and Planet. Sc. Let.*, 74, 387-404.
- [24] Caspard E., Brosse E., Van Buchen P. et Renard M., 1998 – Geochemical simulation of dolomitisation in platform carbonate reservoirs. *Geo-98, 3rd Middle East Geosciences Conferences and Exhibition, Bahrain.*
- [25] Monnier G., 1986 – Rapport de stage sur les éléments de synthèse du Dogger supérieur calcaire du Bassin Parisien. *Ste Nationale ELF Aquitaine Production.*
- [26] Mégnién C., Renoux P. et hanot F., 2000 – Comparaison des forages 701 et 702 au plan des diagraphies et des propriétés pétrophysiques. Indications sur les conditions de diagenèse de la craie. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 125-131.

Hypothèses sur la dolomitisation de la craie à partir des forages 701 et 702

Jean-Pierre Gély¹, Philippe Blanc²

¹ Attaché Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, 43 rue Buffon 75005 Paris.

² Bénévole Université P. & M. Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cédex 05

Les études pluridisciplinaires menées sur le matériel des sondages du projet « Craie 700 » [1], [2] et [3], ont un but commun qui est de comprendre le phénomène de modification des vitesses sismiques localement. Les anomalies de vitesse sismique dans la craie sont dues à la présence de dolomite dispersée dans la masse de la craie [4]. La dolomite est présente entre -317 et -590 m dans le sondage 701, et entre -168 et -184 m pour la dolomite massive, puis de -185 à -600 m pour la dolomite dispersée [5], c'est-à-dire depuis le Turonien moyen, jusqu'au Campanien moyen [6]. Elle est toujours plus importante sous la dolomite massive, sa teneur diminue avec la profondeur et la distance latérale.

Il existe une profonde différence entre les deux dolomites : la dolomite massive est un minéral homogène à faible teneur en fer (700 ppm) sa stoechiométrie est fixe dans tout le cristal (de 0.6 nombre d'atomes de Ca par molécule de dolomite), alors que la dolomite dispersée a cristallisé en plusieurs phases aux stoechiométries différentes (de 0.5 à 0.7 nombre d'atomes de Ca par molécule de dolomite) en fonction des teneurs en fer (max 6000 ppm). Toutes ces variations sont rendues visibles par l'utilisation de la cathodoluminescence. L'histoire des mises en place de ces deux dolomites ne peut être identique.

D'autres auteurs [7], [8], se sont intéressés à ce problème, mais les hypothèses présentées, que nous avons retenues dans un premier temps, nous semblent difficiles à appliquer pour des raisons objectives : en particulier le modèle « tertiaire » ne possède pas de moteur dynamique suffisant pour mettre en route une cellule de convection per descensum, à une période où le paysage est plat et ne possède pas de résurgences. Nous avons été contraints d'abandonner cette hypothèse.

I. ETUDE DES RESULTATS DES ANALYSES DES ISOTOPES STABLES

L'analyse des isotopes stables du carbone et de l'oxygène, conduit à des hypothèses sur la fabrication des carbonates, qui seront affinées par ceux qui apporteront des précisions concernant les traces. Nous bénéficions des données systématiques sur les sondages [7], auxquelles nous avons additionné des échantillons choisis.

Les rhomboèdres de dolomite dispersée contiennent sur leurs faces des nanograins inclus de micrite originelle et de néomicrite d'enfouissement, ils sont donc postérieurs au dépôt autant qu'à la diagenèse d'enfouissement [8].

La calcite matricielle (figure 1) a conservé une composition géochimique originelle, $\delta^{18}\text{O}$ -4‰ PDB, elle correspond à une précipitation en équilibre dans une eau de mer à 25°C. Par calcul, à partir de la composition isotopique, sachant que 40% de la fraction calcitique est d'origine diagénétique, on peut avancer que la valeur isotopique pour la calcite diagénétique à 500 m est de $\delta^{18}\text{O}$ -7‰ PDB correspondant à une température de cristallisation de 40°C, ce que l'on peut admettre à la fin du crétacé, à cause de l'anomalie positive du flux thermique [9].

La dolomite massive a des valeurs isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ 2.3 à 1.1 ‰ PDB et $\delta^{13}\text{C}$ 2.1 ‰ PDB. Ces valeurs de l'oxygène, distantes de 4 ‰ PDB des valeurs de la calcite, sont compatibles

avec une transformation en équilibre dans une eau de mer riche en magnésium à une température proche de 25°C, avec comme moteur hydrodynamique, les chenaux de surface, correspondants aux légers hardgrounds relevés dans le 701. Cette dolomitisation massive peut donc être contemporaine de la fin du dépôt du Campanien moyen.

