







### www.cfh-aih.fr/bordeaux2013

# Dix-neuvièmes Journées Techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues

En association avec l'AGSO et l'AHSP

30-31 mai 2013 Salle de l'Agora, Université Bordeaux 1, France

Coordinatrice scientifique du colloque : Bouchra EL OIFI

### Coorganisateurs





Association des Hydrogéologues de Service Public

### Sponsors, parrainages























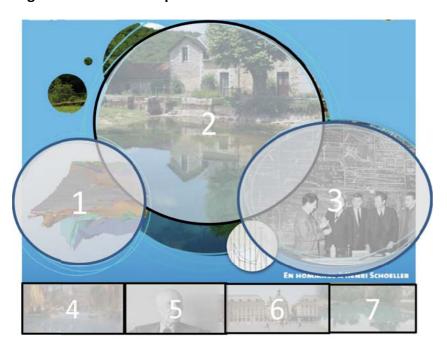








### Légende et crédits des photos de couverture



- 1 MOdèle Nord Aquitain, MONA BRGM
- 2 La source du Coly, La Cassagne, Dordogne Christian Mazurier
- 3 Photo du Jubilé d'Henri Schœller transmission Pierre Pouchan
- 4 Source du Toulon, Périgueux Nathalie Jacquemain
- 5 Henri Schoeller transmission Simone Schœller
- 6 Miroir d'eau, Bordeaux, Gironde Frédéric Lapuyade
- 7 Source des Moulineaux, Razac-sur-l'Isle, Dordogne Nathalie Jacquemain









# Les Eaux souterraines : Hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources » :

A l'occasion du 25ème anniversaire de la mort du Professeur Henri Schœller, ce colloque souhaite faire le point sur les avancées depuis ses premiers travaux, en particulier sur la connaissance des aquifères sédimentaires (fonctionnement, gestion, exploitation), et sur la mise en perspective de l'échelle du bassin étudié et de l'échelle de temps nécessaire pour la compréhension du fonctionnement des systèmes.

Principaux thèmes abordés dans les sessions :

- variations climatiques passées, actuelles et futures, impacts sur la recharge des aquifères ;
- dynamique des aquifères sédimentaires, quelles échelles spatiale et temporelle à prendre en compte pour une meilleure gestion;
- contribution des nouvelles méthodes géochimiques et isotopiques (Lascaux, origine de la salinité des aquifères sédimentaires, etc...);
- contribution de nouvelles méthodologies ou outils pour amélioration de la connaissance du fonctionnement des aquifères sédimentaires ;
- protection des aquifères au regard des grands enjeux sociétaux.

Le colloque s'articulera autour de communications orales, et de sessions posters.

A la suite du colloque, deux jours seront consacrés à une excursion de terrain.









### Comité d'organisation

Francis BICHOT BRGM Poitou-Charentes - AGSO CFH Laurence CHERY BRGM Direction D3E - secrétaire CFH

Bruno DE GRISSAC SMEGREG - président AHSP

Bouchra EL OIFI Univ. Bordeaux 1 Michel FRANCESCHI IPB-ENSEGID

Nathalie JACQUEMAIN CG24

Frédéric LAPUYADE SMEGREG - webmestre AHSP

Roland LASTENNET Univ. Bordeaux 1
Bruno LECLERC EDREE - trésorier CFH
Philippe MAGET secrétaire adjoint CFH

Pierre MARCHET AEAG - trésor. Adj. CFH vice-pdt AGSO

Jean Pierre PLATEL AGSO

Christoph VON STEMPEL Comité allemand AIH

### Comité Scientifique

Bernard BLAVOUX Univ Avignon – président CFH
Ghislain DE MARSILY Univ Paris VI – vice-président CFH

Nathalie DORFLIGER BRGM Direction D3E

Alain DUPUY **IPB-ENSEGID** François LARROQUE **IPB-ENSEGID** Roland LASTENNET Univ. Bordeaux 1 **Emmanuel LEDOUX Ecole des Mines** Jacques MUDRY Univ. Besançon **Nicolas PEDRON BRGM** Aquitaine Valérie PLAGNES Univ. Paris VI Pierre POUCHAN Univ. Bordeaux 3 Joelle RISS Univ. Bordeaux 1









# Nous remercions les sponsors qui nous ont apporté leur soutien financier





Association des Hydrogéologues de Service Public





























### **PROGRAMME DES JOURNEES**

#### Jeudi 30 mai 2013

08h15

Accueil des participants : remise des badges et documents, café d'accueil

09h00

#### **Ouverture du Colloque** (Sous réserve)

- M. Dean LEWIS, Président de l'Université de Bordeaux 1
- M. Henri BERTIN, Institut I2M, Université de Bordeaux
- M. Alain RENARD, Vice-Président du Conseil Général de la Gironde
- M. Bernard BLAVOUX, Président du Comité Français d'Hydrogéologie de l'AIH

9h30-11h30

### Session Hommage à Henri Schœller : témoignages, communications scientifiques Président de session : M. Michel Bakalowicz, Univ. Montpellier

Pierre Pouchan, son premier collaborateur à Bordeaux – Henri Schoeller (1899 - 1988)

Michel Vigneaux – Les premiers temps à Bordeaux

André Klingebiel - Souvenirs d'un ancien élève (1948-1954).

Christoph Von Stempel - Comité allemand de l'AIH - Témoignage pour le Professeur Henri Schoeller

Michel Bakalowicz - Henri Schæller, hydrogéologue pionnier du traçage naturel.

Témoignages, anecdotes.

### 11h30 - 12h30

### Hommage à Henri Schœller : Pose d'une plaque commémorative

Pose d'une plaque commémorative, Univ. Bordeaux 1 En présence du Président de l'Université, directeur de l'UFR des Sciences de la Terre et de la Mer et des membres de la famille d'Henri Schæller.

Hall du Bâtiment de l'UFR Sciences de la Terre et de la Mer, Bâtiment B18









12h30 - 14h00

Déjeuner

14h00 - 16h30

#### Présidents de session :

#### Mmes Catherine Thouin, MEDDE/DGEC; Bénédicte Augeard, ONEMA

#### Conférences introductives

S. Bonneville MEDDE/DEB — Eaux souterraines et Directive Cadre sur l'Eau : les enjeux et perspectives avec les travaux du « Blue Print ».

D. Allier (BRGM et contributeurs du SIE): BDLISA: le nouveau référentiel hydrogéologique en France: 10 ans après le colloque de 2002 à Bordeaux.

L. Chery (BRGM et contributeurs du SIE): BNPE, Banque Nationale des Prélèvements d'Eau: un outil fédérateur pour la connaissance des pressions quantitatives sur la ressource en eau.

Session 1 – Variations climatiques passées, actuelles et futures, impacts sur la recharge des aquifères.

P. Verjus et al. (DRIEE, Armines)- Modélisation hydrodynamique de surstockage en nappe semi profonde dans le cadre des mesures d'adaptation au changement climatique.

*M. Saltel et al. (BRGM, ENSEGID) -* Caractérisation de la paléorecharge des aquifères du nord du Bassin aquitain par l'utilisation de traceurs isotopiques et des gaz rares.

#### 16h30 – 17h00 Pause-café - posters

#### 17h00 - 18h00

### Session 2 – Contribution des nouvelles méthodes géochimiques et isotopiques

#### Présidents de session :

Mme Laurence Gourcy, BRGM/D3E; M. Roland Lastennet, Univ Bordeaux 1

E. Malcuit et al. (BRGM, ENSEGID) - Minéralisation des eaux de l'Eocène nord aquitain : Méthodologie appliquée et résultats.

C. Briand et al. (Univ P. et M. Curie, IPGP) - Couplage d'outils isotopiques et microbiologiques pour la détermination de l'origine des nitrates dans une source karstique en milieu agricole.

R. Lastennet et al. (Univ Bordeaux 1) - Nouvelles approches pour l'étude des transferts dans les systèmes karstiques depuis Henri Schœller. Application au système karstique de la grotte de Lascaux.

18h00

Assemblée générale du CFH

20h30

**Dîner** Restaurant La Passerelle









#### Vendredi 31 mai 2013

8h00 - 8h30

Accueil des participants

8h30-10h30

Session 2 - (suite)

### Présidents de session :

M. Patrick Lachassagne, DANONE SA, Vice Président du CFH, M. Alain Dupuy, ENSEGID

S. Barhoum et al. (Univ. P. et M. Curie, INERIS) - Comment les variations spatiales de la géochimie des eaux souterraines de la craie sont-elles liées aux processus d'infiltration et aux formations superficielles dans la ZNS ?

T. Merzoughi et al. (ANRH, Univ Tlemcen, IAGH, Algérie) - Origine de la salinisation des eaux souterraines en zone saharienne : Exemple de la nappe alluviale de la palmeraie de Béni Abbes (Vallée de la Saoura, Sud-Ouest algérien).

# Session 3 - Outils d'aide à la connaissance du fonctionnement des aquifères sédimentaires : de l'approche terrain à la modélisation

S. Pistre et al. (Univ Montpellier) - Cartographie des drains karstiques noyés par une sonde autonome semi-flottante.

F. Bardolle (Univ Poitiers) - Modélisation des hydrosystèmes par approche systémique.

A. Gutierrez et al. (BRGM) – Deux outils gratuits d'aide à l'interprétation : le logiciel TRAC (traçages), et un logiciel bientôt disponible : OUAIP (interprétation des pompages d'essais).

10h30-11h00 Pause-café et posters

11h00-12h30

Session 4 - Dynamique des aquifères sédimentaires, quelles échelles spatiale et temporelle à prendre en compte pour une meilleure gestion ?

Présidents de session : MM. Bruno De Grissac, SMEGREG, Président de l'AHSP, Nicolas Pedron, BRGM Aquitaine

I. Fournier (AEAG) - Perspectives d'évolutions méthodologiques pour une meilleure évaluation de la qualité des masses d'eau souterraine

O. Cabaret (ENSEGID) - Caractérisation physique et approche numérique du rôle des aquitards dans les systèmes aquifères multicouches — Application au complexe tertiaire nord-aquitain.









A. Henriot et al. (Evian Volvic World Sources, Univ Avignon, BRGM) - Modélisation mathématique d'hydrosystèmes complexes : application au système de l'eau minérale naturelle d'Evian.

*Ph. Mondain et C. Boulay (Calligée) -* L'aquifère des calcaires oligocènes du bassin de Saffré (44), une ressource en eau au comportement hydrogéologique atypique.

A. Gutierrez et al. (BRGM) - Simulation et prévision des concentrations en nitrates par modélisation globale. Exemples sur trois sites.

12h30-13h00 Remise du prix Castany

13h00-14h30 **Déjeuner** 

14h30 – 16h00 Session 5 - Protection des aquifères au regard des grands enjeux sociétaux.

#### Présidents de session :

### M. Jacques Mudry, Univ. Besançon ; Fouad Amraoui, Univ. Casablanca, Maroc

- F. Amraoui et J. Moustadraf (Univ. Casablanca, Maroc) Nouveau plan d'action pour une gestion rationnelle des ressources en eaux souterraines du Maroc.
- T. Constant et al. (InVivo, Watermodel) Gestion, protection, planification des ressources en eau, intégration, modélisation et applications aux captages en eau potable.
- A. Michels (Lyonnaise des Eaux, Univ. Bordeaux 1) Développement urbain et préservation des ressources en eau potable de la Communauté urbaine de Bordeaux : un enjeu majeur du projet métropolitain.
- B. Marsaud et al. (ANTEA, Régie des Eaux de Dax) Diagnostic des forages d'eau : quoi de neuf après dix ans d'obligation réglementaire ?
- L. Cadilhac (AERM&C, BRGM) Faisabilité de la reconquête du bon état à l'échelle d'une masse d'eau affectée par les pollutions diffuses d'origine agricole : évaluation des délais nécessaires, coûts des mesures et acceptabilité économique.

M. Chatelier et F. Bichot (BRGM) - Etat des lieux de la qualité des nappes sur le bassin de la Charente : première étape vers une modélisation des transferts d'azote.

16h30 – 17h30 Table ronde, synthèse, discussions

17h30-17h45 Clôture du Colloque

- M. François CANSELL, Directeur de l'Institut Polytechnique de Bordeaux
- M. Bernard BLAVOUX, Président du Comité Français d'Hydrogéologie

18h00 Apéritif à la mairie de Pessac

Au centre culturel de Pessac, Cinéma Jean Eustache, salle Jacques Ellul Place de la 5<sup>ème</sup> République, Pessac (Tram B, arrêt Pessac Centre)

20h00 Soirée libre









#### **SESSIONS POSTERS**

#### Session 1 : Variations climatiques passées, actuelles et futures, impacts sur la recharge des aquifères

M. Hilali et al. (Univ Meknès et Rabat, Maroc) - Problématique des ressources en eau des régions à climat saharien : Cas de Merzouga (Sud-Est du Maroc).

M. Amar et al. (Univ Meknès, Maroc) - Mode de recharge du système aquifère des sources de l'Oasis de Figuig, Haut Atlas oriental (Maroc).

### Session 2 – Contribution des nouvelles méthodes géochimiques et isotopiques

T. Bahaj et al. (Univ. Rabat et Er Rachidia, Maroc). - Hydrogéochimie et qualité des eaux dans les Bassins subdésertiques Marocains Ziz et Rhéris

*I.Kacimi et al. (Univ. Rabat, Maroc) -* Hydrogéochimie et qualité des eaux souterraines de la zone côtière de la plaine du Gharb (NW-Maroc).

# Session 3 – Outils d'aide à la connaissance du fonctionnement des aquifères sédimentaires : de l'approche terrain à la modélisation

A.Ben Nasr et al. (Univ Sfax, Tunisie; Univ Lyon) - Défluoration des eaux Par résines Échangeuses d'ions.

K. Drif et al. (Univ Rabat et Errachidia, Maroc) - Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hassan Addakhil (Sud-est du Maroc) par télédétection et SIG

H. Lazar, A. Benmoussa, N. Kassou, I. Kacimi, B. Tarik, M. Morarech (Univ Rabat, ONEP, Maroc) – Application de la géophysique en vue de dégagement des ressources en eau du système aquifère de Charf El Akab.

M. Ayach, N. Kassou, I. Kacimi, T. Bahaj, R. Daghmoumi (Univ Rabat, Maroc) - Synthèse hydrogéologique et géophysique de la nappe Maamora en vue d'implantation de nouveaux forages

## Session 4 - Dynamique des aquifères sédimentaires, quelles échelles spatiale et temporelle à prendre en compte pour une meilleure gestion ?

F. Chelih et al. (Univ Tebessa, Algérie) – Caractérisation chimique et structurale des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine de Hammamet, Tébessa NE algérien

T. Merzoughi et al. (ANRH, Univ Temlcen, Univ Oran, Algérie) - Modélisation d'un aquifère alluvial en zone hyper aride : cas de la nappe de la palmeraie de Béni Abbes (vallée de la Saoura, SW algérien).

A.Mansouri et al. (Univ Rabat et Er Rachidia, Maroc) - Caractérisation Géophysique et modélisation Tridimensionnelle des aquifères SW du bassin du Gharb (Maroc NW).

O. Douez (BRGM) - Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau par modélisation hydrodynamique : exemple avec le modèle Crétacé du sud Charentes.

B. Saaidia et al. (Univ Hannaba, Algérie) – Hydrogéologie et simulation numérique de l'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja (Algérie).

#### Session 5 - Protection des aquifères au regard des grands enjeux sociétaux.

Klaus Peter Seiler (Allemagne) – Early warning systems to control deep groundwater protection.









### TABLE DES MATIERES

Session hommage à Henri Schoeller	Page
Pierre Pouchan, son premier collaborateur à Bordeaux – Henri Schoeller (1899 - 1988)	17
Michel Vigneaux – Les premiers temps à Bordeaux	19
André Klingebiel - Souvenirs d'un ancien élève (1948-1954).	21
Christoph Von Stempel - Comité allemand de l'AIH — Témoignage pour le Professeur Henri Schoeller	25
Michel Bakalowicz - Henri Schoeller, hydrogéologue pionnier du traçage naturel.	27
Témoignages, anecdotes.	33
Conférences introductives	Page
D. Allier (BRGM et contributeurs du SIE) : BDLISA : le nouveau référentiel hydrogéologique en France : 10 ans après le colloque de 2002 à Bordeaux.	45
L. Chery (BRGM et contributeurs du SIE) : BNPE, Banque Nationale des Prélèvements d'Eau : un outil fédérateur pour la connaissance des pressions quantitatives sur la ressource en eau.	53
Session 1 - Variations climatiques passées, actuelles et futures, impacts sur la recharge des aquifères.	Page
P. Verjus et al. (DRIEE, Armines)- Modélisation hydrodynamique de surstockage en nappe semi profonde dans le cadre des mesures d'adaptation au changement climatique.	65
M. Saltel et al. (BRGM, ENSEGID) - Caractérisation de la paléorecharge des aquifères du nord du Bassin aquitain par l'utilisation de traceurs isotopiques et des gaz rares.	75
A. Fekri et N. Laftouhi (Univ. Casablanca et Marrakech, Maroc) - L'impact de la sécheresse sur la qualité des eaux souterraines (cas de la région d'Essaouira –Maroc).	85
Session 2 - Contribution des nouvelles méthodes géochimiques et isotopiques	Page
E. Malcuit et al. (BRGM, ENSEGID) - Minéralisation des eaux de l'Eocène nord aquitain : Méthodologie appliquée et résultats.	89
C. Briand et al. (Univ P. et M. Curie, IPGP) - Couplage d'outils isotopiques et microbiologiques pour la détermination de l'origine des nitrates dans une source karstique en milieu agricole.	97
R. Lastennet et al. (Univ Bordeaux 1) - Nouvelles approches pour l'étude des transferts dans les systèmes karstiques depuis Henri Schoeller. Application au système karstique de la grotte de Lascaux.	105









S. Barhoum et al. (Univ. P. et M. Curie, INERIS) - Comment les variations spatiales de la géochimie des eaux souterraines de la craie sont-elles liées aux processus d'infiltration et aux formations superficielles dans la ZNS ?	115
T. Merzoughi et al. (ANRH, Univ Tlemcen, IAGH, Algérie) - Origine de la salinisation des eaux souterraines en zone saharienne : Exemple de la nappe alluviale de la palmeraie de Béni Abbes (Vallée de la Saoura, Sud-Ouest algérien).	123
Session 3 - Outils d'aide à la connaissance du fonctionnement des aquifères sédimentaires : de l'approche terrain à la modélisation	Page
S. Pistre et al. (Univ Montpellier) - Cartographie des drains karstiques noyés par une sonde autonome semi-flottante.	135
F. Bardolle (Univ Poitiers) - Modélisation des hydrosystèmes par approche systémique.	137
A. Gutierrez et al. (BRGM) – Deux outils gratuits d'aide à l'interprétation : le logiciel TRAC (traçages), et un logiciel bientôt disponible : OUAIP (interprétation des pompages d'essais).	143
Session 4 - Dynamique des aquifères sédimentaires, quelles échelles spatiale et temporelle à prendre en compte pour une meilleure gestion ?	Page
I. Fournier (AEAG) - Perspectives d'évolutions méthodologiques pour une meilleure évaluation de la qualité des masses d'eau souterraine	153
O. Cabaret (ENSEGID) - Caractérisation physique et approche numérique du rôle des aquitards dans les systèmes aquifères multicouches – Application au complexe tertiaire nord-aquitain.	163
A. Henriot et al. (Evian Volvic World Sources, Univ Avignon, BRGM) - Modélisation mathématique d'hydrosystèmes complexes : application au système de l'eau minérale naturelle d'Evian.	171
PH. Mondain et C. Boulay (Calligée) - L'aquifère des calcaires oligocènes du bassin de Saffré (44), une ressource en eau au comportement hydrogéologique atypique.	175
A. Gutierrez et al. (BRGM) - Simulation et prévision des concentrations en nitrates par modélisation globale. Exemples sur trois sites.	185
Session 5 - Protection des aquifères au regard des grands enjeux sociétaux	Page
F. Amraoui et J. Moustadraf (Univ. Casablanca, Maroc) - Nouveau plan d'action pour une gestion rationnelle des ressources en eaux souterraines du Maroc.	189
T. Constant et al. (InVivo, Watermodel) – Gestion, protection, planification des ressources en eau, intégration, modélisation et applications aux captages en eau potable.	195
A. Michels (Lyonnaise des Eaux, Univ. Bordeaux 1) - Développement urbain et préservation des ressources en eau potable de la Communauté urbaine de Bordeaux : un enjeu majeur du projet métropolitain.	205
B. Marsaud et al. (ANTEA, Régie des Eaux de Dax) - Diagnostic des forages d'eau : quoi de neuf après dix ans d'obligation réglementaire ?	213









L. Cadilhac (AERM&C, BRGM) - Faisabilité de la reconquête du bon état à l'échelle d'une masse d'eau affectée par les pollutions diffuses d'origine agricole : évaluation des délais nécessaires, coûts des mesures et acceptabilité économique.	217
M. Chatelier et F. Bichot (BRGM) - Etat des lieux de la qualité des nappes sur le bassin de la Charente : première étape vers une modélisation des transferts d'azote.	229
POSTERS	Page
Session 1 : Variations climatiques passées, actuelles et futures, impacts sur la recharge des aquifères	
M. Hilali et al. (Univ Meknes et Rabat, Maroc) - Problématique des ressources en eau des régions à climat saharien : Cas de Merzouga (Sud-Est du Maroc).	241
M. Amar et al. (Univ Meknes, Maroc) - Mode de recharge du système aquifère des sources de l'Oasis de Figuig, Haut Atlas oriental (Maroc)	249
Session 2 – Contribution des nouvelles méthodes géochimiques et isotopiques	
T. Bahaj et al. (Univ. Rabat et Er Rachidia, Maroc) Hydrogéochimie des eaux souterraines du bassin de Ziz-Ghris.	255
I.Kacimi et al. (Univ. Rabat, Maroc) - Hydrogéochimie et qualité des eaux souterraines de la zone côtière de la plaine du Gharb (NW-Maroc).	263
Session 3 – Outils d'aide à la connaissance du fonctionnement des aquifères sédimentaires : de l'approche terrain à la modélisation	
A.Ben Nasr et al. (Univ Sfax, Tunisie; Univ Lyon) - Défluoration des eaux Par résines Échangeuses d'ions.	271
K. Drif et al. (Univ Rabat et Errachidia, Maroc) - Utilisation du SIG pour la réalisation des cartes thématiques utiles à l'élaboration des périmètres de protection à l'amont du barrage Hassan Addakhil.	273
H. Lazar, A. Benmoussa, N. Kassou, I. Kacimi, B. Tarik, M. Morarech (Univ Rabat, ONEP, Maroc) – Application de la géophysique en vue de dégagement des ressources en eau du système aquifère de Charf El Akab.	281
M. Ayach, N. Kassou, I. Kacimi, T. Bahaj, R. Daghmoumi (Univ Rabat, Maroc) - Application de la géophysique en vue de dégagement des ressources en eau du système aquifère de la Maamora.	289
Session 4 - Dynamique des aquifères sédimentaires, quelles échelles spatiale et temporelle à prendre en compte pour une meilleure gestion ?	
F. Chelih et al. (Univ Tebessa, Algérie) - Hydrochemical and geostructural caracterization of an alluvial aquifer Hammamet plain, NE Algeria.	297
T. Merzoughi et al. (ANRH, Univ Temlcen, Univ Oran, Algérie) - Modélisation d'un aquifère alluvial en zone hyper aride : cas de la nappe de la palmeraie de Béni Abbes (vallée de la Saoura, SW algérien).	305









A.Mansouri et al. (Univ Rabat et Er Rachidia, Maroc) - Caractérisation Géophysique et modélisation Tridimensionnelle des aquifères SW du bassin du Gharb (Maroc NW).	315
O. Douez (BRGM) - Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau par modélisation hydrodynamique : exemple avec le modèle Crétacé du sud Charentes.	325
B. Saaidia et al. (Univ Hannaba, Algérie) – Hydrogéologie et simulation numérique de l'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja (Algérie).	327
K.P. Seiler - An early warning system to better control deep groundwater exploitation	329

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# SESSION HOMMAGE HENRI SCHOELLER

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Henri Schæller (1899 - 1988)

#### Pierre Pouchan

Professeur émérite, Université de Bordeaux III - ENSEGID pouchan.pierre@neuf.fr

Henri Schoeller était né un an avant le vingtième siècle. Au sein d'une fratrie nombreuse, il recevait une éducation exigeante où chacun des enfants doublerait ses études d'un apprentissage : pour lui ce fut la serrurerie...

En 1929, il soutenait en Sorbonne une thèse brillante de Doctorat sur la tectonique alpine intitulée : « La Nappe de l'Embrunais au nord de l'Isère, avec quelques observations sur les régions voisines » qui le faisait entrer dans la cour des grands, mais le décès prématuré de son maître Emile Haug, allait le priver d'un poste promis à la Faculté des Sciences de Paris ...

C'est en 1938 qu'Henri Schœller est à nouveau distingué par un prix de l'Académie des Sciences pour sa découverte au sein de la série des schistes métamorphiques du Massif des Maures, de graptolites, que son célèbre ami, Conrad Kilian allait déterminer sans ambiguïté.

Après un court passage à la Compagnie de Géophysique, il obtient un poste d'ingénieur hydrogéologue au Ministère des Travaux Publics de Tunisie où il côtoie Eugène Berkaloff, puis Gilbert Castany : c'est le début d'une nouvelle discipline, d'une nouvelle passion. Sans jamais abandonner son esprit d'observation naturaliste, il pose les premières pierres d'une Hydrogéologie quantitative chère à notre ami Ghislain de Marsily. Il y forge des outils nouveaux, issus de ses travaux sur la Géochimie des Eaux Souterraines, tels que les graphiques semi-logarithmiques représentatifs de la composition chimique des eaux, qui portent son nom et restent en usage dans le monde entier.

C'est après la guerre, engagé dans les troupes américaines lors de la campagne d'Italie, qu'il retourne en France, appelé par Philippe Glangeaud, pour un poste de Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Bordeaux. Henri Schæller s'y déterminait par conviction, rarement par référence, et c'est à ce poste qu'il put exprimer toutes ses qualités de chercheur universitaire inspiré, doublé d'un travailleur infatigable.

Il nous recevait, pour une formation libre de préparation à l'Ecole Nationale Supérieure du Pétrole tantôt en exercice en salle, tantôt en stages de cartographie de montagne où renaissait sa passion pour la tectonique. Il avait un penchant marqué pour le continu, j'allais dire la continuité. Ainsi disait-il : « Quand on ne comprend plus rien, on met une faille. Avec une faille, on explique beaucoup de choses, avec deux failles on explique tout! ». Plus tard, il nous dira : « Quand on ne sait plus quoi faire, on fait des statistiques ». Il cultivait volontiers ce qu'on lui reprochait, et c'était sa meilleure part.

C'est la création des Troisièmes Cycles d'Enseignement Supérieur initiée par Gaston Berger en 1960 qui lui fournit l'opportunité de réaliser enfin son ambition.

Son ambition, c'était l'enseignement et la mise en œuvre d'une hydrogéologie moderne, et performante, à la fois quantitative et naturaliste, bâtie à son image, où savoir et culture tiendraient tour à tour la meilleure place...

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

C'est ainsi qu'aujourd'hui, l'ordinateur a remplacé le pendule, et l'aura prophétique du sourcier s'est reportée sur l'ingénieur.

Le Centre d'Hydrogéologie et Géochimie qu'il crée dès 1958, connait un vif succès. Il y accueille des étudiants et ingénieurs de toute nationalité et désireux de parfaire leur expertise à son contact.

Perfectionniste, il était allé rechercher quelques précieuses références auprès de C.V.Theis qui le reçut à Los Alamos, ainsi qu'à l'Académie des Sciences de Moscou où il fut accueilli solennellement par G. Bogomolov.

En une dizaine d'années, plus de quatre-vingts thèses sont réalisées sous sa direction, et dont la plupart ont largement contribué à la connaissance et la mise en valeur des eaux souterraines de toute l'Aquitaine.

Après plus de 150 publications, il parachève son œuvre en 1962, en publiant son «Traité des Eaux Souterraines», source d'inspiration et outil incontournable de l'hydrogéologue d'aujourd'hui.

Avec Jeannette et Simone ici présentes-sans oublier Marc, ami disparu- nous garderons le souvenir de cette silhouette toujours en éveil, et qui un jour s'est penchée vers nous.

L'injustice, selon le poète, serait de conclure, puisque l'œuvre est appréciée et qu'elle reste vivante...

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Les premiers temps à Bordeaux Michel Vigneaux

Professeur émérite, Université de Bordeaux 1 vigneaux.fer@wanadoo.fr

C'est avec une certaine émotion qu'aujourd'hui, je suis amené à évoquer quelques traits de la personnalité d'Henri Schœller dont j'ai fait la connaissance il y a quelques décennies (à quelque chose près, 70 ans) alors qu'il exerçait les fonctions d'Assistant au laboratoire de Géologie dirigé à l'époque par le Professeur Fernand Daguin, la Faculté des Sciences de Bordeaux étant située au 20 du cours Pasteur au voisinage de la Faculté des Lettres. Etant en mission à l'étranger et ne pouvant de ce fait assurer son service, je fus amené à accepter d'être chargé des fonctions d'enseignement et de remplacer Henri Schœller en effectuant les leçons de base relevant de ses responsabilités. A cette époque, j'étais préparateur temporaire à titre précaire et provisoire, premier grade universitaire du moment et situation pleine d'avenir. A son retour, Henri Schœller, nommé Maître de Conférences, libérait un poste d'assistant dans lequel j'étais appelé à le remplacer en particulier pour présenter le cours de Paléontologie.