Avec la profondeur on mesure plusieurs modifications :

- diminution de la porosité depuis 40 % jusqu'à 17 % (701), jusqu'à 7 % (702).
- perméabilité diminuant de 6 à 0,5 millidarcy
- le ciment syntaxial sur les coccolithes passe à un microspar calcitique de 50 µm.
- diminution de la teneur en strontium de 800 à 500 ppm.
- dans la calcite les valeurs isotopiques en $\delta^{18}\text{O}$ diminueraient de -1,6 à -3,8 ‰ PDB, alors qu'en $\delta^{13}\text{C}$, les valeurs resteraient stables vers 1,8 ‰ PDB.
- dans la dolomite massive, il y a évolution du sommet à la base, sur 15 m : le $\delta^{18}\text{O}$ passe de + 2,3 à + 1,1 ‰ PDB, alors que le $\delta^{13}\text{C}$ reste proche de +2,1 ‰ PDB.
- dans la dolomite dispersée, le $\delta^{18}\text{O}$ est proche de -3,5 et le $\delta^{13}\text{C}$ de +3,1 ‰ PDB, en relation directe avec la calcite matricielle. La mesure très approfondie de ces valeurs en fonction de la profondeur devrait être réalisée pour conforter le modèle.

II. OBSERVATIONS PETROGRAPHIQUES

Le sommet de la dolomite massive a été soumis tardivement à une dissolution, une dédolomitisation qui a déposé une nouvelle calcite. La base de l'intervalle dolomitique massif est affecté d'une dissolution limitée à une petite zone des rhomboèdres dispersés, entre le cœur et les faces cristallines, ce qui peut représenter le stade le plus riche en fer, donc le plus instable.

Ces faits sont bien appréhendés par la visualisation de la cathodoluminescence sous microscope optique, méthode avec laquelle on peut distinguer les dolomites des calcites, et dans celles-là, les différents stades de cristallisation qui ont pu être caractérisés par leur chimisme et donc leur réaction de luminescence.

Les conditions de cristallisation qui ont été discutées sur la base des valeurs isotopiques, peuvent être abordées par les spectres de luminescence : dans la dolomite [10] existent deux sites où l'on peut trouver du Mn^{2+} qui excite la luminescence, l'un, le site Mg, émet à 650 nm (rouge), l'autre le site Ca émet à 579 nm (jaune). Ce dernier serait l'indice d'une cristallisation à une température faible à moyenne [11]. Dans la dolomite dispersée, seul le site Mg existe, alors que dans la dolomite massive, les deux sites coexistent, montrant par là que les conditions de température de leurs cristallisations étaient différentes, plus chaude pour la dolomite dispersée que pour la dolomite massive.