Au cours de ma carrière, j'ai souvent constaté qu'il fallait subir des circonstances exceptionnelles, voire supporter des épreuves difficiles pour avoir l'opportunité de découvrir toutes les particularités permettant de bien connaître un être humain. Or, la Géologie de la Faculté des Sciences de Bordeaux a été cruellement marquée par la disparition du Professeur Fernand Daguin, après avoir accompli une mission d'enseignement aux Antilles françaises. L'hydravion à bord duquel il effectuait son voyage de retour en France devait sombrer dans l'océan Atlantique à la fin du mois de juillet 1948. Deux professeurs de la Faculté de Droit devaient également disparaître lors de cette terrible catastrophe.

Dans l'attente de l'officialisation du décès du responsable du service, Henri Schœller et moi-même avons été soudainement désignés pour assumer les responsabilités inhérentes au fonctionnement des enseignements comme à la gestion des activités courantes. Pour ce faire, la procédure universitaire a consisté à charger des fonctions de professeur et de maître de conférences les personnes les plus susceptibles de remplir les offices concernés. Cela fut mis en place en prévision de la rentrée universitaire suivante toute proche qui vit donc Henri Schœller et moi-même assurer les activités respectivement de professeur et de maître de conférences.

En éliminant de mon propos d'aujourd'hui les détails de toutes les difficultés que créent les particularités d'une situation aussi exceptionnelle et les improvisations qu'il a fallu déployer pour simplement résoudre les problèmes relevant du quotidien, il faut bien reconnaître que ce fût une période délicate à gérer, ne serait-ce qu'en raison de l'incertitude de l'avenir réservé au développement de la discipline géologique à Bordeaux.

La situation était d'autant plus délicate qu'Henri Schœller, alors Maître de Conférences en titre, avait laissé entendre son intention de poser sa candidature à la succession de Fernand Daguin, lorsque la chaire serait déclarée vacante et alors que d'autres collègues venaient souvent visiter le laboratoire en manifestant leur intérêt pour une nomination à Bordeaux. Certains allaient d'ailleurs jusqu'à avoir l'outrecuidance de préciser les changements qu'ils entreprendraient après leur éventuelle installation. Une demande de mutation de la part d'un professeur d'une autre université compliquait également la situation. Finalement, cette période d'incertitude devait se terminer après deux années d'une attente inquiète, par la nomination d'une personnalité étrangère à l'Université, le Professeur Pierre Lamare, de l'Institut agronomique, bien connu pour ses travaux relatifs aux Pyrénées basques.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Henri Schæller, nommé par la suite, Professeur sans chaire puis Professeur à titre personnel, devait révéler au cours de la période évoquée si riche en incidents inattendus, des qualités assez exceptionnelles pour faire face aux tâches relevant de ce genre de situation. Administrer le quotidien mais aussi projeter des interventions dans le cadre d'un futur incertain nécessite des qualités peu communes de rigueur et de ténacité.

Ces qualités apparaissaient en particulier, dans la minutie avec laquelle Henri Schœller présentait ses enseignements tant au niveau de la licence ès sciences qu'à l'occasion des séances de préparation au concours d'entrée à l'Ecole nationale supérieure du Pétrole. Ces dernières se déroulaient en fin de semaine et comprenaient l'interprétation de cartes géologiques. L'heure importait peu et le Professeur ne lâchait les étudiants que lorsqu'il était certain d'avoir été bien compris de son auditoire.

Les circonstances quelque peu précipitées, prises pour assurer les obligations du service de Géologie, m'avaient amené à présenter les leçons de Paléontologie exposées précédemment par Henri Schœller. Ayant disposé pendant la phase de transition de ses propres notes, j'ai pu constater, alors que cette discipline ne l'enthousiasmait guère, que les données étaient consignées avec beaucoup de minutie, illustrant cet aphorisme laissant croire que ce sont les sujets les moins bien connus que l'on enseigne le mieux.

Henri Schæller avait souhaité que j'assiste à certain de ses cours pour me permettre de me rendre compte de l'esprit dans lequel ils étaient présentés et surtout pour établir les meilleures liaisons entre les leçons qu'il exposait et mes propres enseignements. C'est anecdotique mais je ne peux m'empêcher d'évoquer devant vous l'enseignant présentant avec force son argumentaire et finissant son cours son costume de couleur gris clair disparaissant sous la couche de poussière de craie déposée par ses mains qui s'essuyaient sans aucune retenue. Cependant Henri Schæller étaient de ceux qui entendaient développer les Sciences de la Terre dans le sens des applications et ce fût une très grande satisfaction pour lui, d'avoir l'opportunité de créer le Centre d'Hydrogéologie auprès de l'Université de Bordeaux I et de pouvoir diriger des travaux de thèse de troisième cycle dans cette discipline. Certains d'entre vous ont dû connaître les enseignements délivrés dans le cadre d'un petit castel situé sur le campus de Talence/Pessac, une sorte de résidence de vacances pleine de charme donnant sur une ébauche de parc. Durant les beaux jours, une table installée à l'extérieur sous un arbre au feuillage épais, autorisait le déroulement d'échanges scientifiques dans un environnement très détendu, apparemment peu organisé mais parfaitement fonctionnel. Combien de fois ai-je entendu Henri Schæller dire qu'il ne regrettait en rien les sombres couloirs de l'ancienne implantation du cours Pasteur!

Henri Schæller était un géologue complet dont sa prédilection pour l'Hydrogéologie a fait de lui un pionnier dans cette discipline. Dès 1948, ne m'avait-il pas proposé d'effectuer une étude sur l'hydrogéologie de la région couverte par la forêt landaise ? Sa notoriété reconnue au niveau international a été illustrée par de nombreux travaux qui sont le reflet d'une grande activité que la retraite n'a en rien ralentie.

Mais souhaitant terminer mon propos de ce jour par une note plus intimiste, je voudrais rappeler qu'Henri Schœller était un excellent géologue de terrain qui avait une petite manie. Il répondait souvent par « plait-il » à une question pour se donner le temps de la réflexion avant de délivrer l'explication souhaitée par le demandeur. C'était une sorte de tradition à laquelle, à son grand plaisir, l'auditoire complice adhérait en souriant.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Souvenirs d'un ancien élève (1948-1954)

### **André Klingebiel**

Géologue retraité andre.klingebiel@wanadoo.fr

Cette évocation du Professeur Schœller, dont le fils Marc était un de mes amis depuis le lycée, rappelle trois étapes de ma vie d'étudiant en géologie. Chacune de ces trois étapes est illustrée par un diaporama présentant des documents directement élaborés pour ou avec le Professeur H. Schoeller, dont quelques illustrations sont reprises ici.

#### I. LE DEBUT DE MES ETUDES UNIVERSITAIRES

L'année 1948 – 1949 : Après la disparition du Professeur F. Daguin en juillet 1948, H. Schæller dut assurer tous les enseignements de Géologie à la Faculté des Sciences de Bordeaux (dont la préparation au SPCN), aidé par l'arrivée en cours d'année, d'un jeune brillant enseignant (Michel Vigneaux). En juillet 1949, il m'invitait à participer à un « camp de terrain » à Lescun (Pyrénées atlantiques) dans le cadre de la préparation au concours de l'Ecole du Pétrole où je fis équipe avec Robert Prud'homme et J.P. Dupuy. Les documents cartographiques de base pour nos « levers », étaient alors les « plans directeurs au 1:40.000ème » du service cartographique national. De l'année 1949-50 (préparation du Certificat de Géologie), je n'ai retrouvé qu'une fiche d'excursion à Léognan « sous la direction du Professeur Schæller ». Deux ou trois fois, je fus invité à accompagner Marc et son père, à visiter un chantier de forage de recherche d'eau potable dans le département des Landes.

### II. LA DECOUVERTE DES « GALETS RODES »

C'est un épisode plus personnel et plus intéressant au plan de ce qu'on désigne maintenant par « patrimoine géologique ».

Durant l'été 1948, ma famille en vacances à Escot observe le remplissage de la résurgence située au pied sud du viaduc ferroviaire d'Escot, par des galets du gave. La présence insolite d'une pierre plate, qui recouvrait un petit trésor de double-tournois, nous révèle l'existence de galets qui présentent des cupules d'usure, visibles aussi dans les parois calcaires de la résurgence. Durant l'été 1949, suite à de fortes pluies, nous avons pu observer le mouvement des galets dans le bouillonnement ascendant de la résurgence en crue. En novembre 1949 : j'informe mon Professeur de l'originalité de ce site et de la présence de galets à cupules, et parfois sphériques... Sa réponse : « l'eau ne peut pas monter, elle descend toujours ! », me surprend. Mais je persiste dans mes affirmations (je me suis aperçu plus tard qu'il aimait prêcher le faux pour savoir le vrai). Je ne peux lui répondre précisément sur la température de l'eau de la résurgence, sinon qu'elle est froide. Il me confie alors un beau thermomètre à mercure, avec mission, lors de mes balades en montagne, de relever la température (et l'altitude) de toutes les sources rencontrées (cela me valut beaucoup de moqueries de mes compagnons de balades).

Durant l'été 1950, en vacances familiales à Escot, j'apprends (tout se sait dans le pays) que Henri Schœller a visité la résurgence à Escot, et qu'il a emporté « un gros sac de galets ». En novembre 1950, je remets à H. Schœller un rapport sur la température des sources de la vallée d'Aspe, et un autre sur nos observations de la variation des débits de la résurgence, la disposition et le mouvement des galets à cupules (texte et 2 schémas).

Au printemps 1952, lors d'un rendez-vous de travail concernant le Diplôme d'Etudes Supérieures que je réalisais sous sa direction, H. Schœller me remet un « tiré à part » de la publication qu'il vient de réaliser sur les « galets rodés » dans les *Annales de spéléologie*, T. VII, fasc. 1. Cette publication est très importante car elle officialise un processus d'usure des galets, nulle part ailleurs encore décrit. Ce site a été malheureusement dévasté par des

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

travaux de déblaiement de la résurgence, et les galets étudiés par H. Schœller ont été perdus. Je possède quelques spécimens de ces « galets rodés » recueillis par ma famille, reliques d'un patrimoine géologique qui n'a pas bénéficié de toute l'attention qu'il aurait mérité.



Figure 1 – Galets rodés

#### LES GALETS RODÉS

NOUVELLE FORME D'USURE

PAR UN NOUVEAU MÉCANISME

par Henri SCHOELLER

L'un de mes élèves, M. André Klingebiel, et son père, professeur au Lycée de Bordeaux, ont signalé à mon attention la source du viaduc d'Escot (Basses-Pyrénées) et spécialement des galets à cupules et d'autres complètement sphériques, prevenant du remplissage des griffons. Je les en remercie bien vivement, ainsi que M. Burguière, mon collaborateur, à qui je dois les dessins.

A première vue, ces galets pourraient être pris pour des galets impression Mais ils ont une tout autre origine. C'est ce que vais montrer.

La source du viaduc d'Escot est située dans la vallée d'Aspe, au bord et à l'Est de la route nationale 618, à 15 m. en aval de la culée Sud du viaduc du chemin de fer, soit au point de coordonnées Lambert : X = 360,45 ; Y = 90,05. Elle est à 20 m. du gave et à l'altitude de 363 nètres environ.

La source présente une cavité horizontale et deux grandes cheminées de plus de 15 mètres de hauteur, verticales, situées côté à côté, à parois lisses et à surfaces arrondies, le tout creusé dans les calcaires aptiens.

La chemine Sud de deux à tros, mètres de diamètre à la base, est course.

La cheminie Sud, de deux à trois mêtres de diamètre à la base, est coupée, c'est-à-dire ouverte, vers le gave, sur toute sa hauteur. Le fond est garni de galets de toutes tailles, jusqu'à un niveau siuie environ à 1 m. 50 au-dessus du gave. Les galets descendent à plus d'un mêtre de profondeur. Sur la paroi de la cheminée, on peut observer, jusqu'à 5 mêtres environ de hauteur, des cupules dont il sera question plus lein.

La cheminée Nord, de un à deux mêtres de diamètre à la base, est double et

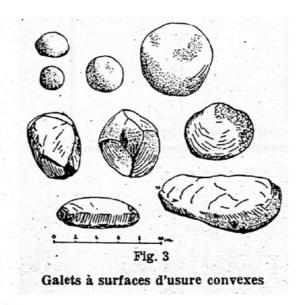


Figure 2 – Publication par Schæller dans les Annales de Spéléologie Tome VII - 1952 - fasc.1

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### III. L'ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA JALLE DE ST MEDARD (GIRONDE)

Ayant l'intention de me présenter à l'agrégation de Sciences Naturelles, je devais disposer, outre la Licence, d'un « diplôme d'Etudes Supérieures », petit travail de recherche sanctionné par un mémoire. Le Professeur H. Schœller voulut bien accepter de me confier ce sujet d'étude, et de diriger mes travaux, réalisés de 1952 à 1954. Outre les études de terrain et les relevés mensuels des niveaux d'eau dans les nombreux puits du bassin versant, mon maître m'a incité à effectuer des études de Laboratoire (analyses granulométriques, mesures de perméabilité), et des études environnementales de la végétation de la Haute Lande.

Les moyens du « Laboratoire de Géologie SPCN » étaient rudimentaires, limités au bureau du Professeur, et j'appris à me « débrouiller » avec l'exigüité des locaux de la Faculté, les opportunités de la maison familiale. Je tiens à souligner la disponibilité et la pertinence de l'aide que H. Schœller m'a apportée dans la phase de rédaction du mémoire, de septembre 1953 jusqu'à la soutenance en mars 1954. J'étais alors affecté au Centre Pédagogique Régional de Toulouse, et ne pouvais rencontrer mon Maître que le Week-end à Bordeaux. J'ai gardé ses observations manuscrites, sur mes brouillons dactylographiés, et sur les dessins à l'encre de Chine sur calques pour tirages « à l'ozalid ». Dans la précipitation de la réalisation finale du Mémoire, je pense n'avoir pas respecté sa demande de mentionner que « ce travail a été réalisé au Laboratoire de Géologie SPCN de la Faculté des Sciences de Bordeaux ». L'avenir était ailleurs !

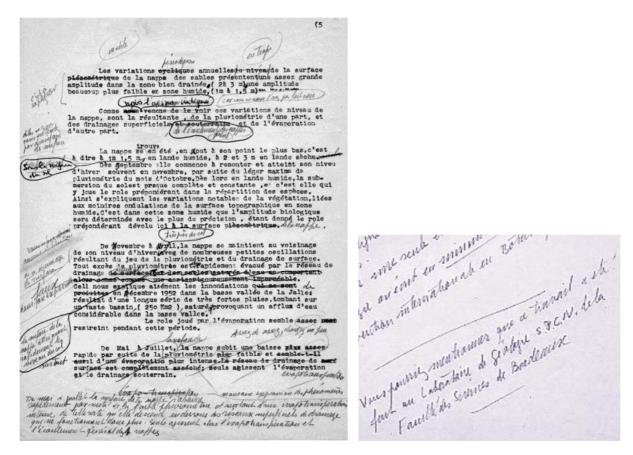


Figure 3 – Manuscrit corrigé par Schæller

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Témoignage pour le Professeur Henri Schoeller

### **Christoph von Stempel**

Hydrogéologue retraité de la Mine de Sel de l'Asse christoph-von stempel@t-online.de

Avant de commencer mon témoignage pour le professeur Henri Schœller j'aimerais vous transmettre les meilleures salutations du professeur Robert Langguth qui avait été avant moi au Centre d'Hydrogéologie et de mon ancien camarade d'études Willy Weyns. Tous les deux déplorent de malheureusement ne pas pouvoir assister à ce Colloque pour différentes raisons.

Le professeur Schœller a été mon plus grand maître d'université. Avant de me rendre à Bordeaux je demandai au Professeur Nöring, président du Service Géologique de la Hesse en Allemagne quel était son opinion sur lui. Il me répondit "Schoeller ist ein Gott!", ce qui veut dire "Schoeller est un dieu!". Ceci m'encouragea naturellement pour me rendre à Bordeaux au Centre d'Hydrogéologie. Henri Schœller était effectivement considéré comme une des plus grandes capacités en géochimie en Allemagne. On n'a qu'à penser au Diagramme Schœller pour l'interprétation d'analyses chimiques des différentes eaux. À Bordeaux je fus très gentiment accueilli par le Professeur Schœller et ses assistants. En novembre 1969 il m'offrit de faire une thèse de 3ème cycle dans le cadre d'une expertise qu'il devait faire pour le Ministère des Ponts et Chaussées à Périgueux. Il s'agissait de connaître les ressources en eau de toute la région environnante pour pouvoir assurer l'alimentation en eau potable de cette ville jusqu'à l'an 2010. Jadis cela me paraissait un temps très éloigné et maintenant nous sommes déjà en 2013 !

Ma première année à Bordeaux (1969) je fis mes études de Diplôme d'Etudes Approfondies. Nous étions en tout 6 élèves : deux français et quatre étrangers. C'étaient François Lanceron, un étudiant basque dont malheureusement je ne me souviens plus du nom, Willy Weyns, E. Marchand, Pedro Armisen et moi-même. On recevait des cours des professeurs Henri Schoeller et Aurouze, son successeur, et des assistants MM. Pouchan, Cazal, Vouvé, Aubic, Viguier et Marc Schoeller. Toutes les deux semaines nous recevions un cours de M. Emsellem et plus tard de M. de Marsily venant de l'Ecole des Mines. Au début de mon temps à Bordeaux M. Lacazedieu défendit sa thèse. J'en étais profondément impressionné. M. Boyrie défendit une année plus tard également sa thèse et se maria bientôt avec une jeune hydrogéologue. J'étais invité à leur mariage sur l'Île d'Oléron. Comme le père de la mariée était pêcheur d'huîtres, je dégustai les meilleures huîtres de ma vie. Le concierge M. Lamotte s'occupait très bien de l'entretien du Centre d'Hydrogéologie. La charmante secrétaire Martine faisait tous les travaux de dactylographie et m'aida en tapant toutes les références bibliographiques figurant dans ma thèse. Quand je donnai un exemplaire de ma thèse à M. Klaus-Peter Seiler qui avait passé plusieurs mois au Centre d'Hydrogéologie, ce fut la première chose qu'il contrôla: ces références bibliographiques (97 en tout).

Henri Schæller s'est aussi occupé jusqu'à la fin de sa vie de la géochimie des eaux souterraines près de la Mine de l'Asse en Allemagne où des déchets radioactifs sont enfouis et pour laquelle j'ai travaillé 27 ans comme hydrogéologue. Le problème consistait à savoir si les eaux salées que l'on rencontrait dans les sources et forages à proximité de la mine provenaient du massif de sel du Zechstein où les déchets sont stockés ou sont d'origine d'autres couches surincombantes, p. ex. du Buntsandstein Supérieur, Muschelkalk Moyen ou Keuper (donc du Trias). Marc Schoeller a continué le travail de son père après sa mort pour élucider ce problème ce qui mena à la constatation qu'effectivement presqu'aucune des eaux salées dans les environs de la Mine de l'Asse ne proviennent du Zechstein. D'autres recherches (isotopes, écoulement souterrain des eaux salées dans les forages à proximité directe de la Mine, sismique, paléobotanique et d'autres) ont confirmé ce fait, ce qui – bien entendu –

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

joue un très grand rôle pour la sécurité de la mine. Comme la question du stockage des déchets radioactifs n'est toujours pas résolue en Allemagne cela avait l'effet positif qu'en général il y avait toujours suffisamment de moyens pour financer ces recherches excessivement coûteuses. Et les Schoeller ont pu heureusement en profiter !

Comme cela fait déjà 25 ans qu'Henri Schoeller est décédé, j'avais eu l'idée qu'on pourrait organiser des "Journées Schoeller" dont le résultat est ce "Colloque Schœller" si bien préparé par tant de personnes très dévouées, à commencer par Madame Laurence Chery que j'ai rencontrée à Blois en octobre dernier et où j'ai pu lui remettre un exemplaire de ma thèse et MM. Bichot et Marchet. Je les remercie beaucoup de tous leurs efforts et je remercie aussi tous les autres qui se sont donnés tant de peine pour organiser ce merveilleux colloque comme Madame Nathalie Jacquemain, Mme. Bouchra El Oifi, M. JP. Platel qui sont allés avec moi sur le terrain pour organiser l'excursion technique. Je n'arrive pas hélas à nommer ici tous les noms qui ont contribué à cet évènement. Je les prie de m'en excuser.

Je me souviens d'une excursion avec le professeur Henri Schœller sur mon terrain à Périgueux. Quand nous allâmes déjeuner, - vous savez comme on mange bien dans le Périgord - je voulais payer mon repas, mais M. Schœller avait déjà tout réglé. Mais comme on me payait mes déplacements sur le terrain, je protestais, alors il me répliqua "Vous me le rendrez au Paradis!". Ceci est pour dire que je n'ai pas seulement pu profiter des immenses connaissances d'Henri Schœller mais ai aussi beaucoup apprécié son comportement presque paternel envers ses élèves ! Je le garderai toujours dans mon meilleur souvenir !

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Henri Schæller, hydrogéologue pionnier du traçage naturel

#### Michel Bakalowicz

HydroSciences Montpellier, Université Montpellier 2 michel.bakalowicz@gmail.com

#### Résumé

Au moment où les hydrogéologues français proposaient d'analyser le tarissement des sources ou le comportement du niveau des nappes lors de pompages, donc par une approche hydrodynamique, H. Schœller lançait les bases de l'approche géochimique et thermique des écoulements souterrains par l'étude de traceurs naturels. Cette approche très novatrice alors a prouvé qu'elle apporte à la connaissance des aquifères et de leur dynamique des informations nouvelles et complémentaires de celles fournies par l'hydrodynamique.

Cependant, maintenant qu'il est possible de traquer presque tous les composés minéraux et gazeux transportés par l'eau, il me paraît nécessaire de revenir sur les traceurs naturels les plus courants et les plus simples à acquérir. Trop de travaux modernes les négligent ou les interprètent mal ou de façon incomplète.

H. Schæller avait insisté sur les traceurs naturels suivants : l'ion  $Cl^-$ , le  $CO_2$  et les carbonates en solution, l'indice d'échange de cations (ou de bases), considérant les alcalins et les chlorures, en relation avec la silice. Ces trois exemples seront présentés sommairement de manière à rafraîchir la mémoire des hydrogéologues et à les inciter à (re)venir à des bases très utiles, s'appliquant à des milieux différents : les régions à évapotranspiration forte, le karst et les aquifères de socle.

#### **Abstract**

While French hydrogeologists proposed to analyze the recession of spring flow or the behavior of groundwater level during pumping, as a hydrodynamic approach, H. Schæller launched the foundation of a geochemical and temperature approach of groundwater flow through the study of natural tracers. This highly innovative approach has proven to bring to the knowledge of aquifers and their dynamics new information and complementary to those provided by the hydrodynamical approach.

However, at a time when it is possible to track almost all inorganic and organicsolutes and gas transported by water, I find it necessary to return to the natural tracers most common and the easiest to acquire. Too many neglect them or interpret them wrongly or in an incomplete H. Schœller insisted on the following natural tracers: Cl ion, CO2 and carbonates in solution, cation (or base) exchange index, considering the alkaline andchloride ions in relation to silica. These three examples will be presented in summary form in order to joghydrogeologist's memory and encourage them to come (back) to very useful bases, applied to different processes and environments: evapotranspiration, karst and hard rock aquifers.

#### I. INTRODUCTION

Pendant les années 40 et 50, l'hydrogéologie française s'est développée en s'appuyant surtout sur des travaux conduits au Maghreb. Les essais de puits et le tarissement de rivières ou de sources constituèrent alors l'essentiel des moyens d'étude des écoulements souterrains pour en déterminer les caractéristiques et comprendre leur dynamique. Ces travaux furent conduits par des ingénieurs dans le cadre de recherches appliquées (voir par exemple les travaux de Tixeront, Berkaloff, Schneebeli etCastany, dans [5, 6]) qui considéraient l'hydrogéologie comme partie intégrante de la géologie appliquée et des travaux d'ingénieurs.

Peu d'universitaires s'intéressèrent alors à l'hydrogéologie comme discipline scientifique à part entière nécessitant des recherches approfondies. C'est dans ce contexte qu'Henri Schæller introduisit une approche

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

inspirée de son expérience construite également au Maghreb et en partie avec les pétroliers [17, 18, 21]: la recherche de marqueurs physiques et chimiques permettant de caractériser une origine, un processus ou une dynamique en parallèle avec l'approche purement hydrodynamique. Il s'appuya sur des expériences de terrain conduites avec ses élèves pour formaliser une démarche globale d'étude des eaux souterraines combinant l'approche hydrodynamique et l'approche géochimique [22].

Bien qu'il se soit intéressé à un nombre important de traceurs des écoulements souterrains, depuis la température [19] jusqu'au brome et à l'iode [20], nous examinerons uniquement trois exemples qui permettent d'illustrer des processus et des types d'aquifères spécifiques : l'ion chlorure, marqueur de l'évapotranspiration et, accessoirement, de pollutions ou de contamination à partir d'autres hydrosystèmes ; l'anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>) et les carbonates, marqueurs essentiels dans les aquifères carbonatés et les karsts ; les relations entre silice dissoute et ions alcalins, exprimées par l'indice d'échange de cations (ou de bases), dans les aquifères de socle notamment où les argiles peuvent abonder. En effet, ces rappels nous paraissent nécessaires, alors que de nombreux travaux actuels ne font que se référer à des traceurs dits nouveaux, dont les isotopes, sans chercher à les comparer aux informations fournies par des traceurs classiques, plus simples à acquérir et parfois plus riches d'enseignements dans la mesure où ils peuvent servir de guide pour rechercher des marqueurs particuliers. En outre, toute référence bibliographique un peu ancienne tend à être ignorée des jeunes générations. Et le traité de Schœller [22], qui vient de fêter ses 50 ans, fait partie de ces reliques dont se débarrassent nombre de bibliothèques !

#### II. L'ION CHLORURE ET L'EVAPOTRANSPIRATION

L'ion chlorure est un ion très soluble, conservatif, qui n'est ni retenu, ni libéré par la végétation et la plupart des roches aquifères. Il est apporté par les pluies qui lessivent les poussières atmosphériques, dont les sels marins, fournis par les embruns. Du fait de la consommation d'une partie des eaux précipitées par l'évaporation directe et par la transpiration des végétaux, la quantité d'eau disponible à l'écoulement diminue, ce qui provoque une reconcentration en chlorure, notamment dans les eaux rechargeant les aquifères. Schœller[22] et à sa suite son fils [23]ont montré les premiers que le bilan massique de chlorure permet d'évaluer le taux d'évapotranspiration.

$$E_{CI}=PxCE_{CI}, \qquad (1)$$
  
$$S_{CI}=QxCS_{CI} \qquad (2)$$

avec E et S, masses de chlorure en entrée et sortie de l'hydrosystème; C, les concentrations en chlorure, à l'entrée et à la sortie; P, la quantité d'eau précipitée; et Q, la quantité d'eau écoulée. Le bilan est établi à l'échelle annuelle ou pluriannuelle. Comme il est admis que l'ion chlorure est conservatif, on a :

$$E_{CI} = S_{CI}$$

à condition qu'il n'y ait aucun apport de chlorure par des eaux polluées ou par dissolution de roches salines. Compte tenu que par ailleurs, en l'absence d'autres apports d'eau à l'hydrosystème :

soit ETR=P-Q, ou ETR=(P/Q)-1

le bilan massique de chlorure permet d'évaluer ETR. En effet, d'après les relations (1) et (2), on a :

$$P/Q=CS_{CI}/CE_{CI}$$
, d'où ETR= $(CS_{CI}-CE_{CI})/CE_{CI}$ 

Cette méthode, utilisée explicitement comme ici, ou simplement implicitement, a été rarement mise en œuvre (voir par exemple [1, 2, 3, 4, 7, 8, 10]). Il faut faire une place à partau travail de Münsterer et al. [11] qui ont cherché à comprendre l'excès de <sup>36</sup>Cl à partir du bilan de chlorure, pour tenter d'en déduire le rôle de l'évapotranspiration et les apports anthropiques.

L'ion Cl est finalement un excellent marqueur de la reconcentration par évapotranspiration dans la zone proche de la surface de toutes les formations : l'épikarst, le sol, la couverture d'altérites de socleet plus généralement le milieu hypothelminorhéique des hydrobiologistes [9].

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Cette reconcentration est nécessairement associée à une immobilisation, limitée pour Na et très forte pour K. Par conséquent, le rapport ionique [Cl-(Na+K)]/Cl qui, dans les eaux de précipitations est de l'ordre de 1, devient très supérieur à 1 du fait de leur séjour dans le sol et de la consommation de K et Na par la végétation. Nous reviendrons sur ce rapport ionique plus loin.

L'établissement du bilan de chlorure est indispensable pour évaluer les apports d'eaux usées, traitées ou non, domestiques ou agricoles. Toute recherche de marqueur de pollution domestique, comme par exemple les résidus médicamenteux, mériterait ainsi d'être associée à l'ion Cl, ce qui permettrait une évaluation des volumes d'eau recyclée en jeu. Quant aux pollutions d'origine agricole, l'association Cl-NO<sub>3</sub> est souvent riche d'enseignements, en particulier dans le cas d'aquifères devenant captifs et où intervient la dénitrification [12].

### III. LE CO<sub>2</sub> ET LES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES

Très tôt Schæller [22]s'est intéressé au CO<sub>2</sub> et aux équilibres calco-carboniques, ce qui lui a fourniles bases pour l'étude des écoulements dans le karst et les grottes, quand il a été en charge de la commission scientifique de la grotte de Lascaux, dans les années soixante. Avant Roques [14], il a formulé correctement l'ensemble des équilibres chimiques entrant en jeu dans la dissolution et la précipitation des minéraux carbonatés, sans toutefois aboutir à la généralisation proposée par Roques. Cependant, comme Roques [14]et d'autres à la même époque, il a été contraint à proposer une approche empirique pour calculer ces équilibres, ce que nous faisons maintenant de manière rigoureuse avec nos ordinateurs grâce à des logiciels relativement simples, par exemple Diagrammes [24].