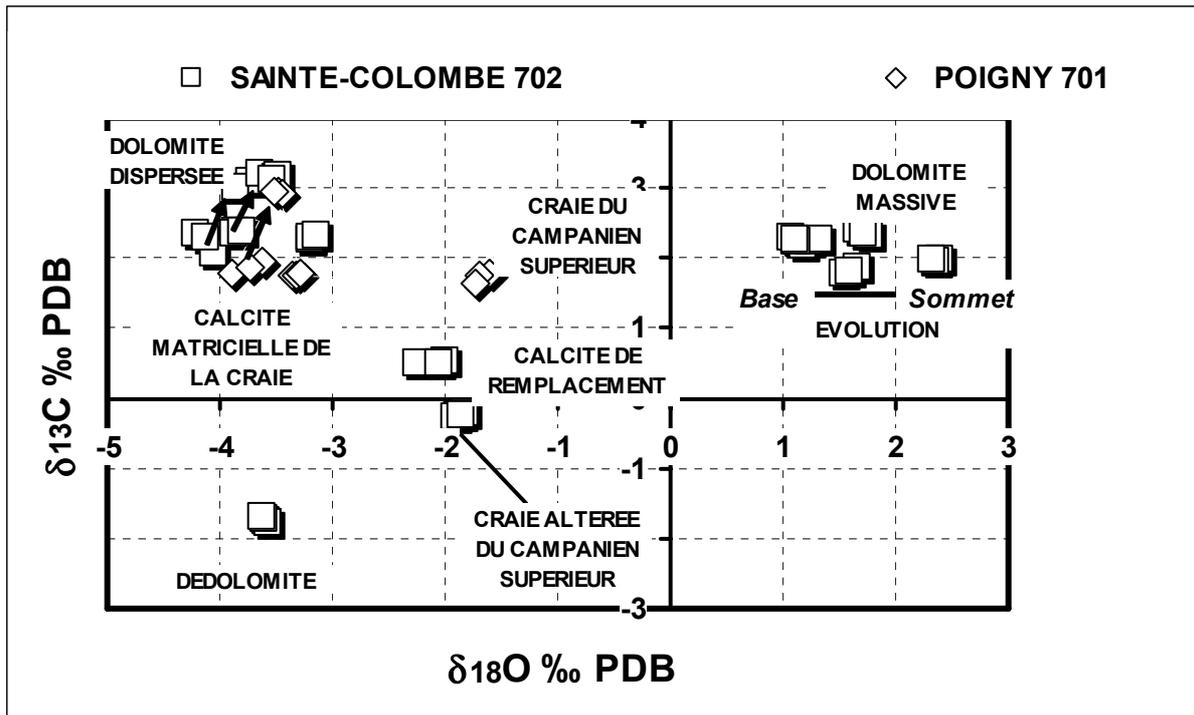


Figure 1 - Les données isotopiques sur les sondages 701 et 702. Les différents faciès ont été analysés : la dolomite massive est normalement éloignée de son équivalent calcitique de $\delta^{18}\text{O}$ 4 ‰ PDB. Au contraire, les dolomites dispersées sont très proches des calcites matricielles qui les contiennent. Celles-ci s'éloignent de la craie blanche du Campanien supérieur, par les effets de la diagenèse d'enfouissement qui fait recristalliser jusqu'à une quantité de 40 % de calcite dont la valeur isotopique pourrait atteindre $\delta^{18}\text{O}$ 7 ‰ PDB, et correspondre à une cristallisation à 40°C.

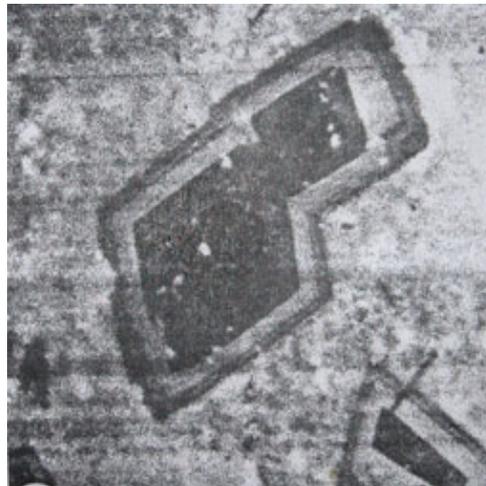


Figure 2 -Un cristal de dolomite « dispersée » dans la masse de la craie de 150 μm vu par la méthode de cathodoluminescence montre des parties colorées et noires, qui chacune représente la géochimie locale : centre jaune de cristallisation en équilibre stoechiométrique, souvent absent de la coupe, zone noire, non luminescente, avec une teneur de fer de 6000 ppm, qui éteint la luminescence du manganèse par inhibition, avec un déséquilibre stoechiométrique de 0,7 atome de Ca par molécule de dolomite, enfin zone rouge, où la teneur de fer descend entre 200 et 1000 ppm, et la stoechiométrie vers 0,6.

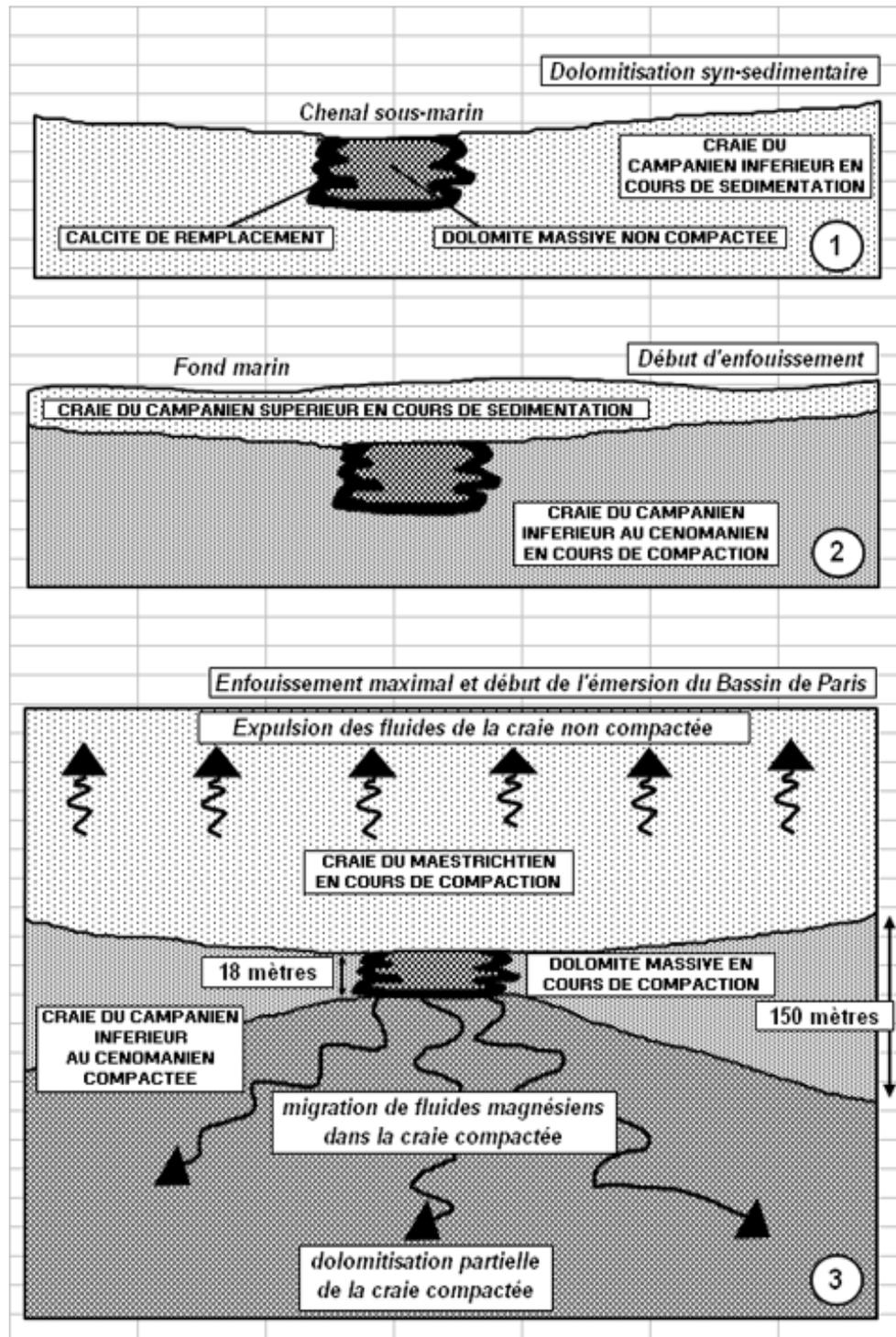


Figure 3 - Hypothèse interprétative des phénomènes de dolomitisation sous les sondages 701 et 702.

Stade 1 : sédimentation du Campanien inférieur avec un chenal sous marin drainant la nappe enrichie de magnésium participant à la dolomitisation d'un corps massif non compacté, enfermé par une bordure de calcite de remplacement.

Stade 2 : poursuite de la sédimentation du Campanien supérieur, début d'enfouissement et de compaction.

Stade 3 : au maximum d'enfouissement, au Maastrichtien, il y a compaction de l'ensemble sédimentaire, sous flux thermique important, en même temps que les premières manifestations du régime compressif pyrénéen. La dolomite massive se compacte en

expulsant les fluides qui migrent verticalement et vers le bas, en diffusant latéralement. Ceci donne lieu à une dolomitisation partielle et dispersée de la craie préalablement compactée. La dolomite dispersée est un carbonate en moins bon équilibre stoéchiométrique que la dolomite massive, elle a cristallisé à une température plus élevée que celle-ci.

Stade 4 : l'émersion du bassin depuis le Tertiaire, accompagnée de l'érosion des dépôts tertiaires, voit le sommet de la masse de la craie envahi par de l'eau douce ce qui entraîne une dédolomitisation du toit de la dolomite massive.