J'ai montré [2, 3] que le système calco-carbonique est un remarquable informateur des écoulements souterrains dans le karst, à condition de s'intéresser simultanément à la pression partielle de CO<sub>2</sub>, pCO<sub>2</sub>, et à l'indice de saturation de la calcite, IS<sub>c</sub>. Bien que la calcite soit le carbonate le plus facilement dissous, elle est toujours prise comme référence parce que c'est toujours le carbonate qui précipite en premier.

En effet, alors que la pCO<sub>2</sub> détermine les concentrations en Ca, Mg et (HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>) dans la solution à l'équilibre,  $IS_c$ informe sur l'état d'équilibre de la solution, c'est-à-dire si elle est à l'équilibre ( $IS_c$ =0), susceptible de dissoudre de la calcite (sous-saturée,  $IS_c$ <0), ou de la précipiter (sursaturée,  $IS_c$ >0). En fonction de la pCO<sub>2</sub>, il est possible de définir le milieu parcouru par l'eau : ouvert sur l'extérieur (pCO<sub>2</sub> faible, <10<sup>-3</sup>), ou confiné avec  $IS_c$ 0 ou de CO<sub>2</sub> endogène (pCO<sub>2</sub> forte, >5.10<sup>-2</sup>).

Lorsque  $IS_c$  est nul, cela signifie que l'eau est restée suffisamment longtemps au contact de la roche carbonatée, soit environ au moins trois semaines pour les  $pCO_2$  classiquement rencontrées (voir [15]). Lorsque  $IS_c$  est négatif, cela signifie que l'eau souterraine n'a pas résidé assez longtemps au contact de la roche carbonatée pour utiliser la totalité de son  $CO_2$  pour dissoudre la calcite, donc que son temps de séjour est en moyenne inférieur à trois semaines, et d'autant plus court que  $IS_c$  est faible. C'est, avec les données de traçages artificiels, le seul marqueur de temps de séjour court.

Les  $IS_c$  positifs ne donnent jamais d'indication de temps de séjour ; ils indiquent uniquement que l'eau souterraine est passée d'un milieu riche en  $CO_2$  à un milieu plus pauvre en  $CO_2$ . C'est le cas classique d'une eau de la zone noyée arrivant dans un conduit partiellement dénoyé et plus ou moins connecté à l'atmosphère extérieure. Cela s'observe également dans la zone d'infiltration quand l'eau circulant dans les fissures de la roche en écoulement diphasique émerge dans une galerie de grotte, d'où le  $CO_2$  s'évade vers l'extérieur. Le taux de sursaturation dépend alors à la fois de la différence entre la  $pCO_2$  dans les fissures et celle dans la galerie et du temps écoulé depuis le changement de milieu. Mais un  $IS_c$  positif peut également être un artéfact, lié aux conditions de conservation de l'échantillon ou à un temps trop long entre prélèvement et analyse. C'est pourquoi, pour tirer le maximum d'information du système calco-carbonique il est indispensable de réaliser les dosages de  $CO_3$ 0, ainsi que la mesure du pH et de la température, le plus tôt possible après prélèvement (moins de  $CO_3$ 1), ainsi que la mesure du pH et de la température, le plus tôt possible après prélèvement (moins de  $CO_3$ 1).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Parmi les travaux récents, celui de Peyraube et al. [13] doit être remarquée. En effet, les relations entre pCO<sub>2</sub> et IS<sub>c</sub>, étudiées dans leurs variations temporelles, permettent de révéler les conditions d'écoulement souterrain et, tout particulièrement, de caractériser les écoulements dans la zone non saturée.

#### IV. L'INDICE D'ECHANGE DE CATIONS

Schœller[16] parle d'indice d'échange de base (IEB). L'échange de cations est un mécanisme de fixation préférentielle de certains ions par les minéraux argileux. En principe, K et surtout Na de la solution sont échangés contre Ca et Mg fixés dans certains sites des minéraux. Ainsi, si le temps de contact avec les argiles est assez long, la solution tend à s'appauvrir en Na et K, et à s'enrichir en Ca et Mg. En fait l'enrichissement en Ca et Mg est difficile à montrer parce que d'une part pour deux ions Na (ou K) un seul ion Ca (ou Mg) est libéré, d'autre part les concentrations en Ca et Mg sont en général élevées.

L'augmentation de la concentration en Na et K par échange de cations est évaluée en considérant que l'eau des précipitations, ou de la recharge, était à l'équilibre ionique entre Cl et (Na+K). On considère donc le rapport ionique [Cl-(Na+K)]/Cl comme indice d'échange de cations (IEC) :

IEC=[CI-(Na+K)]/CI.

Lorsque IEC est négatif, cela signifie que l'eau s'est enrichie en Na et K.

Mais ce peut être par un mécanisme autre que l'échange de cations. En effet, les minéraux des roches de socle, comme les granites, tendent à fournir aux solutions nettement plus de Na et K que de Ca et Mg, donc de produire un IEC négatif. En fait il faut parallèlement obligatoirement doser la concentration en silice dissoute SiO<sub>2</sub>, qui fournit une bonne indication sur la solubilisation de matériel silicaté libérant Na et K. Ces informations devraient toujours apparaître lorsque l'on s'intéresse par exemple au lithium ou aux isotopes du strontium, susceptibles de provenir de roches de socle plutôt que de matériel argileux.

Dans tous les cas, un IEC négatif caractérise des eaux à temps de séjour relativement long (plusieurs mois au moins), puisqu'il s'agit toujours de réactions plus lentes que celles concernant les carbonates.

#### V. CONCLUSION

Ces trois exemples montrent qu'en s'intéressant uniquement aux éléments majeurs et mineurs en solution dans les eaux souterraines, il est possible d'en déduire des informations rigoureuses sur certaines des conditions d'écoulement dans les aquifères : le temps de séjour, très court à relativement long ; l'écoulement en milieu confiné ou non, associé ou non à une phase gazeuse, pouvant être liée à l'atmosphère extérieure. Très tôt H. Schœller nous a montré la nécessaire complémentarité entre l'analyse des écoulements souterrains à partir de l'hydrodynamique, informant sur le transfert d'énergie, et celle fournie par la géochimie des eaux, informant sur le transport de matière. Aucune des deux approches prise isolément ne permet de comprendre totalement les écoulements souterrains.

Mais Henri Schœller nous apporte un enseignement supplémentaire dans l'introduction de son ouvrage de 1962 [22].

« On ne peut plus rechercher l'eau comme autrefois ... Les seules connaissances géologiques sont insuffisantes. Le géologue, pour devenir hydrogéologue, a besoin de sérieuses connaissances de mathématiques, de physique, de chimie. Sinon, il ne peut ni expliquer les phénomènes, ni diriger efficacement les recherches, ni trouver des remèdes à l'épuisement possible des eaux souterraines (et j'ajouterai à leur pollution). Par contre, l'ingénieur, lui, mathématicien et physicien, ne peut faire d'hydrogéologie sans une connaissance intelligente de la Géologie ». Son propos reste toujours d'actualité.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

### recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### Références bibliographiques :

- [1] Allison G. B., Stone W. J. & Hughes M. W. 1985. Recharge in karst and dune elements of a semi-arid landscape as indicated by natural isotopes and chloride. *J. Hydrology*, 76: 1-25.
- [2] Bakalowicz M. 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doctorat ès Sciences naturelles, Paris 6, 269 p.
- [3] Bakalowicz M. 1994. Water geochemistry: water quality and dynamics. In: Stanford J., Gibert J. and Danielopol D. eds. Groundwater ecology, pp. 97-127. Academic Press.
- [4] Blavoux B. & Mudry J. 1986. Influence des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique; rôle du sol et de l'épikarst dans la concentration des chlorures. *Bull. Soc. géol. France, 2 (4) : 667-674*.
- [5] Castany G. 1967. Traité pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris, 661 p.
- [6] Castany G. 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod, Paris, 238 p.
- [7] Lastennet R., Puig J.M., Emblanch C. & Blavoux B. 1995. Influence de la zone non saturée sur le fonctionnement des systèmes karstiques. Mises en évidence dans les sources du Nord-Vaucluse. *Hydrogéologie*, (4): 57-66.
- [8] Mba M. Th. 1971. Contribution à l'étude des variations des teneurs en chlore des eaux souterraines de quelques karsts de la région languedocienne. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 110 p.
- [9] Mestrov, M. 1962. Un nouveau milieu aquatique souterrain, le biotope hypothelminorhéique. *C. R. Acad. Sci. Paris, 254* (14): 2677-2679.
- [10] Mudarra M. & Andreo B. 2011. Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). *J. Hydrology, 397 (3-4): 263-280*.
- [11] Münsterer C., Fohlmeister J., Christl M., Schröder-Ritzrau A., Alfimov V., Ivy-Ochs S., Wackerbarth A.& Mangini A. 2012. Cosmogenic 36Cl in karst waters from Bunker Cave North Western Germany A tool to derive local evapotranspiration? *Geochimica et Cosmochimica Acta, 86 : 138-149*.
- [12] Nadaud H. 1987. Le Portlandien des Charentes entre Saint-Jean d'Angély, Rouillac et Cognac. Etude hydrogéologique et hydrochimique. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux 1, 185 p.
- [13] Peyraube N., Lastennet R. & Denis A. 2012. Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of a karstic massif, using the PCO<sub>2</sub>—SIc relationship. *J. Hydrology, 430-431: 13-24*.
- [14] Roques H. 1969. Problèmes de transfert de masse posés par l'évolution des eaux souterraines. *Ann. Spéléol., 24 (3) : 455-494*.
- [15] Roques H. 1964. Contribution à l'étude statique et cinétique des sytèmes gaz carbonique eau carbonate. *Ann. Spéléol., 19 (2) : 255-484*.
- [16] Schœller H. 1934. Les échanges de base dans les eaux souterraines ; trois exemples en Tunisie. *Bull. Soc. géol. France, 5* (4): 389-420.
- [17] Schœller H. 1948. Le régime hydrogéologique des calcaires éocènes du synclinal du Der el Kef (Tunisie). *Bull. Soc. géol. France, 18 (5) : 167-180*.
- [18] Schœller H. 1949a. Cours d'hydrogéologie. Ecole Nationale supérieure des Pétroles, Rueil, 364 p.
- [19] Schœller H. 1949b. La température des eaux souterraines. Travaux du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Bordeaux, 182 p.
- [20] Schæller H. 1954. L'iode, le brome et le potassium dans les eaux souterraines et dans les eaux de gisements de pétrole. *Angew. Chem. Deutsch.*, 66 : 85.
- [21] Schœller H. 1955. Hydrogéologie. Ed. Technip, Paris, 443 p.
- [22] Schæller H. 1962. Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson, Paris, 642 p.
- [23] Schœller M. 1963. Recherches sur l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines. E.Drouillard éd., Bordeaux, 231 p.
- [24] Simler R. 2013. Logiciel Diagrammes. Téléchargeable sur : http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Témoignages, anecdotes

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Robert PRUD'HOMME

Professeur retraité, Université de Bordeaux 1 robert.prudhomme@free.fr

Lorsque je l'ai rencontré pour la première fois, en 48 ou 49, j'étais en Math. Générales à la fac de Bordeaux, et j'ai suivi les activités du labo de Géologie, en dilettante, n'étant pas régulièrement inscrit. Je voulais être géologue, et ai donc suivi les cours du Professeur Daguin, du Professeur Schoeller, et de l'Assistant Vigneaux.

En cours, et en T.P., y compris les dilettantes, l'effectif devait tourner autour de 15 à 18.

Parmi les dilettantes, outre des non-inscrits comme moi, il y avait des étudiants des années précédentes, qui tenaient absolument à suivre la totalité des cours du Professeur Daguin. Ces enseignements portaient sur 4 ans : primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire, et tectonique.

Pour ceux qui étaient tentés par une carrière de géologue professionnel, particulièrement par l'Ecole des Pétroles, H. Schoeller dirigeait le samedi après-midi des ateliers de préparation, avec des cours de géologie appliquée, voire des éléments d'hydrogéologie, et surtout des séances de cartographie, avec des coupes sériées sur les rares cartes géologiques sur support topographique en courbes de niveau, et je me souviens avec une certaine émotion des coupes sur la feuille de SAXON MORCLES, au 1/30.000, de la carte géologique suisse.

Nos exercices donnaient lieu à, évidemment, corrections et discussions. Pendant ces enseignements, je crois me souvenir que nous étions 6 à 8.

Mais, également, il organisait des ateliers de pratique sur le terrain, soit en envoyant un petit groupe dans les environs de Bordeaux cartographier des points de détail, (je crois me souvenir de Ludon ?), mais encore de huit jours passés sur l'anticlinal de Saint Cyprien, en Dordogne, et l'année suivante à Campagne, toujours sur St Cyprien.

Enfin, à certaines occasions, il dirigeait des stages de terrain, comme à Lescun, dont A.Klingebiel parlera, ou encore, car il était géologue conseil, à Roselend, bien sûr avant l'installation du barrage, où il nous avait trouvé un hébergement dans le cantonnement E.D.F. Là encore c'est par petits groupes que les étudiants étaient en charge des levers. Contact avec la géologie alpine, qu'il connaissait bien (thèse sur les nappes de l'Ubaye et l'Embrunais), je me souviens encore des paysages, du Rocher du Vent et de son empilement doubles de couches liasique.

Le concours d'entrée à l'Ecole des Pétroles, qui à ce moment se passait sur titre (une licence) consistait surtout à un concours sur le terrain. Je me souviens de celui auquel j'ai participé, à Saint-Claude (Jura) où les 24 candidats avaient à lever un morceau précis de carte (le Mont Bayard de mon souvenir, avec une superposition pour le moins anormale de plusieurs Crétacé inférieur), à faire un rapport, à présenter des coupes. Etre admis constituait en quelque sorte la sanction de l'enseignement reçu, et, il faut reconnaître qu'il y avait, dans mon souvenir toujours "carton plein", sauf peut-être en 52, mon année, où un ami bordelais a été classé treizième, et donc refusé. Cependant, comme l'un des reçus a décidé d'entrer dans l'enseignement supérieur, J. Grégoire a été finalement admis!

Les souvenirs remontent, s'examinent à la loupe et se ramassent au marteau!!

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Un très grand merci, Professeur Schæller!

### Jacques Delouvrier

Ingénieur Pétrolier et Hydrogéologue jacques.delouvrier@wanadoo.fr

Vous m'avez aidé à trouver ma « niche » professionnelle. Je l'ai pratiquée toute ma vie, et elle me passionne encore, à l'âge de 77 ans....

Il s'agit, à partir d'outils et d'essais de puits adaptés, d'arriver à déterminer tout l'environnement d'un forage, qu'il soit pour l'eau, le gaz, ou le pétrole.

J'ai découvert la géologie en classe de 4°, comme beaucoup. Mon professeur de Sciences Naturelles nous avait montré, en parcourant les trottoirs de Rochefort-sur-Mer (Charente Maritime), des « macles de Carlsbad », un enlacement majestueux de deux cristaux de feldspath dans le granite qui formaient ces trottoirs. J'ai donc passé des mois, avec mes camarades de classe, à parcourir longuement ces trottoirs. Nous faisions des concours à qui trouverait la plus belle macle...

Ceci m'a amené tout naturellement à compléter une licence de Physique-Chimie à Bordeaux par les certificats de géologie et minéralogie, puis à me présenter au concours d'Ingénieur Géologue de l'Ecole Nationale du Pétrole et des Moteurs, à Rueil-Malmaison (Seine-et-Oise).

Malheureusement, un géologue qui se respecte à l'époque devait savoir écrire et dessiner correctement, et ce n'était pas mon cas ! En outre, pendant l'épreuve « terrain » du concours (autour de Buis-les-Baronnies), j'ai eu une certaine tendance à ne pas « aller voir » les affleurements, et faire tout simplement confiance à la carte géologique...

Ceci m'a été fatal. L'examinateur de l'époque, le professeur Flandrin, n'a pas du tout apprécié le fait que suite à une de ses questions, je lui ai répondu que la barrière de calcaire « si haut placée » était « probablement » de calcaire tithonique, d'après la carte géologique, mais que compte tenu du dénivelé, je n'aurai probablement pas le temps d'« aller voir ». Ma carrière de géologue s'est terminée ce jour-là... J'étais bien entendu été très vexé, surtout que deux de mes amis de faculté avaient réussi le concours. J'ai donc décidé de rentrer dans la même école « par la grande porte », c'est-à-dire comme ingénieur « Forage-Production ».

Il était trop tard pour se présenter à cette option cette année-là, bien entendu. Pour « attendre », j'ai donc décidé de faire un doctorat de troisième cycle d'Hydrogéologie et Géochimie des Eaux Souterraines dans le service du professeur Schœller. Ceci me permettait entre autre de retarder mon service militaire (c'était encore la guerre en Algérie...)! Bien m'en a pris! J'ai adoré cette relation intime entre la géologie, terre d'excellence de l'intuition et de la déduction, et l'hydrogéologie, avec sa rébarbative « Mécanique des Fluides en Milieux Poreux ». Le professeur Schœller arrivait à nous faire « passer » tout cela, tant son discours était simple, et toujours meublé d'anecdotes personnelles sur son expérience « terrain ».

J'y ai rencontré des gens passionnés par leur métier, en particulier Pierre Pouchan, qui est devenu par la suite un ami personnel.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Il a fallu ensuite choisir un sujet de thèse. J'ai eu une première expérience malheureuse, où le professeur Schœller m'a demandé de confirmer par l'expérimentation la théorie qui veut qu'une « batterie » de puits perpendiculaire à l'écoulement d'une nappe peut capter la totalité de l'eau s'écoulant...

Le seul problème est que, compte tenu des moyens financiers du Laboratoire, l'immense caisse qu'il a été nécessaire de construire était en bois, et que l'eau est le bois ne font pas bon ménage...La caisse fuyait à plaisir, et le projet a été rapidement abandonné!

A ce stade, le professeur Schœller avait bien compris que je n'étais, ni un homme de terrain, ni un homme de laboratoire. Il m'a proposé un sujet théorique, mais où il discernait déjà de nombreuses applications pratiques. Il s'agissait de faire une revue de la littérature existante pour « L'étude des limites, de l'anisotropie et de l'hétérogénéité des nappes captives par les courbes d'essais de débit des forages » (titre officiel de ma thèse de troisième cycle). Les débuts ont été difficiles. Mais il est devenu de plus en plus évident, au fur et à mesure de mes lectures, que les essais de débit (et surtout les remontées de pression après débit, qui sont des essais à débit zéro, donc <u>rigoureusement</u> constant) sont des moyens parfaitement adaptés à la connaissance intime des milieux poreux.

La thèse s'est passée sans encombre. Avec l'aide de Pierre Pouchan, que je remercie encore pour sa coopération, j'avais pu trouver quelques exemples « terrains », qui avaient montré, au moins qualitativement, et avec les moyens de mesure de l'époque, que l'on pouvait apprendre énormément d'un essai bien conduit.

C'est probablement grâce à cette aventure dans le domaine de l'hydrogéologie que j'ai été accepté à l'école du Pétrole, option « Forage-Production ». Après, tout s'est enchainé très vite :

- Entrée à Géopétrole en 1961, une société de consulting pétrolier, qui voulait se développer dans le domaine de l'Eau, et qui appréciait en moi ma double appartenance.
- Reprise partielle de Géopétrole par Flopétrol en 1971, revenu ensuite une filiale du groupe Schlumberger.
- Une des spécialités de Flopétrol à l'époque était les essais de puits. A l'époque le programme de ces essais était décidé à l'avance. Les essais se faisaient ensuite en aveugle, c'est-à-dire avec des enregistreurs de fond qu'il n'était possible d'interpréter **qu'une fois l'essai terminé**. On suivait donc le programme préétabli à la lettre, sans savoir si en fin d'essai il y aurait assez (ou trop?) de données sur l'enregistreur de fond pour interpréter!
- C'est à cette époque que s'est développé considérablement l'exploration « offshore », avec le brûlage du pétrole produit pour des raisons de sécurité. Compte tenu du coût élevé de tels forages, les clients ont demandés à disposer de le mesure de pression de fond en surface en temps réel (Système dit « surface read-out »), mais aussi à interpréter en temps réel. L'interprétation des essais est donc passée de la main des foreurs à celle des spécialistes d'interprétation. Ceci a permis d'adapter la programmation (et surtout la durée d'un essai) au comportement du puits essayé.
- A partir de ce moment-là, tout est allé vite, Schlumberger a mis en place au sein de Flopétrol les moyens humains et financiers pour développer en même temps les outils technologiques (le fameux « Surface-read-out ») et les outils d'interprétation. On est donc passé très vite de l'interprétation des essais par la simple formule du mouvement permanent de Dupuis, à l'interprétation en temps réel du mouvement transitoire à l'aide de la courbes de Theis, puis autour de 1983, à l'utilisation de la dérivée de la pression en temps réel, qui permet d'anticiper de façon précise le comportement d'un puits en fonction de son environnement probable, et donc d'adapter la programmation au comportement observé.
- Ce développement des logiciels d'interprétation en temps réel a nécessité des moyens humains très importants, tant au niveau des concepteurs comme Alain Gringarten et Dominique Bourdet (les

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« inventeurs » de la dérivée et de son utilisation en temps réel sur les forages), qu'au niveau de la formation d'ingénieur « terrains », spécialisés dans l'utilisation de ces logiciel.

Ce fut pour moi une époque bénie, où j'ai beaucoup pensé au professeur Schœller, qui m'avait permis de participer à une aventure industrielle aussi exaltante!

Mais ceci n'est pas fini. En 1986, je rentre chez Baker-Hughes, plutôt concepteur d'outils que de logiciels. C'est l'époque du développement d'un département spécialisé dans l'utilisation d'outils à packers gonflables pour la mesure de très faibles perméabilités, utilisés dans le domaine du stockage souterrain des déchets radioactifs. Une nouvelle aventure commence....

- Je réalise ainsi qu'il y a beaucoup à faire dans le domaine de l'hydrogéologie profonde, en utilisant des outils et logiciels du même type que ceux utilisés en pétrole. Ceci fait qu'en 1992, je m'installe comme consultant indépendant dans le domaine de « l'hydrogéologie profonde » (principalement, le stockage souterrain des déchets radioactifs, et les tunnels profonds).
- Il a donc été nécessaire de s'adapter à des nouveaux « challenges ». En effet, dans ces nouveaux domaines, on ne cherchait pas une perméabilité, afin de produire un forage, <u>mais une imperméabilité</u>, afin d'éviter la circulation de l'eau! Ceci afin qu'un déchet radioactif ne puisse pas « s'évader » rapidement d'un milieu souterrain, s'il y avait fuite au niveau d'un stockage. Ceci aussi pour qu'un tunnel en cours de creusement ne rencontre pas des éruptions incontrôlables et surtout imprévues.
- En d'autre termes, il fallait disposer d'outils, de programme d'essais et de logiciels d'interprétation permettant <u>la mesure « d'imperméabilités » de l'ordre de 10<sup>-11</sup> m/s</u>, et parfois inférieures ! A ce stade, les outils classiques ne sont plus adaptés, car le simple fait d'ouvrir ou de fermer une vanne peut engendrer un à coup de pression de plusieurs bars, brouillant totalement la réponse de la formation...
- De même, les essais en débit sont impossibles, car de telles formations ne produisent tout simplement pas. Seul des chocs de pression (appelés « pulse tests ») sont possibles, avec bien entendu la mise au point de logiciels d'interprétation adaptés (en particulier le « Saphir Hydro » de la société Kappa Engineering, grâce au financement partiel de l'ANDRA, Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs).

Un retour vers l'hydrogéologie plutôt innovant, et tout cela, parce que le sujet de thèse que m'avait donné le professeur Schœller m'avait à l'époque ouvert les yeux sur une « niche » qui n'avait pas été que peu explorée... Mais il a fallu les moyens humains et financiers énormes des pétroliers, pour qu'ensuite ces révolutions technologiques puissent être utilisées dans le domaine de l'hydrogéologie.

#### En conclusion, une sacrée partie de ping-pong, entre les pétroliers et les hydrogéologues...

Les hydrogéologues ont « inventé » la formule de Dupuis et les courbes de Theis. Les pétroliers ont permis le développement des essais de puits en « inventant » les outils de mesure en temps réel, la dérivée de la pression, et les logiciels d'interprétation en temps réel.

Les hydrogéologues les ont repris à leur manière en « inventant » des outils à packers gonflables (produit typiquement pétrolier au départ) et des logiciels pour mesures des imperméabilités de l'ordre de 10<sup>-11</sup> m/s...

Et j'ai personnellement eu la chance de vivre tout ce parcours exaltant!

#### Encore une fois, un très grand merci, professeur Schæller...

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Souvenirs, souvenirs

#### **Yves Emsellem**

Watermodel yves.emsellem@watermodel.net

Henri Schoeller était déjà une icône quand je l'ai rencontré en arrivant à Bordeaux en octobre 1964. Il m'a accueilli en quelques minutes, sans façons, dans l'équipe de rêve d'hydrogéologues de l'époque, Pierre Pouchan, Alain Cazal et dans le désordre Moussié, Albinet, Bertrand Sourisseau, Marc Schoeller, Michel Plaud. Le professeur Henri Schoeller avait bien identifié le risque d'invasion par l'eau salée de la grande nappe des Sables Eocènes, risque conduisant à l'extension à la Gironde du décret-loi de 1935 de protection des eaux souterraines. Henri Schoeller, ravi de voir enfin quelqu'un de l'administration s'intéresser aux eaux souterraines me confie aussitôt un cours à ses étudiants. Quelle bonne idée, faire un cours est la meilleure méthode pour découvrir que l'on ne sait rien et qu'il faut se hâter d'apprendre, notamment la pédagogie. Dominique Poitrinal m'a confié, dix ans après « on voyait bien que tu étais un brave type mais on ne comprenait rien à ce que tu nous racontais ».

Ouvert et curieux, bienveillant à l'égard des gamins que nous étions, Henri Schoeller était fier de son travail tout en restant modeste et simple. Il nous insufflait sa confiance dans l'avenir et dans le travail comme me l'avait montré Eugène Berkaloff, un ancien de Tunisie dont Henri Schoeller avait, avec Marcel Gosselin, dressé la carte géologique au 1/50.000ème.

Avec une pareille équipe, rapidement la drainance dans les systèmes aquifères multicouches impose la création d'un monstre, pour l'époque, le modèle d'Aquitaine, 110.000 km², sept couches. Courageusement, soutenue par le Professeur, l'équipe se met au travail, le duo inséparable Pouchan-Cazal et les autres découpent le bassin en blocs, dessinent les coupes NE-SW et transversales et synthétisent la structure du système. Il a fallu ensuite un culot monstre pour fixer les résistivités avant toute invasion salée par géophysique électrique dans le Médoc puis sismique sous l'Atlantique. Et le monstre tourne en moins d'une année.

Cette aventure précipite la création en 1967 du Centre d'Informatique Géologique, dédié aux ressources souterraines, qui prend son essor avec de Marsily, Ledoux, Poitrinal, Hubert, Dreyfus, Besbes, Armisen, Bendhia, Levassor, Lerolle, Delhomme et bien d'autres et non des moindres. Enhardie par ces premiers succès, l'équipe s'engage sur la gestion intégrée des ressources en eau de surface et en eau souterraine à l'échelle d'un grand Bassin, le Bassin d'Aquitaine, sur trois régions et avec neuf équipes de recherche réparties aux quatre coins de la France.

Encore une fois, avec quelques intuitions de Schoeller, Pierre Pouchan imagine la façon de synthétiser à l'échelle régionale les ressources en eau souterraine. La méthode sera reprise lorsque l'ensemble des ressources en eau souterraines et superficielles de la France seront modélisées dans un projet de la Communauté Européenne de 1974 puis lors de la réalisation de la Carte hydrogéologique de l'Europe au 1/500.000ème en 1979 sur 52 feuilles pour la France. Quelle merveilleuse époque où tout était possible. En dix années marquées par la personnalité bienveillante du Professeur Henri Schoeller et le travail de tous, l'hydrogéologie acquiert les lettres de noblesse qui la conduiront à l'Académie.

Et le petit laboratoire d'autrefois, bordé d'un jardin dans lequel un même forage sera interprété et réinterprété par des bataillons d'hydrogéologues en herbe, inspire l'envie des grands espaces, et les Anciens de Bordeaux se retrouvent au hasard des rencontres un peu partout, en Afrique et ailleurs.

Un mot résume ces souvenirs : l'amitié. C'était le ciment de cette équipe Schoeller. « Ils ignoraient que c'était impossible, alors ils l'ont fait ».

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### **Ghislain De Marsily**

Professeur émérite, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6 et École des Mines de Paris Membre de l'Académie des sciences gdemarsily@aol.com

J'ai été une fois à une réunion à Bordeaux sur le modèle, où je représentais Emsellem, qui n'était pas libre ce jourlà. Schoeller n'était pas content de son absence, il m'a dit « je vous donne le droit d'écouter, vous serez les oreilles d'Emsellem, mais vous n'aurez le droit de rien dire! ».

### **Mustapha Besbes**

Professeur émérite, Université de Tunis El Manar mbf.besbes@gnet.tn

A vrai dire, je n'ai pas eu le privilège et la chance de connaître et de fréquenter physiquement et personnellement le Professeur Henri Schoeller, que je connais par contre bien par ses écrits et ses nombreux ouvrages. Jeune géologue exerçant en Tunisie dans les années soixante, j'ai ainsi appris sur le terrain, par mes ainés et par les nombreuses notes rédigées de sa main, que H. Schoeller avait constitué l'un des pères fondateurs de l'hydrogéologie tunisienne, où, membre actif et brillant du service géologique de Tunisie, il fut l'auteur de plusieurs études, rapports et cartes hydrogéologiques qui font partie de notre patrimoine, et, convaincu très tôt de l'importance de l'hydrogéochimie, se distingua en mettant à la disposition des praticiens le diagramme toujours en usage qui porte son nom et celui de son collègue Emile Berkaloff, diagramme qui peut être considéré comme l'un des précurseurs des Modèles hydrogéochimiques modernes.