III. CONCLUSIONS

L'hypothèse que nous privilégions pour la dolomitisation de la craie, en considérant les apports des sondages « Craie 700 », est résumée par la figure 3, et se décompose en plusieurs phases, dont la première, est la constitution d'un chenal, à la surface de sédimentation du Campanien moyen, en relation avec les hardgrounds reconnus dans le 701, la localisation d'une eau de mer enrichie en magnésium, qui transforme ces premiers mètres de craie en dolomite massive, environnée d'une couche de calcite de remplacement, due à l'excès de calcium dégagé par la réaction de fabrication du carbonate double à la place de la calcite.

La deuxième phase est le simple enfouissement de cet accident localisé, avec début de compaction. La troisième phase est complexe, elle se déroule à la fin du dépôt de la craie, sous enfouissement maximal, au début de l'émersion du Bassin de Paris et au cours des premières phases compressives des Pyrénées. La craie non compactée, qui se trouve au dessus de l'accident dolomitique massif, expulse ses fluides vers le haut de la série sédimentaire, en déplaçant un peu de calcite en ciment syntaxial. La dolomite massive, avec sa grande porosité, encore riche en fluide magnésien, alimente un courant de convection descendant, dont le moteur est la différence de température issue du flux thermique maximum propre à cette époque. Il y a un gradient de magnésium diminuant vers le bas et diffusant latéralement qui donne la répartition de la dolomite dispersée, et sa géochimie, riche en fer, à stoéchiométrie déséquilibrée. La température élevée de cristallisation de ce minéral est justifiée par le flux thermique maximum.

La quatrième phase de ce modèle, contient le dépôt du tertiaire, son érosion, et la circulation des eaux continentales qui altèrent le sommet de la craie, sous la surface tertiaire, mais aussi la dédolomitisation du sommet de la dolomite massive.

Ce modèle comporte les éléments chimiques, ainsi que les moteurs nécessaires à son fonctionnement.

Références bibliographiques

- [1] Hanot F., 2000 – Apport industriel des forages du Programme Craie 700 pour la correction statique de vitesses dans la craie du Bassin de Paris. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 8-17.
- [2] Mégnien C., Renoux P. et Hanot F., 2000 – Comparaison des forages 701 et 702 au plan des diagraphies et des propriétés pétrophysiques. Indications sur les conditions de diagenèse de la craie. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 125-131.
- [3] Robaszynski F., Pomerol B., Masure E., Janin MC., Bellier JP. et Damotte R., 2000 – Corrélations litho-biostratigraphiques et position des limites d'étages dans le Crétacé des sondages de Poigny et de Sainte-Colombe. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 74-85.

- [4] Barrier P., 2000 – Etude microfaciologique de deux forages profonds dans la craie de Provins (701 : Poigny et 702 : Sainte Colombe) : empilement des faciès, biodiversité et découpage séquentiel. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 32-43.
- [5] Blanc Ph. et Gély JP., 2000 – Etude pétrographique et minéralogique de la diagenèse carbonatée de la craie du Crétacé supérieur des forages profonds 701 (Poigny) et 702 (Sainte-Colombe, région de Provins, Seine-et-Marne). *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 87-100.
- [6] Thiry M., Hanot F. et Pierre C., 2003 – Chalk dolomitization beneath localized subsiding tertiary depressions in a marginal marine setting in the Paris Basin (France). *J. Sedim. Res.*, 73, 2, 157-170.
- [7] Le Callonnec L., Renard M., Pomerol B., Janodet C. et Caspard E., 2000 – Données géochimiques préliminaires sur la série Cénomano-Campanienne des forages 701 et 702 du Programme Craie 700. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 37, 2, 112-119.
- [8] Gély J.P. et Blanc Ph., sous presse – Evolution diagénétique dans la craie pélagique dolomitisée du Crétacé supérieur du Bassin de Paris (Région de Provins, France). *Eclogae*.
- [9] Guilhaumou N. et Gaulier JM., 1991 – Détermination de paléotempératures dans les roches mères du bassin de Paris : Etudes d'inclusions fluides et implications pour l'histoire thermique du bassin. *C. R. Acad. Sci Paris*, 313, 773-778.
- [10] El Ali A., Barbin V., Calas G., Cervelle B., Ramseyer K. & Bouroulec J. 1993. Mn²⁺-activated luminescence in dolomite, calcite and magnesite : quantitative determination of manganese site distribution by EPR and CL spectroscopy. *Chem. Geol.*, 104, 189-202.
- [11] Walker G., Abumere OE. & Kamaluddin B., 1989. Luminescence spectroscopy of Mn²⁺ in rock forming carbonates. *Mineral Mag* 53, 201-211.