J'ai par la suite et pour ainsi dire suivi sa trace en France, puisque mon premier grand projet au Centre d'Informatique Géologique, confié en 1972 par Yves Emsellem qui était mon directeur, portait précisément sur l'hydrogéologie de Bordeaux et du Bassin Aquitain, projet par lequel j'ai pu mesurer, à travers les travaux et par la fréquentation des élèves les plus remarquables du Pr Schoeller, dont notamment André Cazal et Pierre Pouchan, l'étendue de l'oeuvre de H.Schoeller à la Faculté des sciences de Bordeaux.

### **Bertrand Sourisseau**

Ancien directeur du BRGM Aquitaine bertrand.sourisseau1@orange.fr

Je pense à plusieurs facettes d'un personnage coquin et amusant.

Les cigares qu'il faisait acheter au Père "Lamote", homme à tout faire du Labo d'Hydro, pour fumer en cachette de son épouse...

Sa découverte en Tunisie du « diagramme Schoeller », où les représentations des éléments des eaux fortement minéralisées ne rentraient pas dans une feuille normale. Il essaie alors une représentation sur une échelle log, et découvre « par hasard » des correspondances des concentrations des valeurs en milli-équivalents.

Le chantier du forage de Prayssas en Lot-et-Garonne, qui devait capter l'Eocène – absent – puis le Crétacé – absent – puis enfin le Jurassique : productif ! Les connaissances d'aujourd'hui ne se sont pas faites en un jour, ni sans disconvenues (leçon pour les jeunes).

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Lors d'une visite à ce chantier avec tous ses étudiants de DEA, nous étions quelques-uns dans sa DS, qu'il conduisait à sa façon! Sur la N113 à l'entrée de Tonneins, pour éviter un agriculteur qui avait coupé la route, nous avions fini en pleins champs et poursuivi la route en nous tassant dans les voitures des étudiants.

C'était la réception des essais de pompage. A la question de Laroussi, étudiant tunisien, très sympa : « cette nappe ne va-t-elle pas s'épuiser ? », il avait répondu toujours coquin : « on n'épuise pas comme ça une jeune mariée ! ». Là aussi les manques de connaissances peuvent tromper même un Grand Maître, car depuis 3 décennies l'aquifère du Jurassique en Lot-et-Garonne subit d'importantes baisses de niveaux.

Au début de mes études à la faculté, en SPCN, j'arrive à la fac de Talence à moto tout mouillé, par un jour de grande pluie. Le temps de me sécher, je rentre en retard dans l'amphi du cours de géologie du Père Schoeller. A la fin du cours, il dit « je vais interroger quelqu'un, rassurez-vous j'ai déjà repéré quelqu'un ! ». Il m'appelle et m'interroge sur la "zone néritique", à l'époque je ne savais même pas ce que cela signifiait, pour moi la honte. Il me demande mon nom ! Alors il dit à tout le monde « je n'ai pas de chance, je tombe sur le fils d'un collègue et en plus il me dit qu'il ne sait rien ! ». Eclats de rires dans l'amphi ! Il décide que désormais je devrais me mettre au premier rang ! Depuis, à chaque examen et jusqu'au jour de la soutenance de ma thèse, il rappelait à tout le monde cet évènement et que, grâce à lui, en me faisant mettre au premier rang, il avait fait de moi un bon élève !

Au delà de ces anecdotes, il m'avait lui-même accompagné sur mon terrain de Thèse, pour rechercher quelques rares affleurements et m'expliquer en leur absence l'intérêt des déductions des observations de la géomorphologie.

Un Grand Homme, auquel je dois beaucoup.

#### Willy Weyns

#### Consultant

#### willy.weyns@willyweyns.be

Peu après mai 68 j'ai choisi le centre d'hydrogéologie à Bordeaux plutôt que Budapest pour me spécialiser, à cause de la renommée mondiale du professeur Henri Schoeller. Dès ma première visite au centre, j'ai été reçu très aimablement par le professeur en personne. Il m'a procuré une bourse d'Université pour la première année, le D.E.A. d'hydrogéologie. J'ai eu le privilège d'avoir encore eu le cours d'hydrochimie dispensé par lui-même. On était quatre non-français dans notre promotion (Pedro Armisen de Padilla, Christoph Von Stempel, mon compatriote E. Marchand et moi-même), et on était tous fascinés par sa très large culture, qui dépassait tellement l'hydrogéologie, déjà si vaste terrain en soi.

J'en garde un ineffable souvenir concrétisé par l'acquisition de son ouvrage « les eaux souterraines » chez Guibert à Paris, un coup de chance !

A part Henri Schoeller je me souviens de Marc Schoeller, Cazal (Maths) et Vouvé (hydrogéologie), qui nous a fait visiter la grotte de Lascaux... Les défenses publiques suivies par les arrosages, - façon à la bordelaise -, des thèses de doctorat. Le travail de terrain pour la thèse dans le Périgord en semaine, en ramenant truites ou aloses à la maison pour le week-end. Des souvenirs inoubliables ! J'en ai gardé une amitié pour la vie avec un hydrogéologue prédécesseur Yves Faugère, et une vie partagée entre mon plat pays et la Haute Provence.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### **CONFERENCES INTRODUCTIVES**

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

## BDLISA : le nouveau référentiel hydrogéologique en France : 10 ans après le colloque de 2002 à Bordeaux

### JJ. Seguin, V. Mardhel, D. Allier, S. Schomburgk, L. Chery, et les hydrogéologues des directions régionales (1)

(1)BRGM, 3 Avenue Claude Guillemin, Orléans d.allier@brgm.fr

BDLISA (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères) est le nouveau référentiel hydrogéologique français. Il propose un découpage du territoire national (territoire métropolitain et départements d'outre-mer, à l'exception de Mayotte) en **entités hydrogéologiques** (formations géologiques aquifères ou non), délimitées à trois niveaux de détail (national, régional et local) suivant des règles élaborées dans le cadre d'une méthodologie nationale.

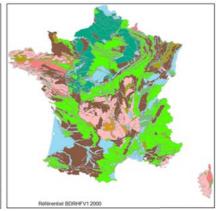
Il est le résultat d'une série de travaux réalisés sur dix ans, en plusieurs étapes et dans le cadre de différentes conventions entre le BRGM, le Ministère en charge de l'Écologie (2006 et 2007), l'ONEMA (2008 à 2012), les six Agences de l'Eau et les Offices de l'Eau. Le BRGM a été chargé de la construction du référentiel et de sa consolidation au niveau national, en application du Schéma national des données sur l'eau (SNDE).

### IV.DES PREMIERES CARTES DES SYSTEMES AQUIFERES VERS UN VERITABLE REFERENTIEL NATIONAL HARMONISE ET PARTAGE PAR TOUS.

Un premier découpage de la France en systèmes aquifères et domaines hydrogéologiques a été effectué par J. Margat de 1976 à 1980. Le document final, une carte détaillée, a été produit à l'échelle 1/1 000 000. Ce document a servi de première ébauche au référentiel BD RHF (Base de Données du Référentiel

Hydrogéologique Français), dont une première version a été publiée en 1996 et une deuxième en 2002.





Au début des années 2000, l'élaboration d'un nouveau référentiel hydrogéologique a été décidée (Ministère en Charge de l'Ecologie, Agences de l'Eau) afin de :

- Remédier à certaines insuffisances du premier référentiel, en particulier : le manque d'homogénéité et l'imprécision de certains découpages d'entités hydrogéologiques, l'absence de hiérarchisation entre les

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

entités et le manque de représentation cartographique des entités non affleurantes (notamment pour les structures multicouches des bassins sédimentaires) ;

- Tenir compte de l'évolution des connaissances géologiques et hydrogéologiques et de l'harmonisation des cartes géologiques au 1/50 000e, qui permet de préciser la délimitation des entités hydrogéologiques dans les zones d'affleurement;
- Permettre l'accès à la dimension verticale pour les entités hydrogéologiques qui se superposent.

La construction du référentiel BDLISA a été menée en plusieurs étapes :

- l'étape préalable de définition d'une approche méthodologique nationale commune [1] (Petit *et al.*, 2003) :
- l'élaboration en 2006-2007 d'un modèle conceptuel commun de gestion des données pour la base de données associée, via la conception d'un outil sous Arcgis© [2] (Seguin et Mardhel, 2013) ;
- la construction du référentiel à l'échelle de chaque région administrative, avec la délimitation des entités hydrogéologiques aux trois niveaux de détail (local, régional, national) ;
- une étape de consolidation par harmonisation, à l'échelle des bassins dans un premier temps, à l'échelle nationale dans un deuxième temps, de l'ensemble des découpages régionaux, avec l'attribution d'une codification nationale des entités et une caractérisation homogène de celles-ci selon une nomenclature définie ;
- la rédaction d'un modèle de données et d'un dictionnaire de données SANDRE accompagnant le référentiel. À terme, un scénario d'échanges sera aussi défini.

#### V. PRESENTATION DU REFERENTIEL BDLISA

#### II. 1 Principales caractéristiques

L'objectif de BDLISA est de mettre à disposition de chaque utilisateur un système d'identification unique des entités hydrogéologiques françaises (entités aquifères mais aussi entités peu ou non aquifères), réalisé selon des règles communes. BDLISA permet de traiter et d'échanger les informations intégrées dans une base de données associée aux couches cartographiques.

L'échelle de travail adoptée pour le découpage des entités est le 1/50 000.

Par rapport au référentiel BDRHFV1, le référentiel BDLISA innove par les concepts qui le sous-tendent et par trois caractéristiques majeures :

- la prise en compte des entités profondes, qui font de BDLISA un référentiel hydrogéologique doté d'une dimension verticale (mais non vraiment tridimensionnel car les épaisseurs ne sont pas prises en compte seul un empilement de couches sans indication de valeur de profondeur est actuellement proposé mais pourraient l'être ultérieurement);
- la délimitation des entités hydrogéologiques, aquifères et non aquifères, à trois périmètres géographiques différents, appelés « niveaux » du référentiel : niveau local, niveau régional et niveau national ;
- l'utilisation d'un « modèle de gestion » (développé sous ArcGis©), qui permet d'assembler toutes les entités de niveau local, de contrôler la cohérence topologique de cet assemblage, de détecter les anomalies, de corriger des artefacts, puis de passer du niveau local au niveau régional et de celui-ci au niveau national.

#### a) La prise en compte des entités profondes

À la différence du référentiel BDRHFV1, les parties non affleurantes des entités sont prises en compte.

Sur la verticale, les entités sont ordonnées suivant un ordre croissant (ordre 1 pour les entités affleurantes, ordre 2 pour les entités situées juste au-dessous...).

En Aquitaine, par exemple, il y a jusqu'à 33 « couches » d'entités sur la verticale. Le numéro d'ordre qui est affecté aux entités permet de suivre la « progression » de chacune d'elles en profondeur et de la localiser en un point dans la « pile » des entités hydrogéologiques.

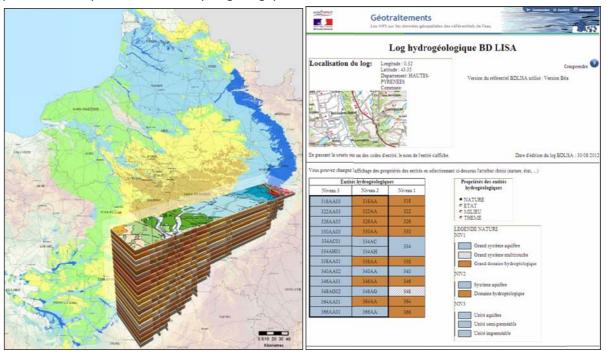


Figure 2 : Accès à la dimension verticale des entités hydrogéologiques qui se superposent - Log hydrogéologique produit par l'interface cartographique du site Géotraitements sur Eau-France

### b) <u>La délimitation des entités hydrogéologiques, aquifères et non aquifères, à trois périmètres</u> géographiques différents, appelés « niveaux » du référentiel.

Trois niveaux d'identification des entités hydrogéologiques sont retenus dans cette nouvelle version du référentiel :

- le niveau national (NV1) fournit une représentation nationale des grands ensembles hydrogéologiques dont il montre la distribution spatiale et l'importance en tant que ressource quantitative. C'est le support d'études d'orientation à l'échelle nationale. La gamme d'échelle d'utilisation cartographique est comprise entre le 1/500 000 et le 1/1 000 000 ;
- le niveau régional (NV2) fournit une représentation régionale ou par bassin des entités hydrogéologiques (échelle de visualisation de l'ordre du 1/250 000). Il permet de caractériser les systèmes aquifères au regard de leur importance en tant que ressource régionale, de leur vulnérabilité (à la sécheresse, aux pollutions) ;
- le niveau local (NV3) correspond à la représentation la plus détaillée du référentiel, à une échelle de l'ordre du 1/50 000. Il identifie l'ensemble des entités connues au sein des deux niveaux précédents. Il

constitue le support d'études ponctuelles permettant d'améliorer les connaissances hydrogéologiques (carte piézométrique, carte de vulnérabilité, modélisation...).

Ces niveaux d'utilisation reflètent les besoins très différents des futurs utilisateurs du référentiel. Ils ne définissent pas les échelles de numérisation (précision du contour) mais correspondent à des échelles d'utilisation et de représentation de l'information.

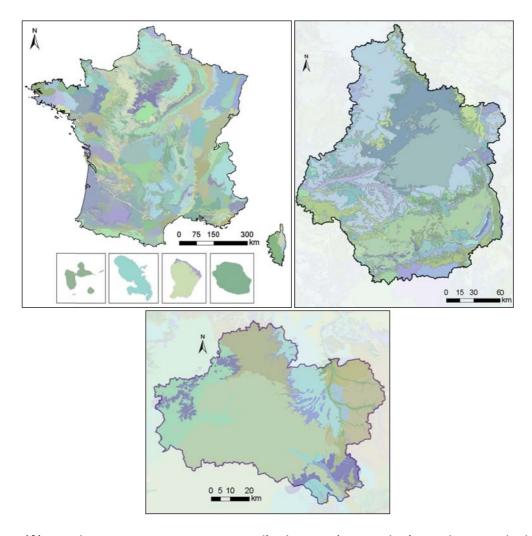


Figure 3- Le référentiel BDLISA et ses trois niveaux d'utilisation (national, régional - exemple de la Région Centre et local-exemple du département du Loiret [3] (Schomburgk et al., 2012) )

Les entités du niveau 1 (comme l'entité 308, représentée figure 4) résultent de l'assemblage de celles du niveau 2 (308AA, 308AC et 308AE, dans l'exemple présenté), ces dernières résultant elles-mêmes d'un regroupement des entités du niveau 3 (cf. figure 4).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

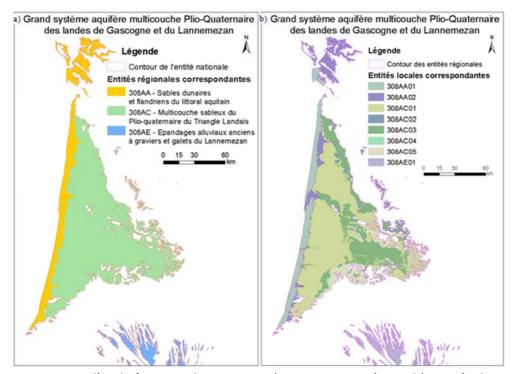


Figure 4 - Principe d'emboîtement des niveaux a) Niveau 1 entité 308, b) Entités de niveau 2

### c) L'utilisation d'un « modèle de gestion »

Le « modèle de gestion du référentiel » a été développé sous ArcGis© et s'appuie sur un modèle conceptuel de données (modèle SANDRE). Ce modèle conceptuel permet d'exploiter de façon optimale la base de données du référentiel sous ArcGis. La construction du référentiel est guidée par les cinq principes suivants :

- Organisation des entités en « Entités principales » et « Entités complémentaires ». Les « Entités principales » font l'objet d'un traitement topologique qui garantit la cohérence de leur assemblage à trois dimensions (3D). Les « Entités complémentaires » regroupent différents types d'entités qui sont telles qu'elles ne permettent pas de respecter l'homogénéité du référentiel ou qui constituent des cas particuliers difficilement intégrables dans le cadre général du référentiel ;
- <u>Ordonnancement vertical des entités en définissant un ordre de superposition.</u> Le modèle de gestion permet de passer d'un ordre dit absolu à un ordre dit relatif ;

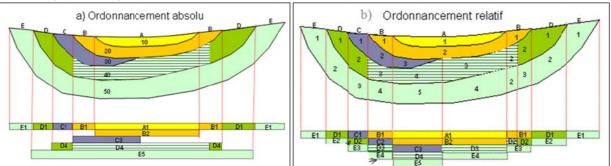


Figure 5 - Passage d'un ordre absolu à un ordre relatif dans la succession verticale

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

- Complétude. L'ensemble du territoire est couvert (complétude topologique) ;
- <u>Filiation</u>: Une entité NV3 est rattachée à une entité NV2 qui l'inclut et qui est elle-même rattachée et incluse dans une entité NV1;
- <u>Héritage</u>: Il découle de la filiation; c'est l'héritage des limites (et des attributs si cela est pertinent) du niveau 3 vers le niveau 2, puis vers le niveau 1.

### II. 2 Les objets du référentiel

Une entité hydrogéologique est une partie de l'espace géologique :

- délimitée à une certaine échelle géographique : le "niveau" (local, régional, national) ;
- rattachée à un type de formation géologique : le "thème"(Alluvial, Sédimentaire, Intensément plissé de montagne, Volcanisme) ;
- définie par ses potentialités aquifères: la "nature" (pour le niveau 1: Grand système Aquifère, Grand Domaine Hydrogéologique ou Grand Système Multicouche, pour le niveau 2: Système Aquifère et Domaine Hydrogéologique; pour le niveau 3: unité aquifère, unité semi-perméable et unité imperméable);
- caractérisée par un type de porosité (qui permet de distinguer les principaux modes de circulation de l'eau): le "milieu" (Poreux, Fissuré, Karstique, et Double porosité par une combinaison entre ces trois types);
- caractérisée par la présence ou non d'une nappe, qui peut être libre et/ou captive : l'"état" (captive, libre, libre et captive, alternativement libre puis captive, semi-captive).

#### VI. LA BDLISA VO

#### III. 1 En quelques chiffres

Au stade actuel de son développement (version 0) le référentiel BDLISA comprend :

- en France métropolitaine :
  - o 1995 entités de niveau local,
  - o 719 entités de niveau régional,
  - o 145 entités de niveau national;
- dans les départements d'outre-mer (hors Mayotte) :
  - o 137 entités de niveau local,
  - o 67 entités de niveau régional,
  - o 5 entités de niveau national.

#### III. 2 Exemple : Les entités sédimentaires de la région Aquitaine

En Adour Garonne, la BDLISA contient 506 entités réparties de la façon suivante : 152 entités de niveau local dans le bassin sédimentaire, 245 dans l'intensément plissé et 109 entités de socle. [4] (Pedron *et al.*, 2010).

De nombreuses sources de données ont été utilisées pour élaborer le découpage des entités sédimentaires de la région Aquitaine : les cartes géologiques vectorisées de la région Aquitaine à 1/50 000 et leurs notices, la cartographie des masses d'eau souterraine, les modèles hydrodynamiques du Sud du bassin Adour-Garonne et le modèle Nord Aquitain, le test de découpage de la BDRHF V2 de 2004, la modélisation du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE, les logs géologiques validés extraits de la BSS, des informations recueillies dans différents rapports d'études et fournies par les géologues régionaux du BRGM Aquitaine.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Après une harmonisation des cartes géologiques de l'Aquitaine à l'échelle du 1/50 000, des regroupements ou des correspondances aux limites entre formations ont été établis selon des critères géologiques et hydrogéologiques.

Puis un tableau multi-échelles récapitulant tous les types d'entités existant dans le secteur et les superposant verticalement suivant un ordre stratigraphique a été élaboré. Ce dernier comprend l'ensemble des formations depuis les alluvions récentes (Quaternaire) jusqu'au Stéphanien (Carbonifère).

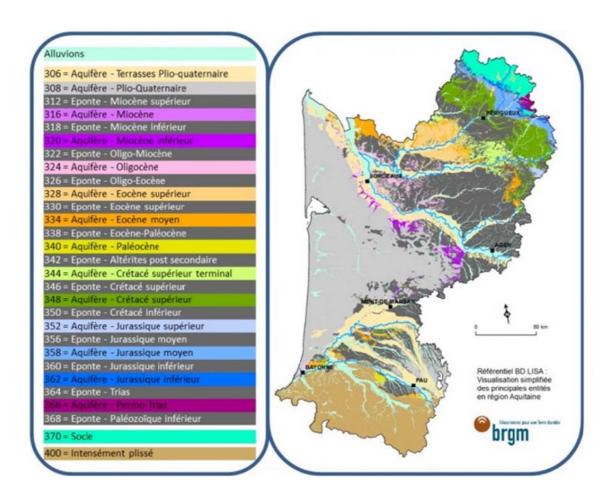


Figure 6 - Tableau multi-échelles simplifié et cartographie des entités de niveau 1 en Aquitaine

#### III. 3 Accès au référentiel

Le référentiel est téléchargeable sur www.sandre.eaufrance.fr. Les polygones sont proposés au format SHP (ArcGis) et format natif TAB ou MIF/MID (MapInfo©). Le téléchargement du référentiel est accompagné d'une notice d'utilisation : la réutilisation du référentiel BDLISA est possible dans les libertés et les conditions prévues par la licence ouverte applicable aux informations publiques.

Les services de consultation sont disponibles sur http://www.reseau.eaufrance.fr/geotraitements/.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### Remerciements:

La construction de BDLISA a été une œuvre collective à laquelle ont contribué :

- le Ministère en charge de l'Écologie, les Agences de l'eau, l'ONEMA et le BRGM pour leur contribution scientifique et financière à ce projet ;
- le BRGM national appuyé par ses directions régionales pour la spécification et la construction du référentiel, en application du Schéma National des Données sur l'Eau (SNDE). Une centaine d' hydrogéologues y ont contribué ;
- la Direction de l'eau et de la biodiversité du Ministère en charge de l'Écologie qui a assuré le secrétariat du comité de pilotage national, en collaboration avec les autres partenaires ;
- le SANDRE qui assure la diffusion de ce référentiel, et qui a piloté le groupe de travail qui a permis l'élaboration du modèle de données et du dictionnaire de données de ce référentiel, en application du SNDE ;
- les DREAL (DRIEE pour l'Île-de-France), les Agences et Offices de l'eau qui ont assuré le suivi de ses travaux et de leur validation et qui participeront également aux mises à jour ;
- les collectivités territoriales, les organismes de recherche, les bureaux d'études, qui ont été associés aux différentes étapes de construction et qui ont également été sollicités pour valider les travaux et/ou contribuer aux étapes de caractérisation des entités.

#### Références bibliographiques :

- [1] Petit V., Hanot F., Pointet T. (2003) Référentiel hydrogéologique BD RHF. Guide méthodologique de découpage des entités. Rapport BRGM RP-52261-FR.
- [2] Seguin J.J., Mardhel V., avec la collaboration de Schomburgk S. (2013) Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA-VO. Présentation du référentiel, principes de construction et mise en œuvre. Rapport final. BRGM/RP-62261-FR. 156 p., 57 ill., 2 ann., 1 DVD.
- [3] Schomburgk S., Lalot E., Maget Ph., Mardhel V., Martin J.C., Robelin C. (2010) Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Bassin Loire-Bretagne Année 3. Délimitation des entités hydrogéologiques de niveau 3 en région Centre. Rapport d'étape. BRGM/RP-58257-FR.
- [4] Pedron N., Platel J.P., Bidzana K., Labarthe B., Loiseau J.B., Lucassou F. avec la collaboration de Mardhel V. (2009) Référentiel Hydrogéologique Français BDRHF-V2. Bassin Adour-Garonne. Années 2 et 3. Délimitation des entités hydrogéologiques en région Aquitaine. Rapport d'étape. BRGM/RP-56949-FR.
- Les références des rapports présentant les découpages régionaux (autres que [3] et [4]) figurent dans le rapport national (référence [2] ci-dessus)

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# BNPE, Banque Nationale des Prélèvements d'Eau un outil fédérateur pour la connaissance des pressions quantitatives sur la ressource en eau

L. Chery<sup>1</sup>, C. Nowak<sup>2</sup>, A. Mauclerc<sup>1</sup>, B. Hypolyte<sup>3</sup>, S. Bareyre<sup>3</sup>, E. Morice<sup>4</sup>

1 BRGM/D3E 3 Av. C. Guillemin I.chery@brgm.fr
2 Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) c.nowak@onema.fr
3 Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG) bernard.hypolite@eau-adour-garonne.fr
4 Direction de l'Eau et de la Biodiversité du ministère en charge de l'Ecologie (MEDDE)
Emmanuel.Morice@developpement-durable.gouv.fr

#### INTRODUCTION

En 2009, 33,4 milliards de m³ d'eau ont été prélevés en France métropolitaine pour satisfaire les activités humaines [1]. La répartition des volumes prélevés est très variable selon les usages. Les volumes prélevés ne sont pas répartis également selon les usages : la production d'électricité en génère près des 2/3, loin devant l'eau potable (17 %), l'industrie (10 %) et l'irrigation (9 %). Les prélèvements se font en majorité dans les eaux de surface, sauf pour l'eau potable (fig.1). Ces 10 dernières années, la tendance des prélèvements pour ces quatre usages est plutôt à la baisse.

Différents outils co-existent pour la gestion des données de prélèvements en eau et possèdent leur propre codification (n° lié à la PAC, n° Industrie, n° Agences, etc.). Des travaux de rapprochement entre bases (recherche des doublons) ont été menés par certaines agences de l'eau et seraient dans l'ensemble satisfaisants pour les intervenants, mais beaucoup moins bons en ce qui concerne le rapprochement des compteurs et des ouvrages de prélèvements et l'identification du type de ressource en eau. Aujourd'hui, il reste difficile de mettre en commun les données prélèvements issues des multiples outils d'un même territoire (ex. outil police de l'eau, outil redevance). La mise en cohérence des données à l'échelle nationale est d'autant plus complexe que la notion d'ouvrage de prélèvement est perçue différemment par les acteurs.

Pour répondre aux exigences de la DCE (actualiser des pressions exercées sur la ressource en eau dans le cadre des Etats des lieux, fonder les prochains SDAGE et les programmes de mesure sur une connaissance homogène des pressions) et permettre à l'État d'exercer son rôle de police de l'eau, l'ONEMA assure la maîtrise d'ouvrage du projet initié en 2009 de création d'une Banque Nationale des Prélèvements (quantitatifs) en Eau: BNPE. Ce projet, qui concerne tous les volumes prélevés sur la ressource en eau et l'ensemble des usages (eau potable, industrie, agriculture, domestique, etc.), est une des actions prioritaires du Schéma National des Données sur l'Eau (SNDE) et l'un des thèmes du projet « suivi des pressions et des impacts ».

#### I. OBJECTIFS DU PROJET

Les banques de données du Système d'Information sur l'Eau (SIE) sont mises en place sous la responsabilité de l'ONEMA (SNDE chapitre 9). Cette responsabilité porte sur l'expression des besoins, ainsi que sur l'organisation et la supervision de la mise en œuvre des banques de données et du déploiement des outils associés.

Le projet BNPE concerne l'ensemble des prélèvements en eau, sur les eaux de surface continentales, les eaux souterraines et les eaux de transition.

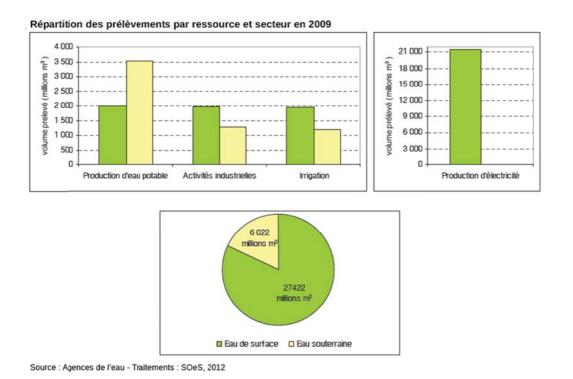


Figure 1 – Répartition des prélèvements par ressource et secteur en 2009 (SOeS, 2012)

Il comprend la création d'une base de données « prélèvements », un portail pour les producteurs, un portail public de diffusion des données, des outils d'administration associés et un outil métier pour les services de police de l'eau (développé par le CERIT), outil OASIS (fig.2). Le CERIT, Centre d'Etude et de Réalisation Informatiques de Toulouse, rattaché au MAAP (Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche), développe et administre LANCEL'EAU pour le compte du MEDDE (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie).

Les développements et l'hébergement de la banque et des portails sont confiés au BRGM.

Le groupe projet, piloté conjointement par la direction de l'eau et de la biodiversité, l'agence de l'eau Adour-Garonne et l'ONEMA, s'est attaché dès 2010 à recenser les besoins, à définir le cadrage du projet et à rédiger le dictionnaire de données associé. Le développement des outils est en cours depuis 2011. Outre les pilotes, il est composé : de représentants du Ministère en charge de l'agriculture, de la Direction Générale de la Prévention des

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Risques (DGPR) du ministère en charge de l'Ecologie, d'agences de l'eau (Adour-Garonne et Rhône-Méditerranée & Corse), de DREAL (région Centre), de services de police de l'eau (DDT32, DDT65, DDT82 et DDT86), du secrétariat technique du Sandre (Secrétariat d'Administration National des Données et Référentiels sur l'Eau), du BRGM, d'un représentant des chambres d'agriculture.

L'objectif de la banque est double, d'une part constituer un outil de collecte, de validation et de conservation des données, accessible à un large ensemble de partenaires, et d'autre part fournir un cadre de référence pour rationaliser et mutualiser les développements réalisés ou en cours concernant les prélèvements en eau. La finalité recherchée est que la donnée de la banque devienne la valeur unique en matière de volume prélevé par un intervenant donné, en un point donné, à une période donnée, et qu'elle soit mise à disposition de tout à chacun, associée à des données de contexte (producteur de données, niveau de validation, etc...).

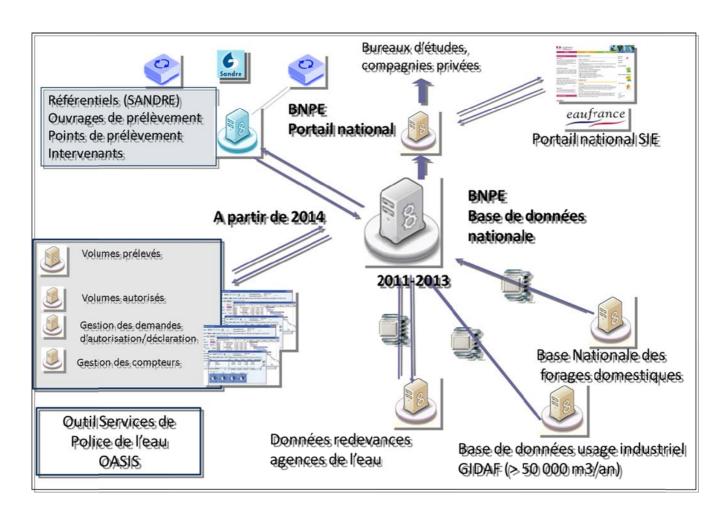


Fig.2 : Schéma conceptuel de la Banque Nationale des Prélèvements en Eau

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### II. UN LANGAGE COMMUN NECESSAIRE: DEFINITIONS SANDRE ASSOCIEES A LA NOTION DE PRELEVEMENT EN EAU

Il n'existe pas d'outils à l'échelle nationale permettant la gestion des données prélèvements en eau pour l'ensemble des usages de l'eau.

Aujourd'hui, il reste difficile de mettre en commun les données prélèvements issues des multiples outils d'un même territoire (ex. outil DDT <> outil redevance).

La mise en cohérence des données à l'échelle nationale est d'autant plus complexe que la notion d'ouvrage de prélèvement est perçue différemment par les acteurs (et par conséquent considérée de manière différente dans l'organisation de la donnée des dispositifs de collecte existants).

Il est donc nécessaire de définir un langage commun. Le périmètre des données inclut l'ensemble des points suivants :

- Identification des différents interlocuteurs exerçant une fonction particulière dans le domaine de la gestion des prélèvements d'eau,
- Description générale des différents ouvrages de prélèvement,
- Identification et nature des ressources en eau prélevées (cours d'eau, plans d'eau, eaux côtières et de transition, systèmes aquifères,...),
- Connexion physique entre les ouvrages de prélèvement, les ressources en eau et les masses d'eau au sens DCE,
- Transfert d'eau entre différentes ressources,
- Description des modalités techniques d'évaluation et de mesure des prélèvements d'eau
- Description des volumes d'eau prélevés,
- Les différents usages des prélèvements d'eau.

Le groupe projet s'est attaché en 2010 à recenser les besoins, à définir le cadrage du projet et à rédiger le dictionnaire de données normalisées au format Sandre, <a href="www.sandre.eaufrance.fr">www.sandre.eaufrance.fr</a> [2] et [3]. Ces documents sont disponibles sur le site du Sandre :

http://sandre.eaufrance.fr/ftp/documents/fr/ddd/prl/2/sandre dictionnaire PRL 2.pdf et http://sandre.eaufrance.fr/ftp/documents/fr/ddd/prl/2/sandre presentation PRL 2.pdf.

Un ouvrage de prélèvement, selon le dictionnaire Sandre, désigne un ensemble de dispositifs techniques de captage, de stockage et de canalisation d'eau, provenant d'une ressource et à destination d'un usage principal. Un ouvrage de prélèvement est connecté à une seule ressource en eau, par l'intermédiaire d'un ou plusieurs points de prélèvement géographiquement individualisés, lorsque ces derniers sont connus et bien identifiés.

Un point de prélèvement matérialise un point de connexion physique entre la ressource en eau et un dispositif technique de captage d'eau se rapportant à l'ouvrage de prélèvement en question. Par définition, un point de prélèvement est donc rattaché à un seul et unique ouvrage de prélèvement, ceci pour une période donnée.

Un point de restitution d'eau matérialise un point de connexion physique, géographiquement individualisé sur une seule ressource en eau, où de l'eau est restituée au milieu (...). Un point de restitution d'eau n'est possible que si ce point est lié à un prélèvement d'eau.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Un ouvrage de prélèvement est placé sous la propriété **d'un seul et unique intervenant maître d'ouvrage** durant une période couverte par les dates de début et de fin de prise de fonction.

Une ressource en eau désigne, selon le dictionnaire Sandre, sous un terme générique, une source potentielle d'approvisionnement en eau permettant de satisfaire des besoins en eau liés à certaines activités humaines, par l'intermédiaire d'actions de prélèvements réalisés à partir d'ouvrages de prélèvement(...). En tenant compte des concepts ayant été définis jusqu'ici dans le cadre de la mise en place du Système d'Information sur l'Eau (SIE), une ressource en eau peut correspondre à l'un des concepts suivants :

- un cours d'eau (cours d'eau naturel ou aménagé, un bras naturel ou aménagé, un canal,...),
- un plan d'eau,
- une entité hydrogéologique,
- une eau de transition (eau littorale).

#### III. CALENDRIER DE MISE EN PLACE DE LA BANQUE

La mise en place de la banque a démarré dès 2010, avec cinq étapes majeures.

1ère étape: Analyse de l'existant et recensement des besoins – réalisation premier semestre 2010. Un questionnaire d'enquête a été envoyé par la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère en charge de l'Ecologie aux différents producteurs de données mais aussi aux utilisateurs potentiels. L'enquête avait le double objectif de faire l'état des lieux des solutions de bancarisation des prélèvements en eau, et de préciser les besoins et attentes vis-à-vis de la future banque « prélèvements ». En parallèle, des visites ont été menées et une enquête auprès des agences a été lancée par l'ONEMA.

**2**ème étape : Rédaction du dictionnaire de données – réalisation premier semestre 2010. Publication en avril 2011 des dictionnaires de données.(<a href="http://sandre.eaufrance.fr/ftp/documents/fr/ddd/prl/2/sandre\_dictionnaire\_PRL\_2.pdf">http://sandre.eaufrance.fr/ftp/documents/fr/ddd/prl/2/sandre\_dictionnaire\_PRL\_2.pdf</a>)

**3**ème étape : Ecriture des spécifications fonctionnelles générales (<a href="http://www.reseau.eaufrance.fr/ressource/sfg-bnpe-0">http://www.reseau.eaufrance.fr/ressource/sfg-bnpe-0</a>) et détaillées du portail producteur et de la plateforme de service (<a href="http://www.reseau.eaufrance.fr/ressource/sfd-validees-portail-producteurs-bnpe">http://www.reseau.eaufrance.fr/ressource/sfd-validees-portail-producteurs-bnpe</a>) – réalisation au second semestre 2010.

**4**ème étape : Développement de la banque – réalisation de 2011 à aujourd'hui. Tests de dimensionnement de l'initialisation des différents référentiels (ouvrages de prélèvements, interlocuteurs,...) L'année 2011 a été mise à profit pour la réalisation d'un portail producteur incluant un site destiné aux producteurs et une plateforme exposant 4 jeux de services Web : accès et alimentation sur les concepts dits référentiels (ouvrages et points de prélèvement, points de restitution, intervenants) et banque (volumes, index de compteur...).

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

En cours d'année, une étape a dû être ajoutée, à savoir, la réalisation d'un outil pour aider à l'initialisation des référentiels (outil visuel et cartographique), ouvert depuis début juillet 2011. Pensé comme une énième rubrique (accessible profil de portail producteur sous un compte spécifique), (http://www.reseau.eaufrance.fr/ressource/film-demonstration-outil-initialisation-referentiels-bnpe) est désormais considéré comme élément constitutif du portail. Le portail producteur est en ligne, avec un accès authentifié sur l'annuaire commun du SIE. Il répond aux besoins d'outils d'aide à l'initialisation des référentiels, aux fonctionnalités de recherche, d'accès et d'export des données prélèvement, ainsi qu'à ses missions de plateforme de services Web d'échange, conformément aux spécifications détaillées dont il avait fait l'objet. La base de données sur laquelle il s'appuie renferme à la fois des éléments référentiels (ouvrages et points issus des phases d'initialisation sur les départements tests) et des données prélèvements à titre de test.

**5**<sup>ème</sup> **étape** : Mise en production de la banque – en cours

L'ouverture d'un portail public est prévue pour 2014.

#### IV. DIFFUSION DES DONNEES : FUTUR PORTAIL PUBLIC

Les aspects diffusion des données au sein de la BNPE s'articulent selon deux phases définies dans le projet :

1- En attente de la mise en place des référentiels nationaux et du développement des outils associés, une première phase d'alimentation de la banque avec les données redevances des agences et des offices de l'eau dans les départements d'Outre-Mer a été actée par le comité stratégique du 17/03/2011 (confirmée par le groupe planification du 20/01/2012), de manière à répondre en priorité à l'exigence DCE. Cette étape transitoire permettra notamment de consolider et de centraliser les données brutes utilisées dans le cadre de l'actualisation des états des lieux (EDL) en vue du rapportage européen, d'homogénéiser les méthodes de calcul d'indicateurs et de faciliter leur diffusion auprès des organismes en charge de l'EDL. Il s'agit d'une phase porteuse pour le projet, notamment pour introduire la BNPE auprès des acteurs du SIE. Elle doit être aboutie mi 2013.

La phase de collecte de ces données via la BNPE selon un formalisme défini est encadrée par un document SANDRE validé par un groupe d'expert national. Ce document a une portée nationale et contribue à répondre à un objectif d'échange des données au format simplifié entre les différents acteurs impliqués dans le suivi quantitatif des ressources en eau. Les organismes institutionnels impliqués dans les travaux de la révision de l'EDL (DEB, ONEMA, Agences et Offices de l'eau, opérateurs techniques des outils de la Banque, etc.) pourront consulter (en lecture seule) les données via un « portail producteurs » où ils s'identifient par un compte et un mot de passe ; leur profil, géré par un module d'habilitations, détermine les fonctions et les données qui leurs sont accessibles. Dans le cadre de cette phase, il n'est pas prévu de diffuser les données à travers un portail public.

**2- En phase de gestion courante** (2014-2015), la banque consolidera les données collectées par différents organismes et outils (ex. les outils redevances des agences, GIDAF pour le volet industriel, les données issues de l'outil OASIS pour les services en charge de la police de l'eau et autres).

Pour les producteurs de données (services de police de l'eau, DREALS, Agences et Offices de l'eau) et autres acteurs du projet (CNE, CNP, DEB, ONEMA, opérateurs des outils BNPE, experts mandatés du SIE), la diffusion des données s'effectuera via le portail « producteurs ».

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

#### recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

La diffusion des données vers le grand public se fera via une interface internet qui doit être créée dans le cadre du projet banque BNPE et qui fera partie des interfaces de la toile <a href="www.eaufrance.fr">www.eaufrance.fr</a>. Les fonctions de l'interface publique seront définies dans un document spécifique qui doit être rédigé au cours de l'année 2013 en concertation avec le groupe projet BNPE.

#### Le portail « producteurs de données » offre les fonctionnalités suivantes (figures 3, 4 et 5) :

- Mise à disposition d'actualités, d'informations générales, d'aides... visant à tenir les visiteurs informés des évolutions ou diffusion de données.
- Rubrique documentaire mettant à disposition des documents standards visant à faciliter la compréhension des notions manipulées par la banque.
- Accès aux données: par tout critère susceptible d'intéresser un producteur (usage, géographie, intervenant...), cet accès devra permettre d'afficher les prélèvements ainsi que les données référentielles qui leur sont associées. Des synthèses seront également proposées au travers de cet accès.
- Export de données: accessible directement ou suite à un accès, cet export permet de demander selon de nombreux critères (critères d'accès ainsi que liste d'identifiants) les descriptifs (référentiels) et les données banque sous différents formats en usage dans la thématique. Des exports prédéfinis (car communs à de nombreux producteurs) seront proposés.
- Visualisation cartographique: cet affichage cartographique permettra de superposer les données prélèvements (ici plutôt les données référentielles) aux référentiels externes (ressources, administratif...), et ce, potentiellement selon plusieurs thèmes (par usage, par évolution en volume...). Il sera possible, depuis cette partie, d'exporter un lot défini d'ouvrages.
- Services ad hoc : en fonction des besoins remontés, le portail hébergera un ensemble de services ad hoc ; parmi ces services : accès aux différents rapportages, résultats de traitements lourds effectués sur la banque (rapprochement avec d'autres référentiels...)
- Par ailleurs, le portail « producteurs » remplira également le rôle d'initialisation des référentiels, en proposant une rubrique complète consacrée aux outils d'aide à la construction.

A noter que contrairement au portail public, ce portail devra diffuser les référentiels et données banque « à chaud », c'est-à-dire dans l'état qu'ils auront à l'instant de la consultation (ceci afin d'éviter toute incompréhension entre un accès au portail et un accès à un outil de production, chez un producteur accédant aux deux).

Bien que les spécifications fonctionnelles du **portail « grand public »** doivent encore faire l'objet de discussions avec le groupe projet (courant 2013), on peut néanmoins dire qu'il offrira les fonctionnalités assez proches de celles du portail « producteurs » avec les adaptations suivantes :

- Actualités, documentation et communication (cette rubrique devra illustrer tous les concepts manipulés, expliquer tous les enjeux et s'enrichir de glossaires, cinématiques, FAQ...),
- Accès aux données (l'utilisation de courbes, cartes... sera privilégiée),
- Exports possibles de données (format ASCII et PDF),
- Visualisation cartographique (outils cartographiques simples avec affichage des informations au travers de services web réutilisables dans d'autres portails du SIE ou d'autres organismes),

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

- Renvoi vers une demande d'inscription pour accéder au portail « producteurs de données », avec des restrictions concernant des données confidentielles (obligations CNIL).



Fig.3: Page d'accueil du site BNPE « Producteurs de données »



Fig.4 : Portail producteurs de données : exemple de fiche d'ouvrage de prélèvement

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

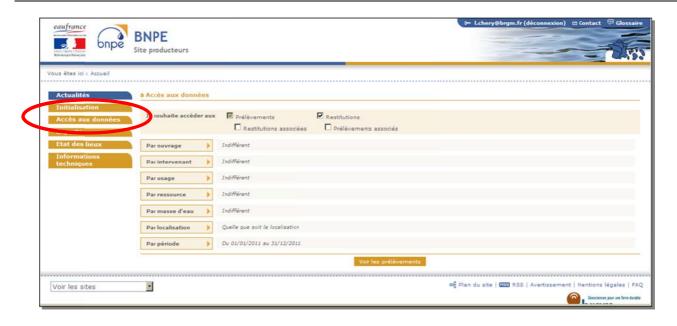


Fig.5 : Portail de producteurs de données : exemple de requêtes pour l'accès aux données

### Références bibliographiques :

- [1] SOeS, 2012 Les prélèvements d'eau en France en 2009 et leurs évolutions depuis dix ans. Collection Chiffres et statistiques, N°290, février 2012
- [2] SANDRE 2011 Dictionnaire des données Prélèvements des ressources en eau. Thème : Suivi quantitatif des ressources en eau. Version 2.
- [3] SANDRE 2011 Présentation des données Prélèvements des ressources en eau. Thème : Suivi quantitatif des ressources en eau. Version 2.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Dix-neuvièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

## SESSION 1 VARIATIONS CLIMATIQUES PASSEES, ACTUELLES ET FUTURES. IMPACTS SUR LA RECHARGE DES AQUIFERES

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

# Modélisation hydrodynamique de surstockage en nappe semi-profonde dans le cadre des mesures d'adaptation au changement climatique

P. Verjus<sup>(1)</sup>, P.Viennot<sup>(2)</sup>, L. Abasq<sup>(2)</sup>, N. Gallois<sup>(2)</sup>

(1) DRIEE d'Ile-de-France (2) MINES ParisTech/Armines

 $philippe.verjus@developpement-durable.gouv.fr\\pascal.viennot@mines-paristech.frlena.abasq@mines-paristech.frnicolas.gallois@mines-paristech.fr$ 

#### I. INTRODUCTION

Les récentes études effectuées sur le bassin de la Seine concernant l'impact du changement climatique (projet RExHySS<sup>[1]</sup> – impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme – initié par le MEEDDM<sup>[2]</sup>) et complétées par les résultats du projet « Explore 2070 »<sup>[3]</sup> également initié par le MEEDDM, ont globalement montré :

- > une baisse importante et significative des précipitations estivales, et à un degré moindre mais significatif, des précipitations hivernales,
- > une hausse sensible de l'évapotranspiration potentielle (+16 % en moyenne à l'horizon 2050, +23 % à l'horizon 2100),
- > une réponse régionale du changement climatique déjà très marquée dès les années 2050,
- des conditions climatiques qui diminuent sensiblement la recharge des formations aquifères (20 % en milieu de siècle et près de 30 % en fin de siècle). Quantitativement, à l'échelle du bassin de la Seine, le déficit d'alimentation des formations aquifères représente environ le double de ce qui y est prélevé en nappe à ce jour,
- > une baisse des niveaux piézométriques de l'ensemble des formations aquifères du bassin et, en conséguence directe, une diminution du débit de base des cours d'eau,
- > des débits de rivières en baisse, en moyenne annuelle et en toute saison (basses et hautes eaux).

Dans le cadre des mesures d'adaptation au changement climatique, ces résultats relativement alarmistes, poussent à étudier, en toute première approche, la faisabilité de solutions de limitation de ces impacts à moyen et long terme sur la ressource en eau souterraine.

Pour cela, un modèle mathématique du fonctionnement hydrodynamique des formations tertiaires du bassin parisien (dit « *modèle tertiaire* ») développé via le logiciel MODCOU<sup>[4],[5]</sup> a été utilisé pour réaliser des tests hydrodynamiques préliminaires de surstockage en nappe semi-profonde.

#### II. PRESENTATION SOMMAIRE DU DOMAINE MODELISE

L'extension du modèle s'appuie principalement sur des limites naturelles ou hydrauliques. Le modèle est circonscrit par les limites d'affleurement du Tertiaire, des fleuves ou rivières comme la Seine ou l'Eure et des limites piézométriques (cf. Figure ). La surface couverte est de 23 152 km². D'une résolution à la maille variant entre 250 m et 1 km, le modèle comprend 99 725 mailles de surface, 18 218 mailles « rivière » et 261 687 mailles souterraines.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Le domaine souterrain compte 17 couches dont 7 semi-perméables, permettant de mieux prendre en compte la compartimentation des aquifères. La structure du modèle est conforme à celle présentée dans la Figure et dans le Tableau 1.

Miocène	Burdigalien	Ensemble détritique de Sologne
	Aquitanien	Marnes de Blamont
		Calcaires de Pithiviers
Oligocène	Stampien	Molasse du Gâtinais
		Calcaires d'Etampes
		Sables de Fontainebleau et Calcaires de Brie
	Sannoisien	Marnes Vertes et Supragypseuses
Eocène	Bartonien Sup.	Calcaires de Champigny
		Marnes Infragypseuses et à Pholadomya
	Bartonien Inf.	Calcaires de Saint-Ouen
		et Sables de l'Auversien
	Lutétien -	Marnes et Caillasses du Lutétien
		Calcaires du Lutétien
	Yprésien	Argiles de Laon
		Sables du Cuisien
		Argiles du Sparnacien
Paléocène	Thanétien	Thanétien
Crétacé		Craie (Nord-Ouest)

Tableau 1- Formations géologiques semi-perméables (en italique) et aquifères modélisées

La Craie du Crétacé supérieur n'est modélisée que sur la partie nord-ouest du bassin mais les échanges entre le Tertiaire et la Craie ont préalablement été calculés sur une version du modèle d'extension plus grande<sup>[4]</sup> et sont imposées au mur des formations modélisées les plus profondes.

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

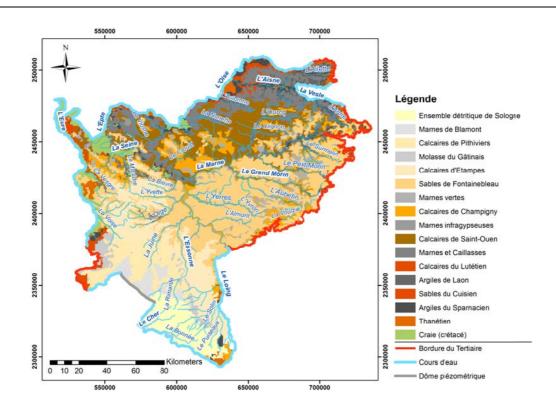


Figure 1 - Structure, extension et limites du domaine modélisé

#### **III. OBJECTIFS**

L'objectif est d'évaluer la pertinence ou non de ce type de stockage dont le but principal est d'assurer le maintien des niveaux piézométriques à des niveaux suffisants pour maintenir ou renforcer la productivité de captages existants (ou à créer) et/ou pour soutenir les débits d'étiage.

Trois sites ont été investigués. Ceux-ci ont été choisis dans des secteurs comprenant des formations tertiaires relativement profondes, formant, autant que faire se peut, des cuvettes, et étant le moins possible connectées directement avec les cours d'eau. Le drainage par ces derniers est le problème principal pouvant limiter un surstockage significatif d'eau dans les nappes. Dans les conditions des sites choisis, le drainage ne peut s'effectuer que via une drainance préalable depuis l'aquifère sollicité vers les aquifères supérieurs, eux-mêmes, directement drainés par les cours d'eau.

Les zones testées sont matérialisées sur la Figure 2. Elles sont implantées chacune sur un domaine hydrogéologique tertiaire caractéristique du bassin parisien.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

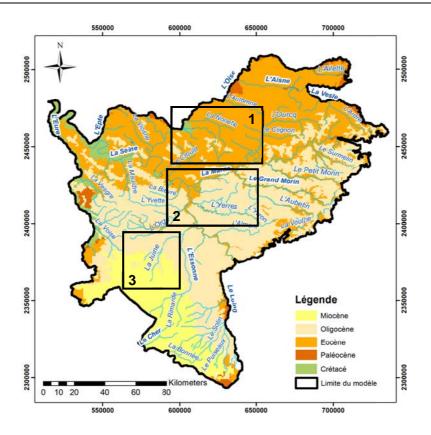


Figure 2 : Localisation des trois zones d'étude

- > zone « Nord-Marne » (1), injection dans les Sables du Cuisien,
- > zone « Brie » (2), injection dans les Calcaires du Lutétien,
- > zone « Beauce » (3), injection dans les Sables du Cuisien.

Pour chaque zone, des simulations comprenant 20 cycles d'injection (toujours en période de hautes eaux) sont réalisées, et ce, pour différents couples débit-durée, de façon à tester la sensibilité à ces deux paramètres :

- ➤ simulations de sensibilité au débit injecté (4 mois 15, 30, 50, 80 L/s),
- y simulations de sensibilité à la durée d'injection (50 L/s − 2 mois (décembre à janvier), 4 mois (décembre à mars), 6 mois (octobre à mars)),
- > simulations avec arrêt d'injection (sur la base des deux simulations aux volumes totaux injectés les plus élevés (i.e. 80 L/s 4 mois et 50 L/s 6 mois, pour une succession de 10 cycles d'injection).

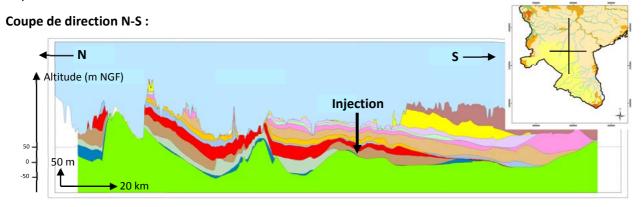
#### Les types de résultats obtenus sont les suivants :

- > des chroniques temporelles d'augmentations des débits induits par l'injection à (ou aux) exutoires,
- > des comparaisons des volumes injectés et drainés en rivière en fonction du temps (exprimés graphiquement en m³ puis en pourcentage du volume total injecté à chaque phase de calcul),
- les gains piézométriques aux piézomètres présents sur la zone étudiée ainsi qu'à des piézomètres « fictifs » implantés dans la couche d'injection, (à noter que dans les couches profondes concernées, il n'y a pratiquement aucun suivi piézométrique. Celui-ci sera à développer en cas de poursuite expérimentale ou réelle des tests),

des cartes d'extension latérale du panache d'injection pour différents temps d'observation, aux niveaux de la couche injectée et des aquifères sus et sous-jacents.

#### **IV.RESULTATS**

En raison du volume nécessairement limité du présent article, il n'est pas possible de décrire chaque zone de test dans le détail. Celle où le surstockage présenterait le meilleur rendement est la zone « Beauce » où l'injection a lieu dans les Sables du Cuisien (cf. Figure 3). Pour la même raison, seuls les résultats des suivis des débits dans les cours d'eau (cf. Figure ) et l'extension latérale de diffusion de l'eau dans la couche d'injection (cf. Figure ) seront ici présentés.



#### Coupe de direction E-W:

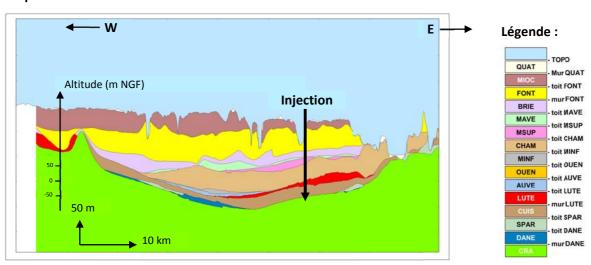


Figure 3 : Configuration géologique simplifiée du site d'injection « zone Beauce »

Sur la Figure ci-après, la zone d'injection est matérialisée par l'encadré gris. Les stations de suivi sont au nombre de 8 et sont réparties autour de la zone d'injection. La station n°8 constitue l'exutoire global de la zone étudiée. L'analyse des courbes de volumes injectés et drainés par les cours d'eau suivant les différents régimes testés et l'expression en rapport de ces grandeurs montrent que les couples de valeurs choisis ne sont pas déterminants dans le comportement de l'hydrosystème. En terme de rendement (évalué via le ratio volume drainé/volume injecté), les résultats obtenus sont quasiment identiques (cf. Figure ).

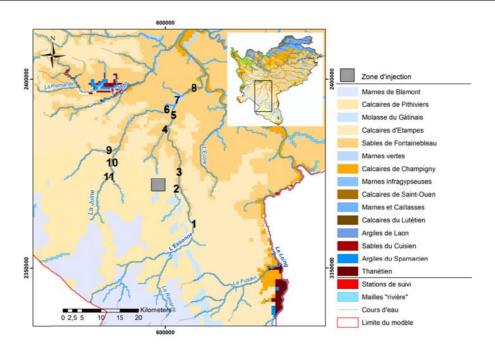


Figure 4 : Localisation du secteur d'injection et des points de suivis en rivière

La Figure , ci-dessous, montre le comportement typique du drainage par les rivières pour cette zone (le débit représenté, dit *différentiel*, représente l'augmentation de débit à l'exutoire). L'injection se traduit donc, en surface, par une fuite. Cependant, après 10 cycles d'injection puis arrêt, il apparaît que le drainage se poursuit pendant 3 ans puis décroît, mais l'augmentation résultante de débit reste sensible 10 ans après l'arrêt de l'injection.

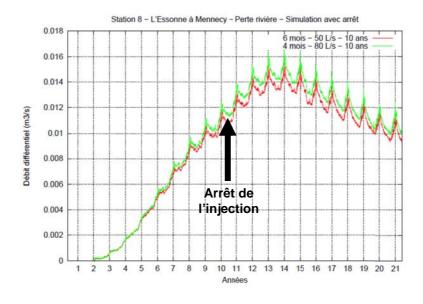


Figure 5 : Evolution du surcroît de drainage à l'exutoire de l'hydrosystème en fonction du temps  $^{[6]}$ 

Comme précédemment évoqué, les résultats les plus intéressants concernent le rendement de l'hydrosystème (cf.figure 6). Celui-ci décroît avec la durée de l'injection. Cependant pour ce secteur, le ratio volume drainé/volume injecté, complément du « rendement », semble intéressant (20% à 10 ans, 40% à 20 ans).

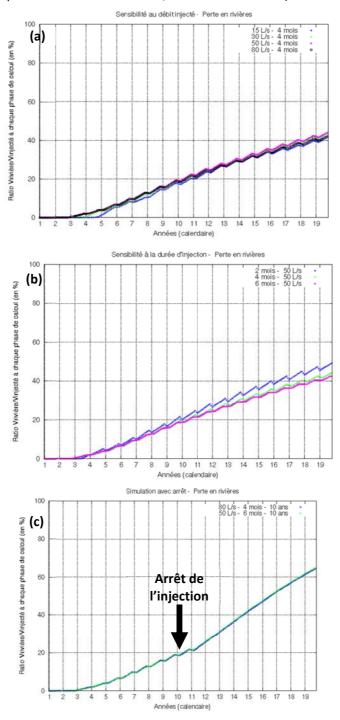


Figure 6 : Ratio volume drainé total/volume injecté (à l'exutoire de la zone Beauce) pour les trois types de simulations (sensibilité au débit (a), à la période d'injection (b) et simulations avec arrêt (c)) [6]

Ce ratio est plus important pour les 2 autres sites testés :

- > 50% et 75% pour le site « Nord Marne »,
- > 40% et 60% pour le site « Brie ».

Les configurations géologiques de ces sites sont pourtant comparables en termes de confinement des couches injectées. La différence tient à l'éloignement plus grand des cours d'eau pour la zone « Beauce ». Rappelons encore que le drainage vers les cours d'eau, quelles que soient les zones, ne s'effectue qu'après drainance au travers des couches semi-perméables sus-jacentes aux couches injectées.

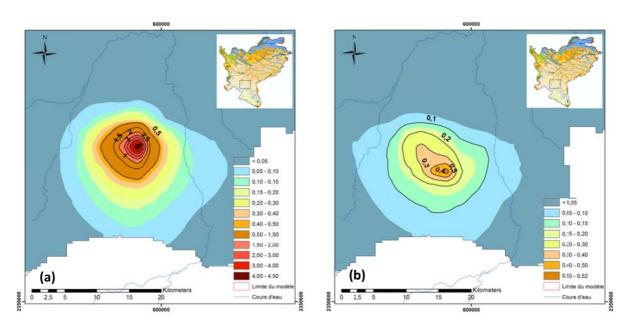


Figure 7 : Gains piézométriques résiduels (en mètres) dans la couche d'injection (Sables du Cuisien) dans la configuration : 10 cycles annuels de 80 L/s pendant 4 mois (a) 1 an après l'arrêt de l'injection - (b) 10 ans après l'arrêt de l'injection <sup>[6]</sup>

#### V. CONCLUSION

Il reste au jour de la rédaction du présent article à réaliser :

- des simulations de remobilisation de l'eau injectée afin de calculer un rendement « effectif » du système,
- des simulations à l'horizon 2050 ou 2100 pour tester l'effet des différences d'état de l'hydrosystème en situation de changement climatique (nappe plus basse, conditions de drainage modifiées).

Il relèvera ensuite du calcul financier de valider ou non la pertinence du surstockage-reprise, dans différents contextes économiques (coût de mobilisation de la ressource en eau par cette voix en fonction de sa rareté). Au stade de la présente étude, seul le réalisme hydraulique a été vérifié (prélèvement de l'eau en rivière en saison de hautes eaux à des débits tout à fait compatibles avec le ressource, débits de réinjection). Il est bien évident que d'autres aspects de ce dispositif devraient être étudiés (aspect qualitatif en particulier). Le cas échéant, des expérimentations en grandeur réelle, avec en particulier un suivi piézométrique dense serait intéressant à mener.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### Références bibliographiques :

- [1] DUCHARNE A., HABETS F., DEQUE M., EVAUX L., HACHOUR A., LEPAILLIER A., LEPELLETIER T., MARTIN E., OUDIN L., PAGE C., RIBSTEIN P., SAUQUET E., THIERY D., TERRAY L., VIENNOT P., BOE J., BOURQUI M., CRESPI O., GASCOIN S., RIEU J., 2009 Projet RExHySS Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme
- [2] Ministère de l'écologie et du développement durable, 2011 Plan national d'adaptation au changement climatique
- [3] VIENNOT P., HABETS F., 2012 Explore 2070 Eau et Changement Climatique Rapport final : le bassin de la Seine
- [4] VIENNOT P., 2009 Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine Représentation différentiée des aquifères du Tertiaire Intégration des prélèvements anthropiques
- [5] VIENNOT P., ABASQ L., VERJUS P., 2012 Modélisation numérique des aquifères tertiaires d'Ile de France Interdépendances des bassins versants de la Beauce
- [6] GALLOIS N., VIENNOT P., ABASQ L., VERJUS P., 2013 Modélisation hydrodynamique de surstockage en nappe semi-profonde dans le cadre des mesures d'adaptation au changement climatique.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Caractérisation de la paléorecharge des aquifères du nord du Bassin aquitain par l'utilisation de traceurs isotopiques et des gaz rares

M. Saltel, <sup>(1)</sup>, M. Franceschi<sup>(2)</sup>, B. Lavielle<sup>(3)</sup>, B. Thomas<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> BRGM 3 Avenue Claude Guillemin 45100 Orléans

(2) ENSEGID EA Géoressources et Environnement (1 allée F. DAGUIN - 33607 Pessac)

(3) CENBG, CNRS UMR 5797 (Le Haut Vigneau BP 120 F-33175 GRADIGNAN Cedex)

m.saltel@brgm.fr; franceschi@ipb.fr; lavielle@cenbg.in2p3.fr; thomasb@cenbg.in2p3.fr

#### I. INTRODUCTION

Le régime d'écoulement actuel des eaux souterraines est l'héritage de la paléorecharge influencée par des conditions climatiques antérieures. La paléo-hydrogéologie permet de comprendre les phénomènes tant hydrauliques que géochimiques actuels (Schoeller 1971). Ainsi les travaux et synthèse récentes en Europe (Edmunds et Milne 2001) ont montrés que les conditions paléo-climatiques passées ont fortement influencé la recharge des grands systèmes aquifères notamment lors des périodes de glaciations et lors de la phase de réchauffement qui a suivi.

Les systèmes aquifères profonds constituent une ressource en eau stratégique dont les réserves sont souvent importantes. Le renouvellement de ces eaux s'effectue à une échelle de temps très importante comme en témoigne les temps de résidence mesurés.

Les traceurs isotopiques usuels ont été employés pour déterminer le temps de résidence des eaux (<sup>14</sup>C), et pour mettre en évidence l'origine paléoclimatique de la recharge (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H). L'utilisation des mesures de gaz rares (He, Ne, Ar, Xe, Kr) doit permettre d'estimer les températures d'infiltration des eaux à l'origine et donc d'obtenir des informations sur la paléoclimatologie du bassin nord-aquitain et sur le mode d'alimentation de ce système multicouche comme cela avait été le cas dans le sud du Bassin aquitain (Blavoux et al. 1993).

L'objectif de ces travaux est d'acquérir de nouvelles données dans des secteurs peu ou pas étudiés avec ces outils. L'interprétation de ces résultats couplée aux mesures existantes permet d'avoir une vision d'ensemble, aquifère par aquifère, des temps de résidence, des processus d'échanges entre nappes (drainance) ainsi que des éléments de compréhension sur l'alimentation du multicouche Nord Aquitain.

Au total 36 nouveaux points ont été prélevés dans les nappes du Miocène, de l'Oligocène, de l'Éocène, du Campanien, du Cénomanien et du Jurassique. Les cations et anions majeurs, et éléments traces, les isotopes stables de l'eau (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H) et les isotopes du carbone (<sup>14</sup>C et <sup>13</sup>C) ont été analysés sur la totalité des échantillons. Les mesures de gaz rares sont en cours et porteront sur un total de 25 échantillons.

#### II.CONTEXTE HYDROGEOLOGQIE

#### II. 1 Hydrogéologie

Le Bassin aquitain, situé dans le sud-ouest de la France est largement ouvert sur l'océan Atlantique. Il peut être divisé en trois zones distinctes : le Bassin Nord aquitain qui nous intéresse particulièrement, une zone méridionale situé au Sud de la flexure Celtaquitaine et une zone centrale qui intègre à l'ouest le Bassin de Parentis. Le Bassin Nord aquitain est caractérisé par une faible subsidence. Il est encadré par deux structures majeures résultant des déformations pyrénéennes du Paléogène : l'anticlinal de Jonzac de direction NW-SE et celui de Villagrains Landiras

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

de direction WNW-ESE (Gély et Sztrakos 2000). A l'intérieur de ce domaine, les formations plus ou moins perméables du Mésozoïque et du Cénozoïque ont constitué au cours des temps géologiques un vaste système aquifère multicouche (Figure 1).

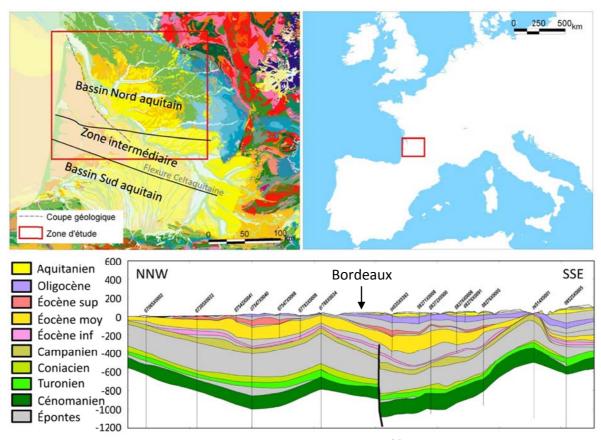


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Les différents aquifères de ce système sont d'extensions et de puissances inégales et peuvent être subdivisées en deux groupes :

- Les aquifères du Crétacé supérieur, principalement composé de calcaires fissurés. Sont distinguées du plus profond au plus superficiel: Le Cénomanien, le Turonien, le Coniacien et le Campanien. A noter que par endroit, certains de ces aquifères sont en communication du fait de la disparition locale des épontes. C'est notamment le cas sous la ville de Bordeaux où les formations du Cénomanien, du Turonien et du Coniacien forment un seul et même réservoir qui se compose dans sa partie inférieure d'un complexe détritique constitué de grés et de sables moyens à grossiers recouvert dans sa partie supérieure d'une série carbonatée composé d'une alternance de calcaires gréseux et argileux, de calcaires bioclastiques localement dolomitisés et de dolomie (Pédron et al. 2008).Le mur imperméable de cet ensemble est formé par les assises marno-calcaires du Jurassique tandis que le toit semi-perméable à imperméable est constitué par les calcaires crayeux du Coniacien et du Santonien et les calcaires marneux du Campanien. L'aquifère karstique sommital du Crétacé supérieur est formé par les calcaires bioclastiques et crayeux du Campano-Maastrichtien. Il présente une porosité matricielle moyenne compensée par une forte porosité de fissure.
- Les aquifères du Cénozoïque sont au nombre de 7 : L'Éocène inférieur, l'Éocène moyen, l'Éocène supérieur, l'Oligocène, l'Aquitanien, le Langhien-Serravallien et le Plio-Quaternaire. Les aquifères de L'Éocène

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

(inférieur, moyen et supérieur) sont composés de plusieurs horizons dont les propriétés hydrauliques varient verticalement et latéralement en fonction de l'agencement des terrains calcaires et sableux (Moussié 1972). Les formations de l'Éocène sont caractérisées par des variations latérales de faciès particulièrement fréquentes au sein des unités hydrogéologiques. Ces réservoirs sont caractérisés par des dépôts marins transgressifs à l'ouest tandis que les régions orientales sont le siège de dépôts continentaux et fluviatiles. Le toit de cet aquifère coïncide avec les faciès continentaux du Sanoisien qui viennent former l'éponte basale des grès et calcaires stampiens sus-jacents correspondant à l'aquifère de l'Oligocène. La nappe de l'Oligocène est captive exceptée sur une bande d'environ 5 km en rive gauche de la Garonne où elle affleure et devient libre. Une sédimentation régressive plus marneuse vient séparer cet aquifère de celui du Miocène constitué d'horizons carbonatés plus gréseux, localement très fossilifère. La nappe libre du Plio-Quaternaire vient surplomber l'ensemble de ce multicouche.

#### II. 2 Paléoclimatologie

Dans les systèmes aquifères profonds, le renouvellement des eaux s'effectue à une échelle de temps très importante. L'étude du paléoclimat permet d'identifier les grandes périodes climatiques ainsi que leur impact sur la recharge des aquifères.

Depuis 50 000 ans B.P. (Before Present), des changements climatiques majeurs se sont produits impliquant des variations significatives des conditions de recharge. Différentes études ont permis de mettre en évidence la succession des principaux événements climatiques en confrontant les résultats obtenus avec plusieurs méthodes (Bradley 1999) comme : la dendrochronologie, l'évolution de la végétation à l'échelle régionale; l'évolution du rapport <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O dans les glaciers, les sédiments et certains fossiles.

Les études plus locales ont permis d'affiner les connaissances sur l'évolution du climat en Aquitaine au Pléistocène supérieur (Laville et al. 1983).

La période de 60 000 à 29 000 ans B.P. (stade isotopique 3) est relativement complexe mais permet néanmoins d'identifier la présence de trois épisodes alternativement tempéré, frais et tempéré. Jusqu'à 34 000 ans B.P., le climat peut être considéré, d'après le taux de boisement et les espèces végétales rencontrés, comme tempéré et humide. Les conditions climatiques se détériorent ensuite jusqu'à environ 29 000 ans B.P. où les observations témoignent d'une augmentation importante de la pluviosité.

Le stade isotopique 2 qui suit témoigne de conditions climatiques excessivement rigoureuses (période caractérisé par de très fortes valeurs du rapport <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O des Foraminifères). Le littoral médocain se situait à -120 m vers 20 000 ans B.P. On observe alors une remise en mouvement des sables dunaires. Le développement des calottes glaciaires atteint son maximum, recouvrant une grande partie de l'Europe du nord soit la totalité de la Scandinavie, les deux-tiers de l'Angleterre, le nord de l'Allemagne et de la Pologne (Ehlers et al. 2007). C'est aussi à cette période que le pergélisol a atteint son extension la plus grande. Le pergélisol agit d'un point de vue hydrogéologique comme un imperméable qui empêche et redirige les écoulements souterrains (Vidstrand 2003). A l'échelle du Bassin aquitain, la nature continue ou discontinue du pergélisol fait débat. Les études plus locales tendraient à prouver qu'un pergélisol continue a pu se mettre en place dans le Médoc et la région bordelaise (Texier 1996). Cependant, il n'a probablement existé que pendant quelques siècles et doit être associé aux événements les plus froids du stade isotopique 2 (Bertran et Fabre 2005).

A partir de 18 000 ans B.P., la transition climatique vers l'interglaciaire actuel s'amorce. Le phénomène n'est cependant pas continu et se caractérise notamment par une déglaciation plus intense entre 15 500 ans et 13 500 ans B.P. (Figure 2).

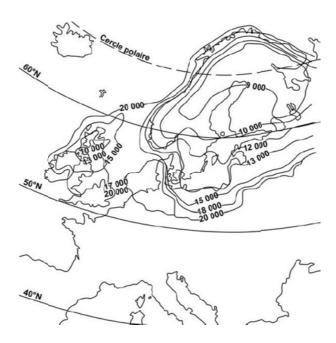


Figure 2 : Les étapes de la déglaciation après le Dernier Maximum Glaciaire (Labeyrie 2006)

#### **III. METHODES**

Les traceurs isotopiques usuels ont été employés pour déterminer le temps de résidence des eaux (<sup>14</sup>C), et pour mettre en évidence l'origine paléo-climatique de la recharge (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H). L'utilisation des mesures de gaz rares (He, Ne, Ar, Xe, Kr) doit permettre d'estimer les températures d'infiltration des eaux à l'origine et donc d'obtenir des informations sur la paléoclimatologie du Bassin Nord aquitain et sur le mode d'alimentation de ce système multicouche comme cela avait été le cas dans le sud du Bassin aquitain (Blavoux et al. 1993).

Un total de 36 nouveaux points ont été prélevés dans les nappes de l'Aquitanien, de l'Oligocène, de l'Éocène, du Campanien, du Cénomanien et du Jurassique. Les cations et anions majeurs, et éléments traces, les isotopes stables de l'eau (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H) et les isotopes du carbone (<sup>14</sup>C et <sup>13</sup>C) ont été analysés sur la totalité des échantillons. Les mesures de gaz rares ont été réalisées sur un total de 25 échantillons.

Les analyses sur les isotopes du carbone (<sup>14</sup>C et <sup>13</sup>C) ont été effectuées au laboratoire de chimie isotopique EIL (Environmental Isotope Laboratory) à l'Université de Waterloo au Canada. Les valeurs obtenues ont permis de calculer les temps de résidence. Le principe de base est de retrouver la valeur initiale en <sup>14</sup>C au moment de l'infiltration. Pour se faire, plusieurs modèles, plus ou moins complexes, peuvent être utilisés ((Tamers 1967); (Pearson et Hanshaw 1970); (Mook, Bommerson, et Staverman 1974); (Fontes et Garnier 1979)).

Les valeurs en oxygène 18 et deutérium ont été mesurées à l'ENSEGID par spectrométrie Laser. Un spectromètre DLT-100 (Los Gatos Research) a été utilisé en respectant le schéma analytique recommandé par l'AIEA, ((Aggarwal et al. 2009) ; (Penna et al. 2010)). La qualité de l'analyse a été contrôlée en admettant un écart type maximum de 2 pour D et 3 pour 180.

Les mesures de gaz rares sont réalisées par le CENBG (Centre Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan). Les prélèvements d'eau de l'ordre de 28 à 29 cm³, sont effectués à l'aide de tubes en cuivre de 8 mm de diamètre. Ils sont connectés à la sortie du forage et refermés par deux pinces d'écrasement en acier. L'extraction des gaz de l'eau est réalisée au laboratoire dans un ballon de détente de 500 cm³, lui-même connecté à la ligne de purification et d'analyse des gaz d'un spectromètre de masse. Le gaz est extrait par agitation du ballon et transféré dans un volume connexe à l'aide d'un capillaire pour limiter la quantité d'eau. L'hélium et le néon sont séparés des autres gaz rares à l'aide d'un charbon actif porté à la température de l'azote liquide qui retient les phase gazeuses condensables. Ils sont ensuite purifiés par exposition à des pièges physico-chimiques constitués de poudres de Ti entre 250°C et 750°C). La purification de l'argon, le kryton et le xénon est également effectuée à l'aide de poudre de Ti mais l'eau condensée est éliminée dans un premier temps par passage sur des zéolithes à température ambiante.

Les concentrations absolues sont déterminées pour tous les gaz rares (He, Ne, Ar, Kr, Xe) par spectrométrie de masse par la méthode de dilution isotopique à l'aide de gaz rares étalons spécialement préparés pour ce type d'analyse.

#### **IV. RESULTATS ET DISCUSSION**

Les isotopes stables de l'eau mesurés dans le cadre de cette étude sont venus enrichir les données de la littérature ((Hosteins 1982); (Bonnery, Peyrol, et Sourisseau 1994); (Platel et al. 1999)(Chery et Gadalia 2001, 32); (Franceschi 2005); (Saltel 2008); (Malcuit 2012)) soit un total de 138 mesures. Les valeurs s'alignent de façon générale sur la droite des eaux météoriques mondiales (Figure 3).

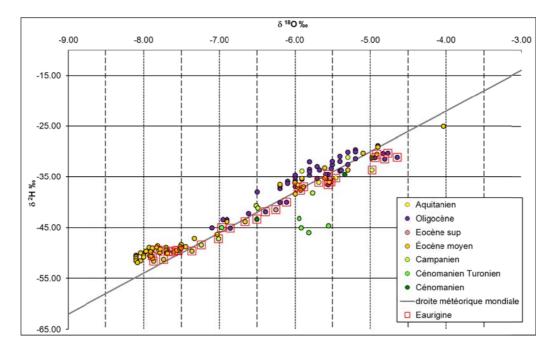


Figure 3 : Variation des compositions isotopiques en <sup>18</sup>O et <sup>2</sup>H des eaux du complexe aquifère nord aquitain

#### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

« Les eaux souterraines : nydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Les teneurs en  $\delta D$  et  $\delta^{18} O$  varient respectivement de -48.0 % à -25.0 % et de -8.2 % à -4.0 %.

Les teneurs les plus appauvries se rencontrent dans les eaux issues de l'aquifère Eocène, avec un enrichissement en deutérium par rapport à la droite météorique mondiale. Les teneurs les plus enrichies correspondent aux aquifères les plus superficielles, influencés par une recharge actuelle.

L'étude de la distribution des valeurs des activités <sup>14</sup>C mesurées lors de notre étude ainsi que celles issues de la littérature ((Chery 1993); (Chery, Dusseau, et Sourisseau 1994); (Schnebelen et al. 2002); (Franceschi 2005); (Saltel 2008)). Au total, 84 mesures des isotopes de carbone ont pu être recensées. La combinaison des âges calculés à partir des différents modèles décrit précédemment permet d'obtenir une cartographie assez homogène de la distribution des temps de résidence pour les différents aquifères du système multicouche nord aquitain.

De cette première analyse, il ressort de façon assez surprenante que le schéma général selon lequel les eaux des réservoirs les plus profonds sont les plus anciennes (Toth 1995) est contredit par des mesures traduisant un rajeunissement local des eaux. Ces incohérences peuvent trouver une explication en intégrant les aspects structuraux (anticlinal de Villagrains-Landiras, failles de Bordeaux, faille de la Leyre,...). Ainsi, les zones qui subissent des contraintes tectoniques peuvent, au même titre que les zones d'affleurement, être des zones de recharges.

Le croisement des compositions isotopiques en <sup>18</sup>O et des âges calculés à partir des mesures en <sup>14</sup>C (figure 4A) permet de retracer l'évolution de ce paramètre au cours de temps et de la comparer aux variations enregistrées dans la carotte de glace GRIP au Groenland (Johnsen et al. 2001). Même si le nombre de mesures ne permet pas de restituer l'ensemble des variations, il existe une certaine cohérence dans l'évolution des teneurs en <sup>18</sup>O.

En première approche, les températures moyennes annuelles calculées à partir des teneurs en <sup>18</sup>O et <sup>2</sup>H selon la formule de Dansgaard modifié (Douez 2007) en tenant compte des données de paléotempératures issues des mesures de gaz rares effectuées en Aquitaine ((Blavoux et al. 1993); (Chery et al. 1999)) donnent des valeurs comprises entre 13.8 °C et 6.5 °C (figure 4B). La valeur de 7°C calculé pour 19 200 ans B.P. correspond au dernier maximum glaciaire. Les températures issues des nouvelles mesures de gaz rares permettront d'obtenir des résultats centrés sur la zone d'intérêt et ainsi d'interpréter plus finement l'évolution de ce paramètre au cours du temps.

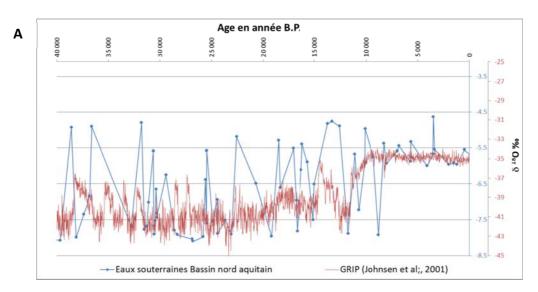


Figure 4A - Corrélations entre les teneurs en  $\delta^{18}$ O du GNIP et les mesures effectuées dans les eaux du bassin nord aquitain

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

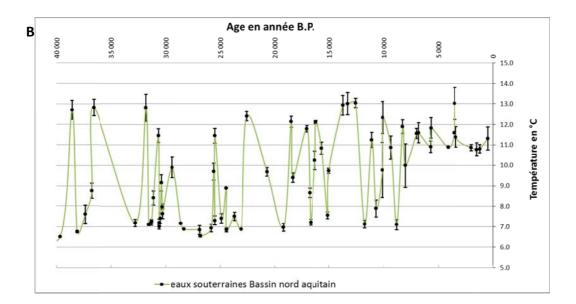


Figure 4B – Évolution de la température déduite des valeurs de  $\delta^2$ H et  $\delta^{48}$ O et des gaz rares des aquifères sud aquitain

Les temps de résidence calculés par différents modèles en tenant compte de la géochimie des eaux, s'échelonnent de 30 000 BP à l'actuel.

Contrairement à certaines études effectuées en Europe (Darling 2004), la distribution des âges calculés ne montre pas de lacune nette dans la recharge autour de la période 20 000 – 21 000 qui correspondrait au dernier maximum glaciaire dans la région. Ces conclusions sont en accord avec les observations faites dans le nord de l'Aquitaine (Bertran et Fabre 2005).

#### VII. CONCLUSIONS

Ce projet s'inscrit dans la continuité des projets Opures-Aquitard (Cabaret 2011) et CARISMEAU 2 (Malcuit 2012). Il correspond à un partenariat entre laboratoires universitaires, représentés par l'ENSEGID et le CENBG, et le BRGM d'autre part financé avec le soutien du Conseil Général de Gironde et de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Ce projet a permis de mutualiser les compétences techniques et les moyens d'analyses pour améliorer la connaissance des systèmes aquifères du nord du Bassin aquitain.

Les premiers résultats montrent des temps de résidence élevés pour les eaux les plus appauvries en<sup>18</sup>O et <sup>2</sup>H. L'absence de recharge lors du dernier Maximum Glaciaire a été mis en évidence par de nombreux auteurs (Edmunds et Milne 2001) mais dans des régions de l'Europe du Nord (Darling 2004), ici cette absence de recharge n'est pas clairement identifiée. Ce point doit être confirmé par une réinterprétation des données antérieures et l'acquisition de nouvelles données.

Les mesures de gaz rares et de paléotempératures actuellement en cours de réalisation amèneront des informations complémentaires pour confirmer et/ou infirmer ces premiers résultats.

Dans le contexte actuel de gestion raisonnée des prélèvements, l'apport des données isotopiques est un élément pertinent pour contraindre les modèles numériques de gestion, en imposant un cadre de fonctionnement

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

conceptuel au fonctionnement chimique et hydrodynamique tel que restitué par les approches de modélisation classiques. Les informations apportées par ce projet permettront de mieux contraindre les modèles numériques et notamment le Modèle Nord Aquitain (MONA) élaboré par le BRGM (Thiéry et al. 2011) pour servir d'outils de gestion et d'aide à la décision pour définir au mieux les stratégies d'exploitation des ressources souterraines de la région.

#### Références bibliographiques :

- [1] H. Schoeller, « Paléohydrogéologie de la partie septentrionale du bassin d'Aquitaine. Etablissement d'une série de cycles hydrogéologiques, avec stages d'essorage et d'infiltration pendant les ères secondaire et tertiaire », Bull. Soc. Geol. Fr., vol. 1, p. 47-49, 1971.
- [2] W. M. Edmunds et C. J. Milne, Paleowaters in Coastal Europe : evolution of groundwater since the late Pleistocene. Edmunds and Milne Ed., 2001.
- [3] B. Blavoux, M. Dray, A. Fehri, P. Olive, M. Groning, C. Sonntag, J. P. Hauquin, G. Pelissier, et P. Pouchan, « Paleoclimatic and hydrodynamic approach to the Aquitaine basin deep aquifer (France) by means of environmental isotopes and noble gases », Proc Appl. Isot. Tech. Stud. Curr. Environ. Chang. Hydrosphere Atmosphere, vol. IAEA-SM-329/60, p. 293-305, 1993.
- [4] J. P. Gély et K. Sztrakos, « L'évolution paléogéographique et géodynamique du Bassin aquitain au Paléogène : enregistrement et datation de la tectonique pyrénéenne », Géologie Fr., vol. 2, p. 31-57, 2000.
- [5] N. Pédron, J. P. Platel, B. Bourgine, et J. B. Loiseau, « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes Année 4 Module 4 BRGM/RP-56614-FR, 99 p., 49 fig., 6 ann », BRGM, 2008.
- [6] B. Moussié, « Le système aquifère de l'Éocène moyen et supérieur du bassin nord aquitain Influence du cadre géologique sur les modalités de circulation », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 73p, 1972.
- [7] R. S. Bradley, Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary. Harcourt Academic Press, New York, 1999.
- [8] H. Laville, J. L. Turon, J. P. Texier, J. P. Raynal, F. Delpech, M. M. Paquereau, F. Prat, et A. Debenath, « Histoire paléoclimatique de l'Aquitaine et du Golfe du Gascogne au Pleistocene superieur depuis le dernier interglaciare. », Bull. Inst. Geol. Bassin Aquitaine, vol. 34, p. 219-241, 1983.
- [9] J. Ehlers, V. Astakhov, P. L. Gibbard, J. Mangerud, et J. I. Svendsen, « GLACIATIONS | Late Pleistocene Glaciations in Europe », in Encyclopedia of Quaternary Science, Editor-in-Chief: Scott A. Elias, Éd. Oxford: Elsevier, 2007, p. 1085-1095.
- [10] P. Vidstrand, « Surface and subsurface conditions in permafrost areas a literature review », Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2003.
- [11] J. P. Texier, « Présence d'un réseau de grands polygones au Sud de l'estuaire de la Gironde (France) : Interprétation et implications paléoclimatiques », Geogr. Phys. Quat., vol. 50 (1), p. 103-108, 1996.
- [12] P. Bertran et R. Fabre, « Pleistocene cryostructures and landslide at Petit-Bost (southwestern France, 45°N) », Geomorphology, vol. 71, no 3-4, p. 344–356, nov. 2005.
- [13] J. Labeyrie, « Paléoclimats et mécanismes climatiques », Clim.-Cult.-Soc. Aux Temps Préhistoriques Apparit. Hominidés Jusquau Néolothique, vol. 5, no 1-2, p. 27-34, 2006.
- [14] M. A. Tamers, « Radiocarobon ages of groundwater in a arid zone unconfined aquifer », Isot. Tech. Hydrol. Cycle Am. Geophys. Union, vol. 11, p. 143-152, 1967.
- [15] F.-J. Pearson et B.-B. Hanshaw, « Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating », Isot. Hydrol. 1970 Iaea Symp., vol. 129, Mars 1970, Vienne, p. 271-286, 1970.
- [16] W. G. Mook, J. C. Bommerson, et W. H. Staverman, « Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide », Earth Planet. Sci., vol. 22, p. 169-l 76., 1974.
- [17] J.-C. Fontes et J.-M. Garnier, « Determination of the initial 14C activity of total dissolved carbon : a review of existing models and a new approach », Water Resour. Res., vol. 15, p. 399-413, 1979.
- [18] P. Aggarwal, L. Araguas-Araguas, M. Gröning, K. Kulkami, T. Kuritas, B. Newman, et A. Tanweer, Laser spectroscopic analysis of liquid water samples for stable hydrogen and oxygen isotopes, AIEA Doc. 2009.

#### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

#### recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

- [19] D. Penna, B. Stenni, M. \vSanda, S. Wrede, T. A. Bogaard, A. Gobbi, M. Borga, B. M. C. Fischer, M. Bonazza, et Z. Chárová, « On the reproducibility and repeatability of laser absorption spectroscopy measurements for  $\delta$ 2\$H and  $\delta$ 18\$O isotopic analysis », Hydrol. Earth Syst. Sci., vol. 14, no 8, p. 1551–1566, 2010.
- [20] L. Hosteins, « Étude hydrogéologique du réservoir oligocène en Aquitaine occidentale Gestion et conservation de la ressource de cette nappe dans la région de Bordeaux », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 164p, 1982.
- [21] H. Bonnery, L. Peyrol, et B. Sourisseau, « Étude du potentiel aquacole des nappes d'eau souterraines salées de la pointe de Grave en Gironde Projet EG-11.Compte rendu de l'année 3 BRGM/RR-38074-FR », BRGM, 1994.
- [22] J. P. Platel, B. Mauroux, H. Bonnery, B. Sourisseau, J. J. Seguin, L. Chery, S. Benhammoudas, et P. Dufour, « Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 3. Opération sectorielle Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène Réalisation d'un piézomètre complémentaire Mise en place du réseau d'alerte et protocole d'actions BRGM/RR-40729-FR », BRGM, 1999.
- [23] L. Chery et A. Gadalia, « Aide à la définition du périmètre de protection de la source de Fontbanne à Budos (33) Interprétation des résultats d'analyses chimiques et isotopiques Note technique EAU/GRI N° 2001/32 », BRGM, 2001.
- [24] M. Franceschi, « Analyses isotopiques Forages de reconnaissances médocains », Institut EGID, 2005.
- [25] M. Saltel, « Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds Fonctionnement hydrogéologique des antiformes du sud de Bordeaux », Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne Bordeaux 3, 268p., 2008.
- [26] E. Malcuit, « Origine de la minéralisation des eaux dans un aquifère multicouche profond Exemple de la "zone minéralisée de l'Entre-Deux-Mers" (Bassin aquitain, France) », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 3, 316 p., 2012.
- [27] L. Chery, « Interprétation des résultats des analyses isotopiques. Etudes de la salinité verticale de l'Éocène moyen dans la zone Bordelaise (Gironde) BRGM/RR-37732-FR », BRGM, 1993.
- [28] L. Chery, P. Dusseau, et B. Sourisseau, « Diagnostic de l'accroissement de la salinité des nappes profondes de l'Éocène moyen en Gironde Programmes de la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB) et du Fond National de Développent de l'Assainissement et de l'Eau (FNDAE) BRGM/RR-37998-FR », BRGM, 1994.
- [29] N. Schnebelen, J. P. Platel, Y. M. Le Nindre, D. Baudry, A. Hoarau, P. Dufour, et S. Benhammouda, « Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 5. Opération sectorielle Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions BRGM/RP-51178-FR, 75 p., 32 fig. », BRGM, 2002.
- [30] J. Toth, « Hydraulic continuity in large sedimentary basins », Hydrogeol. J., vol. 3 (4), p. pp.4-16, 1995.
- [31] S. J. Johnsen, D. Dahl-Jensen, N. Gundestrup, J. P. Steffensen, H. B. Clausen, H. Miller, V. Masson-Delmotte, A. E. Sveinbjörnsdottir, et J. White, « Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP », J. Quat. Sci., vol. 16, no 4, p. 299–307, 2001.
- [32] O. Douez, « Réponse d'un système aquifère multicouche aux variations paléoclimatiques et aux sollicitations anthropiques Approche par modélisation couplée hydrodynamique, thermique et géochimique », Université Michel de Montaigne Bordeaux 3, 2007.
- [33] L. Chery, A. Gadalia, C. Mazurier, et B. Sourisseau, « Ressources thermominérales du Bas-Adour. Grille d'observation de la qualité des eaux. Rapport de synthèse BRGM/RR-40675-FR », BRGM, 1999.
- [34] W. G. Darling, « Hydrological factors in the interpretation of stable isotopic proxy data present and past: a European perspective », Isot. Quat. Paleoenviron. Reconstr., vol. 23, no 7-8, p. 743-770, avr. 2004.
- [35] O. Cabaret, « Caractérisation physique et approche numérique du rôle des aquitards dans les systèmes aquifères multicouches Application au complexe tertiaire nord-aquitain », Université Michel de Montaigne Bordeaux 3, 2011.
- [36] D. Thiéry, N. Amraoui, N. Gomez, E.and Pédron, et J. J. Seguin, « Regional model of groundwater management in North Aquitania aquifer system: Water resources optimization and implementation of prospective scenarios taking into account climate change. », Water Secur. Mediterr. Reg. Nato Sci. Peace Secur. Ser. C Environ. Secur. Pp 275-290 Eds Scozzari B El Mansouri Doi 101007798-94-007-1623-0, vol. Series C: Environmental Security, p. 275-290, 2011.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

## L'impact de la sécheresse sur la qualité des eaux souterraines (cas de la région d'Essaouira –Maroc)

## A.Fekri<sup>(1)</sup> et N. Laftouhi<sup>(2)</sup>

(1) Faculte des sciences Ben M'Sik Casablanca.(2) Faculte des sciences semlalia Marrakech ahmedfekri13@gmail.com

La cuvette synclinale d'Essaouira est une unité hydrogéologique bien individualisée soumise à un climat semi aride, avec une précipitation moyenne de l'ordre de 300mm/an. Le système aquifère est formé par deux nappes qui circulent dans des formations pli quaternaires et turoniennes séparées par des marnes grises sénoniennes. Cette unité assure l'alimentation en eau potable de la ville d'Essaouira située sur la côte atlantique juste au nord de l'embouchure de l'oued Ksob.

Au niveau de la nappe plio quaternaire les écoulements des eaux souterraines s'effectuent de l'Est vers l'Ouest avec une ligne de partage des eaux qui sépare une zone Sud et une zone Nord limitée par l'oued Ksod considéré comme le cours d'eau le plus important de la région. Ce dernier qui assure la recharge de la nappe, prend naissance à partir de sources d'âge secondaire et traverse une vallée diapirique formée par des argiles salifère du trias.

L'évaluation de l'effet de la sécheresse sur la qualité des eaux souterraines est faite sur la base de traitement les données hydrochimiques de deux compagnes effectuées en 1991 et 1995. Cette dernière année étant connue comme l'une des plus sèches dans l'historique climatique de la zone. En effet les niveaux piézométriques ont connue un rabattement qui a atteint un maximum de 5 m .

La comparaison de deux situations hydrochimiques a montré un comportement nuancé selon les zones. La zone sud n'ayant aucune relation hydraulique avec l'oued Ksob , les faciès sont restés inchangés et la partie Nord ou le faciès a connu une migration vers un faciès bicarbonaté caractéristique des bases eaux de l'oued Ksob. En effet le déficit en précipitation était de l'ordre de 40% à la normale a provoqué un déficit d'écoulement de 67%, induisant par facto un manque de recharge en eau chlorurée.

Dans le contexte de la cuvette synclinale d'Essaouira la sécheresse se manifeste donc par une diminution des niveaux piézométriques mais aussi d'un changement de la qualité des eaux. Ce phénomène risque de s'aggraver dans la mesure où un barrage est installé en 2012 dans la partie amont de l'oued Ksob.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# SESSION 2 CONTRIBUTION DES NOUVELLES METHODES GEOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

## Minéralisation des eaux de l'Eocène nord aquitain : Méthodologie appliquée et résultats

E. Malcuit<sup>(1)</sup>, Ph. Négrel<sup>(2)</sup>, O. Atteia<sup>(3)</sup>, E. Petelet-Giraud<sup>(2)</sup>, M. Franceschi<sup>(3)</sup>,

S. Galaud<sup>(3)</sup>, A. Dupuy<sup>(3)</sup>

(1) BRGM Aquitaine actuellement à CFG Services, e.malcuit@cfg.brgm.fr (2) BRGM, (3) ENSEGID - IPB. e.malcuit@cfg.brgm.fr

#### I. INTRODUCTION

Dans le nord du Bassin Aquitain, la ressource en eau de l'Eocène présente localement des concentrations excessives en fluorures et en sulfates. Ceci entraine des difficultés de gestion de la ressource et a des conséquences en termes de santé publique. En effet, l'excès de fluorures dans l'eau consommée peut engendrer le développement, notamment chez l'enfant, de fluorose<sup>[1]</sup> dentaire, voire osseuse. Certaines communes girondines doivent faire face à des difficultés importantes de gestion pour l'alimentation en eau potable de leur population. Le projet de recherche CARISMEAU 2 et la thèse associée <sup>[2]</sup>, qui ont eu lieu de 2009 à 2012, avaient pour but de caractériser précisément cette minéralisation de l'eau de l'Eocène, dont la répartition spatiale, hétérogène dans le nord du Bassin Aquitain, varie suivant l'élément considéré. Pour identifier l'origine de ces minéralisations, une méthodologie pluridisciplinaire couplant l'analyse géochimique et isotopique des eaux avec la caractérisation des formations (analyses minéralogiques) a été mise en œuvre (Figure 1). L'utilisation d'une modélisation couplée géochimie-transport permet de reconstituer la composition des eaux à l'échelle du puits.

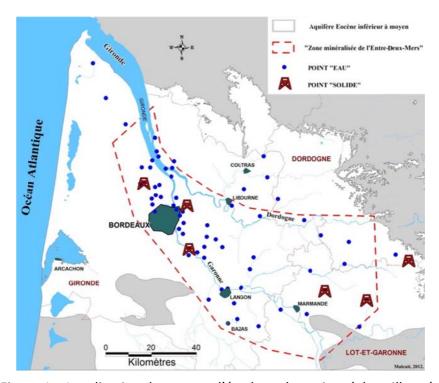


Figure 1 – Localisation du secteur d'étude et des points échantillonnés.

#### II. ETAT DES LIEUX - METHODOLOGIE

#### II. 1 Caractéristiques géochimiques et isotopiques des eaux

#### Faciès chimique des eaux

Parmi les trois aquifères principaux utilisés, les eaux du Crétacé et de l'Oligocène ont un faciès soit bicarbonaté-calcique soit bicarbonaté-sodique. Seuls les forages de l'Eocène moyen semblent montrer une évolution avec un enrichissement en sulfates, ce qui implique aussi pour un certain nombre d'entre eux le dépassement de la norme de potabilité pour les sulfates (250 mg.l<sup>-1</sup>).

#### Caractéristiques isotopiques

Les valeurs en  $\delta^2$ H et  $\delta^{18}$ O sont relativement regroupées, autour de -35 ‰ et de -5‰ pour les eaux de l'Oligocène ce qui correspond à une même période de recharge. Par contre, les eaux de l'Eocène varient de -25 à -55 ‰ en  $\delta^2$ H et de -3.5 à -8.5‰ en  $\delta^{18}$ O. Il apparaît que les eaux minéralisées de l'Eocène font partie des eaux les plus appauvries. Certains points de l'Eocène représentent une eau de recharge actuelle (zone d'affleurement), d'autres d'âge similaire à l'Oligocène et enfin d'autres correspondent à des eaux beaucoup plus anciennes. Les eaux de l'Eocène inférieur à moyen ont des valeurs d'autant plus faibles qu'elles se rapprochent de la zone de convergence des écoulements (Figure 2).

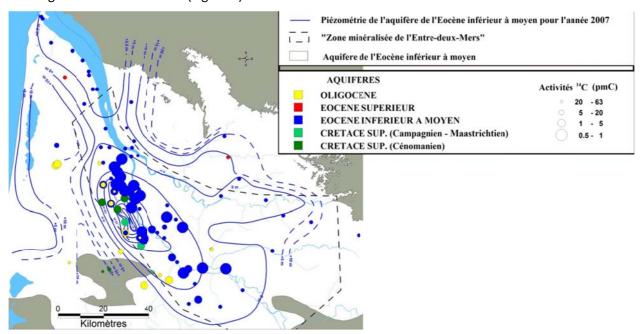


Figure 2 – Ecoulements des eaux souterraines de l'Eocène inférieur à moyen du Bassin nord aquitain ; Activités <sup>14</sup>C des eaux.

La représentation cartographique des activités <sup>14</sup>C montre que la minéralisation des eaux n'est pas forcement liées aux temps de résidence des eaux souterraines. Il existe a priori deux facteurs distincts, le temps de résidence et la minéralisation, qui se superposent pour une même zone géographique. De même, au sein de l'aquifère de l'Eocène inférieur à moyen, les temps de résidence montrent des incohérences, en juxtaposant des eaux relativement récentes à des eaux beaucoup plus anciennes (Figure 2).

## II. 2 Répartition spatiale des concentrations en sulfates et fluorures à l'échelle du nord du Bassin Aquitain

La répartition spatiale des eaux souterraines minéralisées ( $SO_4^{2-} > 60 \text{ mg.l}^{-1}$ ) concerne surtout les eaux de l'Eocène inférieur à moyen. Les eaux dont les teneurs en fluorures sont supérieures à 1.5 mg.l<sup>-1</sup> sont les eaux de l'Eocène minéralisé et deux forages captant le Crétacé supérieur. Il n'apparaît pas de zonation spatiale nette dans la répartition des teneurs en sulfates et en fluorures (Figure 3), ceci conduit à penser que la minéralisation n'est pas due à un simple transport depuis une zone riche en minéraux, mais plutôt à des processus très locaux.

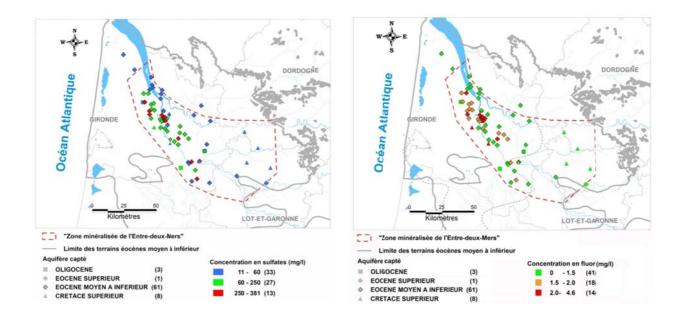


Figure 3 – Répartition spatiale des teneurs en sulfates et fluorures pour les forages de la « Zone minéralisée de l'Entre-Deux-Mers ».

#### II. 3 Distribution verticale différente de la minéralisation pour les sulfates et les fluorures

La répartition verticale des [F<sup>-</sup>] et [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] en fonction de la lithologie captée (Figure 4) met en évidence des concentrations maximales en sulfates pour les faciès à sables/calcaire avec marnes et/ou argiles de l'Eocène inférieur à moyen, avec des concentrations en fluorures qui n'excède pas 2 mg.l<sup>-1</sup> (facteur limitant dû à la présence des sulfates). Par contre, les concentrations maximales en fluorures se rencontrent à la base de l'Eocène inférieur marneux/argileux et au toit des calcaires du Crétacé supérieur.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

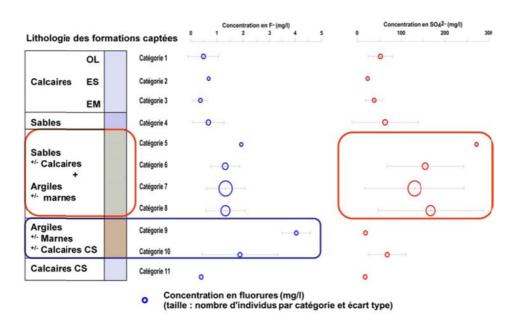


Figure 4 – Distribution verticale des sulfates et des fluorures.

#### II. 4 Caractérisation lithologique et minéralogique de l'encaissant

Des analyses minéralogiques (DRX, MEB-X-EDS) ont permis d'identifier dans les « cuttings » de forages et les échantillons récoltés à l'affleurement sur le site d'une ancienne exploitation de gypse, deux cortèges minéraux principaux (Figure 5). Un premier cortège constitue le fond géochimique « classique » de cet aquifère carbonaté (calcite, dolomite, calcite magnésienne, quartz, sidérite, pyrite, feldspaths, etc..) et un deuxième cortège évaporitique explique les minéralisations excessives en fluorures et en sulfates (fluorine, évaporites (gypse), célestine associée au gypse).

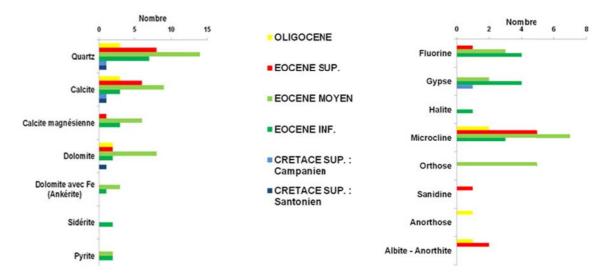


Figure 5 – Minéralisation de l'encaissant (Oligocène, Eocène et Crétacé supérieur).

#### III. PROCESSUS D'ACQUISITION DE LA MINERALISATION DES EAUX

#### III. 1 Processus géochimiques

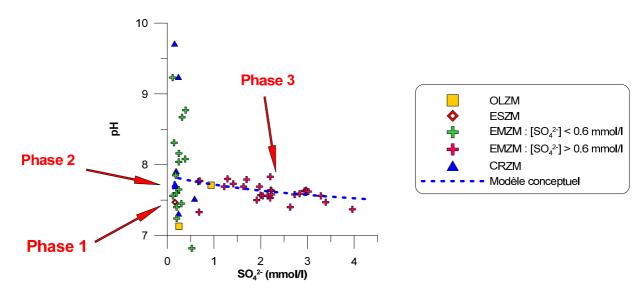
Pour expliquer l'acquisition de la minéralisation des eaux, un modèle conceptuel en 3 phases est proposé :

- Phase 1 : Infiltration d'eaux de drainage caractéristiques du nord du Bassin aquitain et mise à l'équilibre avec la calcite en système ouvert vis-à-vis du  $CO_2$  pour une  $Pco_2$  moyenne à  $10^{-2.5}$  atm.
- Phase 2 : Passage en système fermé vis-à-vis du  $CO_2$ , acquisition de la minéralisation des eaux peu minéralisées ( $[SO_4^{2-}] < 60 \text{ mg.l}^{-1}$ ). Il s'agir ici principalement d'interactions eaux-roches en milieu carbonaté (dolomite, magnésite et maintien de l'équilibre avec la calcite).
- Phase 3 : Les eaux obtenues lors de la phase 2 se minéralisent au contact d'évaporites principalement sulfatées, la concentration en  $SO_4^{2^-}$  des eaux augmente progressivement en respectant les ratios observés avec les autres ions  $Mg^{2^+}$ ,  $Ca^{2^+}$ ,  $Cl^-$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2^+}$ ,  $Ba^{2^+}$  et  $F^-$ .

Ces processus ont été modélisés (PHREEQC 2.18) en utilisant une composition des eaux de drainage caractéristique du nord du Bassin aquitain et les minéraux identifiées en DRX pour les phases solides. Les paramètres de validation du modèle géochimique utilisés sont le pH et les indices de saturation. Le modèle restitue correctement les pH des eaux simulées et les indices de saturation par rapport aux eaux échantillonnées (Figure 6).

#### III. 2 Hétérogénéité au sein de l'aquifère Eocène

La reconstitution paléogéographique du Crétacé supérieur à l'Oligocène du nord du Bassin aquitain a permis d'identifier les secteurs favorables aux dépôts d'évaporites (gypse) et de fluorine (Figure 7). Ce travail est basé sur les travaux antérieurs [3],[4],[5],[6],[7] et avec l'apport des nouvelles données lithologiques et minéralogiques acquises lors de cette étude. La comparaison du schéma paléogéographique avec la cartographie des teneurs en sulfates met en avant l'adéquation entre les zones à argiles/marnes pouvant contenir des évaporites (en jaune) et les concentrations élevées en sulfates dans l'eau des forages du secteur d'étude.



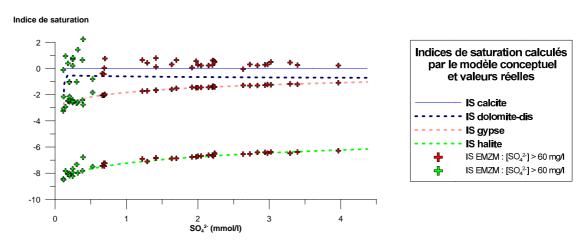


Figure 6 – Paramètres de validation du modèle : le pH et les indices de saturation (IS) des phases minérales réelles et modélisées.

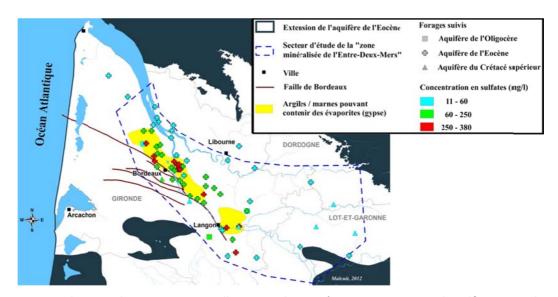


Figure 7 – Localisation des zones potentiellement riches en évaporites, sources de sulfates pour les eaux souterraines.

#### III. 3 Impacts directs de l'implantation d'un forage, des formations captées et de sa complétion

Les résultats <sup>[2]</sup> indiquent que la qualité de l'eau de l'Eocène dépend de l'implantation géographique des forages, de la nature lithologique et minéralogique des terrains captés et de la complétion des puits.

A l'échelle du puits, des travaux de modélisation couplée hydrodynamique-transport ont permis de reconstituer la géochimie d'ouvrages du secteur d'étude, en se basant sur la description lithologique et des diagraphies géophysiques (gamma ray, flow-mètre) et géochimiques (conductivités, température, concentration en fluorures). Un exemple est présenté sur la Figure 8. En calant le flux et en situant précisément les niveaux riches en sulfates et/ou fluorures, il est possible de reconstituer la chimie de l'eau prélevée. Ces résultats valident l'importance de l'hétérogénéité au sein de l'aquifère éocène et le rôle des niveaux peu perméables, potentiellement riches en gypse et fluorine.

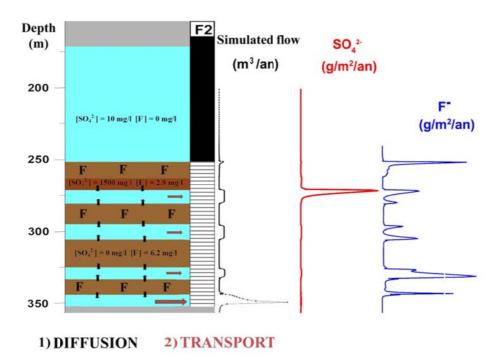


Figure 8 – Identification des niveaux riches en évaporites (source de sulfates) et en fluorine (source de fluorures) de l'Entre-Deux-Mers).

La synthèse de ces résultats à l'échelle du nord du Bassin aquitain, en tenant compte de la faille de Bordeaux, est représentée sur la Figure 9. Suivant chaque forage, son implantation, sa complétion, la chimie des eaux extraites varie.

#### IV.CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR UNE MEILLEURE GESTION DE LA RESSOURCE

Ce travail a donc permis d'obtenir une caractérisation géochimique fine de cette minéralisation, mais aussi d'en comprendre les différents processus d'acquisition, en prenant en compte l'ensemble des paramètres environnementaux.

La localisation de la « zone minéralisée de l'Entre-Deux-Mers » est due à deux facteurs principaux : la présence de dépôts nombreux et relativement épais de gypse et de fluorine et une circulation lente des eaux au sein de ce système multicouche complexe.

Des solutions pour abaisser significativement les concentrations excessives en fluorures et sulfates ont pu être proposées, aussi bien sur le choix de l'implantation d'un forage que sur les choix de complétion des ouvrages en fonction des terrains traversés (lithologie). Il s'avère judicieux de ne pas capter les niveaux peu perméables au sein de l'aquifère multicouche de l'Eocène nord aquitain.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

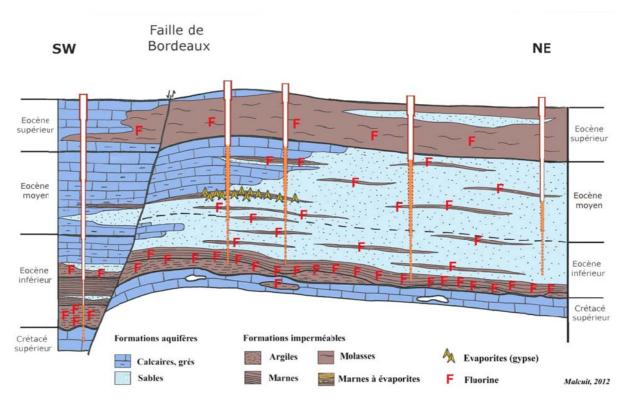


Figure 9 – Schéma de synthèse illustrant la complexité de la minéralisation en sulfates et en fluorures dans le sous-sol du nord du Bassin aquitain en fonction du positionnement de forages dédiés à l'alimentation en eau potable.

#### Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche CARISMEAU2 et d'une thèse BRGM-ENSEGID, coencadrée par Ph. Négrel (BRGM) et O. Atteia (ENSEGID). Les remerciements sont adressés aux financeurs du projet de recherche (Agence de l'Eau Adour Garonne, BRGM, Carnot BRGM, Conseil général de la Gironde, Région Aquitaine) et à l'ensemble des acteurs locaux de l'eau ayant contribué à ce projet.

#### Références bibliographiques

- Dissanayake C.B., 1991. The fluoride problem in the groundwater of Sri Lanka Environmental management and health. Int. J. Environ Stud. 38, pp. 137-156.
- Malcuit E., 2012. Origine de la minéralisation des eaux dans un aquifère multicouche profond Exemple de la « zone minéralisée de l'Entre-Deux-Mers » (Bassin Aquitain, France). Thèse de doctorat, Université Bordeaux 3, ENSEGID, 343 p.
- [3] Klingebiel A., 1967. Etude sédimentologique du Paléogène nord-aquitain. Thèse d'Etat, n° 187, Fac. Sci. Bordeaux, 290 p.
- Dubreuilh J., 1987. Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluviatiles tertiaires du nord du bassin d'Aquitaine. Passage aux formations palustres, lacustres et marines. Thèse d'Etat. BRGM n°172. 393 p.
- <sup>[5]</sup> Capdeville J.P., 1987. Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluvio-lacustres tertiaires du Nord du Bassin aquitain entre Lot et Dordogne. Thèse d'Etat, Université de Bordeaux III.
- [6] Platel J.P., 1987. Le Crétacé supérieur de la plate-forme septentrionale du bassin d'Aquitaine. Stratigraphie et évolution géodynamique. Thèse Doctorat d'Etat es-Sciences, Bordeaux III, 573 p. avec atlas. Documents BRGM, n° 164.
- [7] Warren J.K., 2006. Evaporites, Sediments, Ressources and Hydrocarbons. Springer, 1035 p.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Couplage d'outils isotopiques et microbiologiques pour la détermination de l'origine des nitrates dans une source karstique en milieu agricole

C. Briand<sup>(1)</sup>, M. Sebilo<sup>(2)</sup>, V. Plagnes<sup>(1)</sup>, P. Louvat<sup>(3)</sup>, T. Chesnot<sup>(4)</sup> et P. Ribstein<sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> UMR 7619 Sisyphe, UPMC Paris 06, Paris

<sup>1</sup> UMR 7618 Bioemco, UPMC Paris 06, Paris

#### I. INTRODUCTION

La source du Marseillon située à Audignon dans les Landes (Sud Ouest, France) est l'exutoire naturel de l'aquifère du Crétacé. Ces calcaires affleurent au niveau des Pyrénées, plongent ensuite à plus de 2 km de profondeur pour ressurgir à la faveur d'anticlinaux comme à Audignon (figure 1). Ce réservoir karstifié offre des débits importants (170 l/s) et une eau de bonne qualité. La source du Marseillon est donc exploitée l'alimentation en eau potable de la région et représente une ressource stratégique pour l'avenir. Néanmoins le suivi qualitatif de ses eaux montre une constante augmentation des concentrations en nitrates depuis ces 30 dernières années avec des valeurs oscillant autour de 25 mg/L depuis les années 2000 ainsi que des épisodes de contamination fécale des eaux du Marseillon. Bien que les concentrations en nitrates dans la source du Marseillon restent bien en dessous des 50 mg/L fixés comme norme de potabilité l'importance de cette ressource nécessite une attention toute particulière dont la première étape passe par la détermination de l'origine des nitrates.

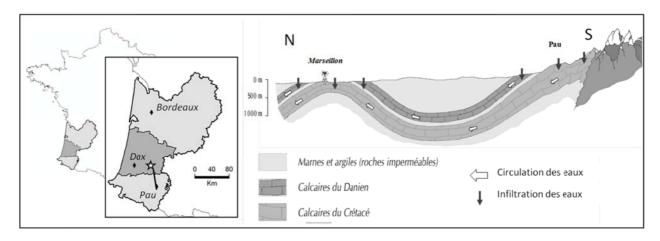


Figure 1 – Localisation de la source du Marseillon (étoile), du trait de coupe NS de la structure d'Audignon. (Source : Conseil général des Landes, cellule hydrogéologique)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> UMR CNRS 7154 Institut de Physique du Globe de Paris, Univ Paris-Diderot, Paris
<sup>4</sup> Eurofins Expertises Environnementales, Site St. Jacques II, 54521 Mayeville, France

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Eurofins Expertises Environnementales, Site St Jacques II, 54521 Maxeville, France cyrielle.briand@upmc.fr, mathieu.sebilo@upmc.fr, valerie.plagnes@upmc.fr, louvat@ipgp.fr, ThierryChesnot@eurofins.com, pierre.ribstein@upmc.fr

La source du Marseillon semble être alimentée à la fois par des eaux d'origine profonde (16°C), mais également par des circulations d'eaux de surface favorisées par le caractère karstique des calcaires du Crétacé à l'affleurement. Cependant les faibles variations des concentrations en nitrates dans la source en comparaison à celles des eaux de surface (figure 2) semblent indiquer que ces circulations depuis la surface ne sont pas une source significative des nitrates du Marseillon.

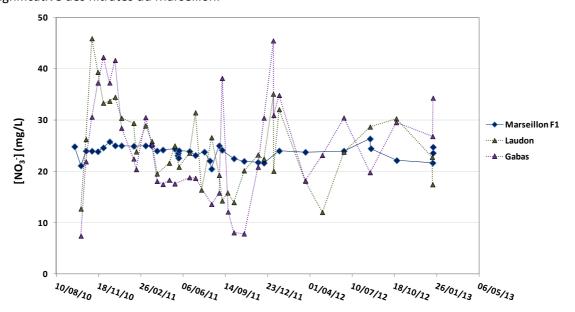


Figure 2 – Evolution des concentrations des nitrates, dans les eaux du Marseillon et dans les cours d'eau voisins (Données UPMC)

Nous avons donc développé une approche pluridisciplinaire combinant des outils isotopiques (isotopes stables des nitrates et du bore) et microbiologiques (bactériophages et bactéroïdales) visant à déterminer la nature de ces nitrates dans les eaux du Marseillon et plus particulièrement dans l'un des 2 forages de production.

#### II. DETERMINATION DE LA SOURCE DES NITRATES A MARSEILLON

Les eaux du Marseillon forment une lagune qui s'écoule jusqu'au ruisseau du Laudon. La production d'eau potable se fait grâce à deux forages situés de part et d'autre de la lagune à moins de 20 mètres de celle ci. Le forage F1 est un ouvrage de 106 mètres de profondeur, crépiné sur 4 niveaux différents tandis que le forage F2 ne mesure que 35 mètres de profondeur. Dans un premier temps, nous nous sommes focalisés sur le forage F1, sur lequel nous avons réalisé un certain nombre de prélèvements entre octobre 2010 et janvier 2013.

#### II. 1 Les outils isotopiques dans le forage F1

La source du Marseillon est située dans une région fortement agricole, avec une culture très développée du maïs et des élevages de canards. Les sources de nitrates sont donc multiples et comprennent les engrais inorganiques et organiques, les eaux usées d'élevages et domestiques en l'absence de traitements collectifs.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

De nombreuses études et projets [1], comme le programme ISONITRATE utilisent l'étude des compositions isotopiques des nitrates couplées à celles du bore afin de déterminer les sources de nitrates présents dans l'environnement.

En effet, les différentes sources et les processus qui affectent les nitrates leur confèrent des signatures isotopiques particulières. Ainsi, les  $\delta^{15}N$  des engrais nitrates et ammonium varient généralement de -5 à +5 % puisqu'ils proviennent de la fixation d'azote atmosphérique ( $\delta^{15}N_{atm}\approx0$ %) mais sont différenciés par leur  $\delta^{18}O$ , autour de 25 % pour la forme oxydée (nitrates) et de 0 % pour la forme réduite (ammonium ou urée) [2]. Les nitrates issus de la nitrification des déchets organiques (animaux ou humains) sont caractérisés par des  $\delta^{15}N$  généralement compris entre +10 et +20% du fait de l'enrichissement en  $^{15}N$  de l'ammonium résiduel induit par la volatilisation de l'ammoniaque.

La répartition des valeurs fréquemment rencontrées dans la littérature est présentée dans la figure 3 ainsi que les résultats des différents prélèvements réalisés dans le forage F1 au cours de différentes campagnes.

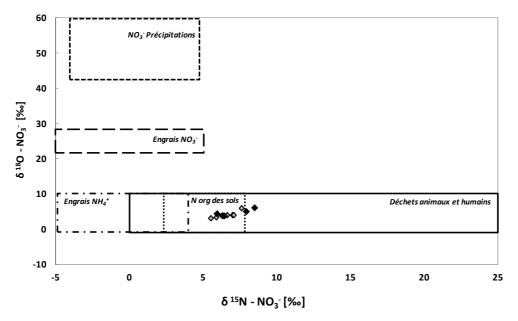


Figure 3 – Composition isotopique des différentes sources potentielles de nitrates référencées dans la littérature (encadrés, d'après Kendall 1998) et des prélèvements d'eau provenant du forage F1 (Données UPMC)

Les compositions isotopiques des  $^{15}$ N et  $^{18}$ O indiquent clairement une origine organique des nitrates dans les eaux du Marseillon avec un  $\delta^{15}$ N supérieur à 5 ‰ et un  $\delta^{18}$ O entre 4 et 8‰ permettant d'écarter une contribution significative des engrais inorganiques.

Le couplage avec la composition isotopique du Bore, connu pour être un co-migrant des nitrates dans l'environnement et un marqueur des eaux usées domestiques permet d'affiner la discrimination parmi les sources potentielles de nitrates. En effet, les eaux usées domestiques sont généralement caractérisées par des  $\delta^{11}$ B proches de zéro tandis ceux des lisiers sont compris entre +5 et +45 ‰ [3]. Certains échantillons prélevés dans le forage F1 ont pu être analysés et sont présentés dans la figure 4.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

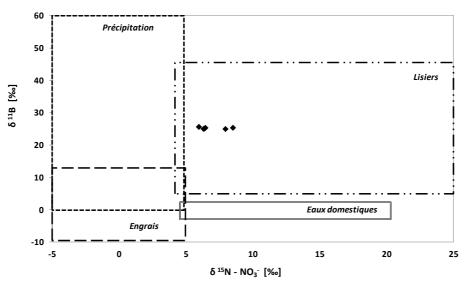


Figure 4 – Composition isotopique des différentes sources potentielles du bore référencées dans la littérature (encadrés, d'après Widory 2004) et des prélèvements d'eau provenant du forage F1 (Données UPMC)

Les 5 échantillons issus du forage F1 présentent tous un  $\delta^{11}B$  de 25 ‰. Ces valeurs couplées aux  $\delta^{15}N$  des nitrates permettent d'exclure une contamination significative par des eaux usées d'origine domestique et favorisent plutôt l'hypothèse d'une contamination par des nitrates d'origine animale.

#### II. 2 Les outils microbiologiques dans le forage F1

En complément de cette approche isotopique couplée, des outils microbiologiques ont été testés pour caractériser l'origine des contaminations fécales fréquemment détectées dans les eaux du Marseillon. En plus des marqueurs classiques (*E.Coli* et Entérocoques), des analyses ont été réalisées sur des marqueurs génétiques spécifiques (bactériophages et bactéroïdales). Ils permettent de distinguer une contamination d'origine humaine ou animale et dans une certaine mesure, ils donnent des informations sur le type d'animal (marqueur humain, bovin ou porcin).

Pour les eaux du Marseillon, plusieurs épisodes de contaminations fécales ont été détectés (présence d'*E. Coli* et d'entérocoques). Lors de la campagne de février, des bactériophages ont été retrouvés à toutes les profondeurs et ont pu être caractérisés. Ils appartenaient tous au génogroupe 1, associé aux contaminations animales [4].

L'utilisation de ces marqueurs a permis de confirmer les conclusions fournies par les outils isotopiques sur une contamination d'origine animale. La détection de ces micro-organismes vivants, dans l'eau du Marseillon témoignent de circulations rapides entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Ces transferts rapides depuis les eaux de surface vers les eaux du Marseillon ne semblent pas constituer la seule source à l'origine de l'augmentation constante des teneurs en nitrates de ces dernières. Nous avons donc cherché à comprendre quels étaient les réservoirs souterrains susceptibles d'alimenter les eaux du Marseillon et ainsi d'apporter ces nitrates.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### III. IDENTIFICATION DE L'ALIMENTATION DU MARSEILLON

La source du Marseillon se trouve sur le flanc nord de l'anticlinal d'Audignon. Cette structure associée à la formation des Pyrénées permet d'observer les séries stratigraphiques tectonisées de l'Albien au Miocène. L'étude géologique précise de la structure d'Audignon est compromise par les dépôts des mollasses (à l'Est) et les sables fauves (à l'Ouest) en discordance sur ces formations géologiques [5]. Lorsque cette couverture est érodée les affleurements calcaires et dolomitiques rencontrés sont très souvent karstifiés. Les différentes formations calcaires et dolomitiques forment des réservoirs aquifères.

Nous avons choisi d'étudier différents forages et sources du Crétacé mais aussi de l'aquifère de l'Eocène-Paléeocène susceptibles d'être en communication avec le réservoir de la source du Marseillon. Les forages d'Eyres-Moncube, Montaut, Montsoué et la source de Banos sont représentés sur la figure 5. Le tableau 1 reprend les différentes caractéristiques de ces points.

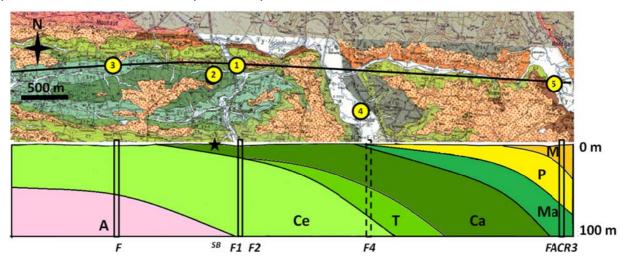


Figure 5 – Localisation des points d'eau étudiés et trait de coupe sur fond de carte géologique. Coupe géologique simplifiée à partir des données de forages (BRGM) et projection des différents forages et de la source de Banos. (A : Marnes de l'Albien, Ce : calcaires et marnes et dolomies du Cénomanien, T : calcaires dolomitiques du Turonien, Ca : calcaires marneux à silex du Campanien, Ma : calcaires marneux du Maastrichtien, P : calcaires et dolomies du Danien, M : argiles et marnes du Miocène [5]).

N° sur la carte	Commune	Code BSS	Aquifère	Profondeur atteinte
1	Audignon F1	09782X0024/F1	Crétacé	106
2	Banos	09782X0010/S	Crétacé	source
3	Montaut	09781X0008/F	Crétacé	101
4	Eyres-Moncube	09782X0013/F4	Crétacé	105
5	Montsoué	09783X0002/FACR3	Eocène-Paléocène	75

Tableau 1 – Caractéristiques et correspondance numérique des points d'eau étudiés (Source : ADES)

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### III.1 Etude piézométrique

La comparaison des niveaux piézométriques de ces différents points (figure 6) permet d'observer que la source du Marseillon correspond au point le plus bas ce qui suppose que la sourcepourrait être influencée par les eaux dont les côtes NGF sont supérieures. Ces chroniques permettent également de constater un comportement similaire entre les forages de Montaut, Eyres-Moncube et Marseillon avec de fortes diminutions des niveaux en été qui sont expliquées par les activités d'irrigation.

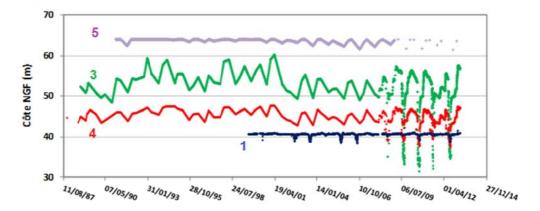


Figure 6 – Niveaux piézométriques des différents points d'eau du Crétacé : Marseillon (1), Montaut (3), Eyres-Moncube (4) et du Paléocène-Eocène : Montsoué (5). (Source : ADES)

#### III.2 Analyse des compositions chimiques

Nous avons tenté de caractériser d'un point de vue chimique l'eau des différents forages et sources afin de déterminer quelles étaient les circulations potentielles susceptibles d'expliquer la composition chimique des eaux du Marseillon.

De manière générale, les concentrations en calcium et magnésium (figure 7) permettent de bien discriminer les différents réservoirs. Pour l'ensemble, les concentrations en magnésium sont d'autant plus importantes que celles en calcium diminuent ce qui montre que la contribution des calcaires et des dolomies varie dans les différents réservoirs rencontrés.

Les eaux du Marseillon (Forages F1 et F2) sont de type calcique-magnésienne avec des concentrations en calcium allant de 80 à 105 mg/L et en magnésium de 14 à 16 mg/L. Ces concentrations sont intermédiaires par rapport aux autres eaux étudiées. Les eaux de Montsoué et de Montaut sont plutôt magnésiennes (25 et 20 mg/L en moyenne respectivement) tandis que celles d'Eyres-Moncube et plus fortement encore celles de Banos sont plutôt calciques. La source de Banos présente des teneurs en magnésium similaires à celles des eaux de surface, il apparaît clairement que cette source n'est pas alimentée par le même réservoir que celle du Marseillon.

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

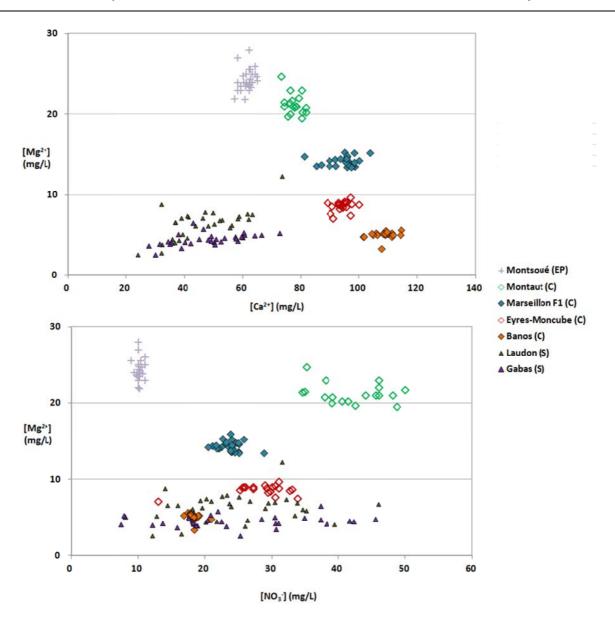


Figure 7 – Concentrations en ions magnésium, calcium et nitrates pour les différents points d'eau souterrains (C : Crétacé, EP : Eocène-Paléocène) et les cours d'eau à proximité de Marseillon (S : surface). (Données UPMC depuis 2010 pour Marseillon, Banos, Laudon et Gabas, Source : ADES depuis 2000 pour Eyres-Moncube, Montaut et Montsoué)

Les concentrations en nitrates (figure 7) permettent elles aussi de bien distinguer les différentes eaux. Les eaux de Montaut contiennent entre 25 et 50 mg/L, Eyres-Moncube et Marseillon présentent des concentrations intermédiaires de 30 et 25 mg/L en moyenne respectivement tandis que le forage de Montsoué est quasiment dépourvu de nitrates (7à 9 mg/L). Le réservoir de Montsoué ne semble donc pas contribuer à l'apport de nitrates dans le Marseillon.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### IV. CONCLUSIONS

La géologie complexe liée à la structure d'Audignon rend difficile toute interprétation de circulations souterraines. Toutefois en comparant les compositions chimiques, la géologie des réservoirs et les comportements piézométriques des différents forages il est possible d'émettre des hypothèses de fonctionnement du captage du Marseillon.

Les nitrates présents dans la source du Marseillon pourraient provenir du réservoir dolomitique du Cénomanien recoupé par le forage de Montaut. En revanche, les réservoirs dolomitiques du Turonien et calcique du Campanien moins riches en nitrates, rencontrés à Eyres-moncube, pourraient venir diluer ces apports riches en nitrates.

La mise en relation avec l'occupation des sols sur les zones de recharge et des sources potentielles des nitrates dans la zone de Montaut et d'Eyres-Moncube sera la prochaine étape pour une meilleure compréhension de l'origine des nitrates dans la source du Marseillon.

#### Références bibliographiques

- [1] Bronders J., Tirez K., Desmet N., Widory D., Petelet-Giraud E., Bregnot A., Boeckx P., 2012 Use of Compound-Specific Nitrogen (d15N), Oxygen (d18O), and Bulk Boron (d11B) Isotope Ratios to Identify Sources of Nitrate-Contaminated Waters: A Guideline to Identify Polluters. *Environ. Forensics* 13, 32–38.
- [2] Kendall C., McDonnell J. J., 2009 Tracing nitrogen sources and cycling in catchments in *Isot. Tracers Catchment Hydrol.* 519–576.
- [3] Widory D., Kloppmann W., Chery L., Bonnin J., Rochdi H., Guinamant J.L., 2004 Nitrate in groundwater: an isotopic multi-tracer approach. *J. Contam. Hydrol.* 72, 165-188.
- [4] Schaper M., Jofre J., Uys M., Grabow W. o. k., 2002 Distribution of genotypes of F-specific RNA bacteriophages in human and non-human sources of faecal pollution in South Africa and Spain. *J. Appl. Microbiol.***92**, 657–667.
- [5] Oller G., 1986 Etude hydrogéologique sanitaire pour la définition des périmètres de protection de la source de Marseillon à Audignon (Landes)

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

# Nouvelles approches pour l'étude des transferts dans les systèmes karstiques depuis Henri Schoeller. Application au système karstique de la grotte de Lascaux

R. Lastennet, A. Denis, P. Malaurent, N. Peyraube, B. Lopez, S. Minvielle

Université Bordeaux1, I2M UMR 5295 r.lastennet@i2m.u-bordeaux1.fr

#### **I.INTRODUCTION**

A la fermeture de la grotte de Lascaux en 1963, suite à l'apparition de la maladie verte (développement d'algues à la paroi) puis de la maladie blanche (précipitation de cristaux de calcite sur les peintures), Henri Schœller fut sollicité pour lancer les premières études microclimatiques et hydrogéologiques sur le site. Il appliqua alors des méthodes géochimiques de caractérisation de l'état d'équilibre des eaux dans la grotte vis-à-vis du système calcocarbonique. Après la description géologique des terrains constituant la colline de Lascaux, il entreprit de définir la surface du bassin d'alimentation des eaux dans Lascaux à partir de sa méthode basée sur les bilans de Chlorures, l'aire calculée était d'environ 2000 m². Celle-ci correspondait à peu près à la surface d'affleurement des calcaires coniaciens constituant le promontoire calcaire dans lequel se développe le réseau karstique où s'inscrit la grotte de Lascaux.

Au cours des années 2000, des programmes de recherche furent de nouveau lancés suite à une nouvelle crise d'origine biologique en 2001 après des travaux effectués dans la cavité. Le laboratoire I2M à Bordeaux1 a été chargé de poursuivre les travaux entrepris par Henri Schœller, et de nouvelles études hydrogéologiques et climatiques ont été menées. Nous proposons dans cet article de décrire les nouvelles méthodes utilisées en hydrogéologie karstique qui ont été appliquées au système de la grotte de Lascaux. Outre l'objectif conservatoire, les travaux ont permis de mieux caractériser le fonctionnement de l'épikarst, son rôle dans la recharge de l'aquifère karstique mais aussi d'étudier les processus de transfert d'eau et de CO2 dans ce compartiment et de développer de nouvelles méthodes d'investigation basées sur la géochimie des eaux.

#### **II.PRESENTATION DU SITE**

La grotte de Lascaux est située en bordure Nord-Est du Bassin Aquitain dans le département de la Dordogne près de la localité de Montignac (Figure 7). Le Périgord noir se trouve en. Cette zone géographique particulière est limitée au nord par l'autoroute A89 (anciennement N89), au Sud par la rivière Dordogne, à l'Ouest par la « Forêt Barade » et à l'Est par une ligne fictive Brive — Gourdon. La colline de Lascaux est un promontoire du plateau calcaire du crétacé supérieur de la région. Elle est comprise entre une vallée au nord parcourue par la rivière du Doiran et un thalweg traversée par un ruisseau au Sud et bordée à l'ouest par la vallée de la rivière Vézère constituant le niveau de base local.

Le climat de la Dordogne est principalement de type océanique avec cependant quelques influences continentales comme en témoigne parfois les chutes de neige durant les mois d'hiver. La pluviosité est en moyenne de l'ordre de 880 mm par an, répartie durant deux périodes principales à l'automne et au printemps. La température atmosphérique moyenne sur le site de Lascaux est d'environ 12.6°C, avec des températures mensuelles fluctuant entre 3°C l'hiver et 20°C l'été.

Du point de vue géologique (Figure 1a), la colline de Lascaux est principalement constituée par une assise épaisse de calcaires gréseux jaunâtre coquilliers (calcarénites) du Coniacien moyen et supérieur, dans laquelle s'est développé le réseau karstique comprenant la grotte de Lascaux. En continuité on observe des dépôts du

Santonien inférieur au sommet de la colline de même nature (calcarénites) et difficilement dissociables. A sa base on trouve une formation à dominante marneuse datée du Coniacien inférieur. Elle détermine une discontinuité hydraulique qui explique la présence de plusieurs sources de déversement. Le site de Lascaux se caractérise par une géomorphologie remarquable constituée d'affleurements calcaires entaillés par des paléocanyons profonds jusqu'à 20 mètres et remplis de sédiments détritiques sableux et argileux. L'origine de ces remplissages est en cours d'étude, il pourrait s'agir de dissolution en place (cryptokarst), de processus de "fantomisation" ou de comblement par des sédiments autochtones ou allochtones (sidérolithique, altérites du Santonien, quaternaire ancien).

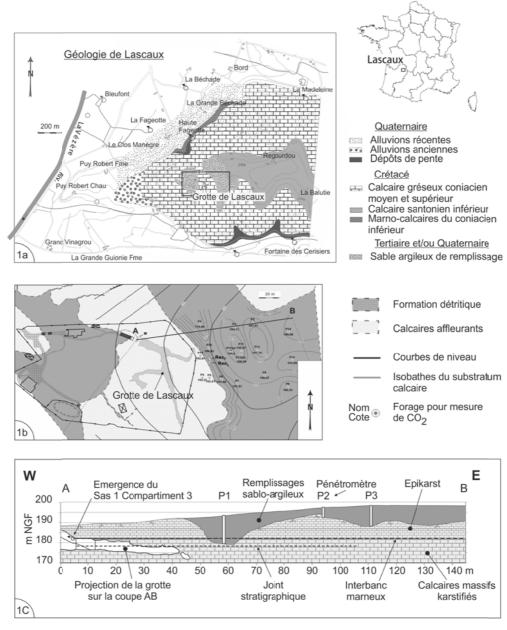


Figure 7 - Carte géologique 1a (d'après Schoeller, 1965), carte géomorphologique 1b, et coupe (AB) géologique 1c.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Dans un objectif conservatoire, des études ont été menées pour comprendre le fonctionnement hydrogéologique de ce système. Les écoulements présents dans la grotte de Lascaux sont localisés, et en particulier au niveau du SAS1 où la cavité recoupe l'interface entre l'épikarst formé par des calcaires délités et la zone de transmission constituée de bancs calcaires plus massifs mais karstifiés.

#### III.APPROCHE HYDRODYNAMIQUE

#### III.1 Fonction de transfert

Une particularité des écoulements dans la grotte de Lascaux est leur caractère non pérenne. On peut voir sur la Figure que les écoulements débutent généralement à la fin de l'automne et se terminent à la fin du printemps en juin. Il arrive qu'exceptionnellement on enregistre des écoulements au cours de l'été. L'hydrogramme est bien caractéristique d'une réponse karstique du système de Lascaux et non de milieu à porosité d'interstices (Lastennet et al., 1999).

Il existe cependant une variabilité importante du fait de l'état de la recharge du sol et de l'épikarst qui permet ou non le transfert de pression vers l'exutoire. L'étude de l'hydrogramme montre bien que les écoulements sont sous tendus à la recharge du système à l'automne. Un état de recharge déficitaire de l'épikarst conduira au décalage de la reprise de l'écoulement de plusieurs mois parfois, celui-ci pourra même être fortement influencé par le déficit engendré par les cycles précédents.

Ces observations sont importantes pour la gestion future de la cavité car on comprend bien à l'analyse de ces données que des variations climatiques pluriannuelles auront un impact important sur l'humidité générale du massif contenant la grotte de Lascaux. Or, les études microclimatologiques faites à l'intérieur de la grotte démontrent l'influence très importante de la nappe sur les variations thermiques et donc sur l'aérologie de la grotte (Malaurent et al., 2009).

L'étude de la relation Pluie-Débits par le **traitement du signal** selon l'approche de Alain Mangin (Mangin, 1984); sur des chroniques de débits au pas de temps journalier depuis 1965 et de 10 mn depuis 1997, montrent une réaction assez rapide du système épikarstique. A l'échelle journalière le temps de réponse des débits après une sollicitation pluvieuse, et lorsque l'épikarst est suffisamment rechargé, est en moyenne de 1 à 2 jours suivant les cycles. Au pas de temps de 10 mn, le temps de réponse peut être affiné il est de l'ordre de 20 heures. A d'autres périodes de l'année quand le degré de saturation de l'épikarst est insuffisant certains événements pluvieux peuvent être transparents et ne pas être repris en débit. Durant ces périodes, c'est généralement l'ETP qui prédomine (fin de printemps ou été) ou alors la fonction de stockage (automne).

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

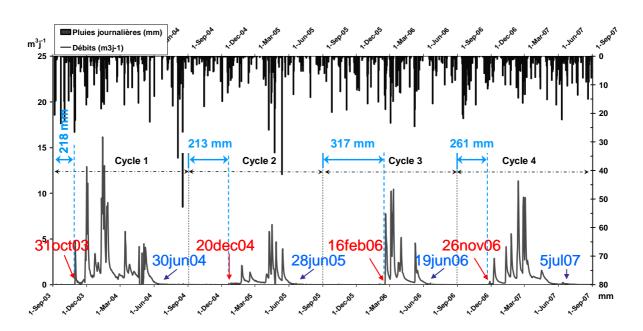


Figure 2 : Hydrogramme mesuré au sas1 et pluies à Lascaux. Cumuls de pluie brute (mm) du 1er septembre à la reprise des écoulements et dates de début et de fin des écoulements pour chacun des 4 cycles (B. Lopez, 2009)

Le traitement du signal Pluies-Débits permet d'accéder à un autre paramètre fondamental pour la caractérisation d'un système karstique, le temps de régulation qui rend compte de la capacité de stockage et de drainage du réservoir alimentant l'exutoire. Il s'agit de savoir si une pluie ou une période de pluies influera longtemps sur les débits enregistrés à l'exutoire.

Dans le cas de Lascaux, il existe deux types de fonctionnement, des signaux montrant des temps de régulation de 11 à 12 jours, d'autres avec des temps d'une trentaine de jours.

Nos hypothèses actuelles sont que ces différents fonctionnements correspondent au drainage de secteurs distincts dans l'épikarst, fonction de leur perméabilité et de leur relation avec la zone de drainage préférentielle transmissive conduisant l'eau vers l'exutoire du sas1.

Les secteurs qui se drainent plus difficilement correspondent à la fonction capacitive de l'épikarst. Il n'est pas exclu dans le cas de Lascaux, que les remplissages du karst participent à cette fonction en retardant l'écoulement et en permettant la constitution d'un stock. Ces flux restent probablement mineurs du fait de la faible perméabilité de ce milieu cependant ils ont un rôle considérable dans la signature géochimiques des eaux de Lascaux. D'autres secteurs plus transmissifs, des calcaires fracturés, sont rechargés plus rapidement et expliquent les montées rapides de débits. Par contre ils n'ont que peu de stock et se tarissent plus vite.

#### III.2 Fonction de production

Pour l'aspect fonction de production, un premier *modèle réservoir* (Figure 3) a été proposé (Lopez, 2009), selon un schéma classique d'utilisation de cette méthode par les hydrologues et adapté au milieu karstique. Celui-ci a du être complexifié par ajout d'un réservoir lent afin de reproduire les événements de crue de printemps mesurés dans le sas1 compartiment 3. Les résultats de ces approches sont peu satisfaisants (Figure 4) et les paramètres de calage ne sont pas reproductibles d'un cycle à l'autre. Il est probable que la taille du système et le manque de

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

contrôle des limites (sorties occultes par débordement par exemple) rendent difficile la reproduction du signal de sortie. Dans les systèmes plus grands et inertiels la réponse est beaucoup plus intégrée et efface la complexité du signal entrée représenté par le système épikarstique de Lascaux.

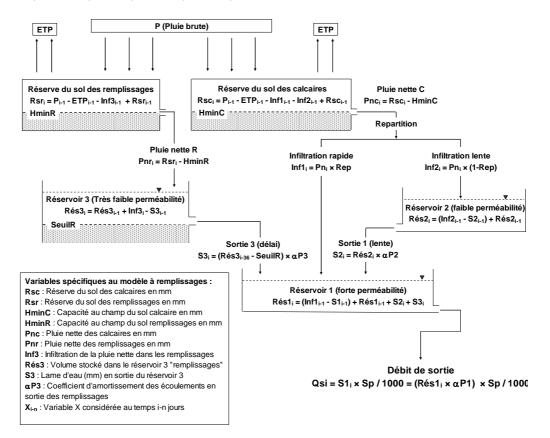


Figure 3 - Structure du modèle à trois réservoirs appliqué à Lascaux (in B. Lopez, 2009)

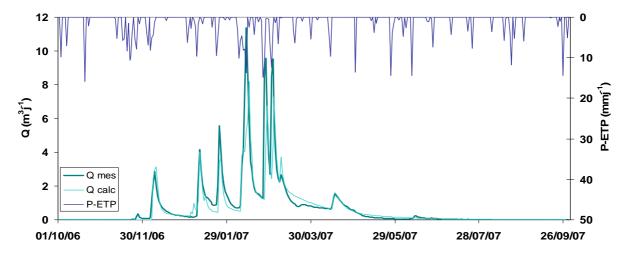


Figure 4 - Résultats de la simulation des débits au SAS1 de la grotte de Lascaux avec un modèle à trois réservoirs

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Ainsi, les études paramétriques entre pluie efficace et volume écoulé dans la grotte de Lascaux, entre 1963 et 2012, montrent un fonctionnement complexe de l'épikarst. La surface potentielle d'alimentation déduite varie de 1000 à 4000 m², pour une moyenne de 2050 m² proche de la valeur trouvée par Henri Schoeller. Cette variabilité s'explique d'un cycle à l'autre par l'effet mémoire du système épikarstique, et de sa capacité à être contributif ou non dans l'espace 3D.

Ainsi, on observe que lors des cycles hydrologiques excédentaires, pour lesquels les pluies efficaces sont supérieures à la moyenne, les volumes écoulés au SAS1 sont bien plus importants proportionnellement que lors des cycles déficitaires. Il faut donc considérer que la « surface potentielle d'alimentation » a varié. Cette surface est en fait plus proche de la notion de zone contributive, en considérant que des volumes d'aquifère deviennent contributifs à l'écoulement lorsqu'ils ont dépassé un seuil lié à leur capacité de rétention. Ce processus propre à la zone non saturée, dans lequel les écoulements sont diphasiques, est certainement à l'origine de la variabilité observée dans la fonction de transfert.

#### **IV.APPROCHE HYDROCHIMIQUE**

#### IV.1 Utilisation de l'oxygène 18 comme traceur naturel de l'infiltration

Deux cycles de 2003 à 2005 ont été suivis en oxygène 18 à l'émergence du sas1, à la source de la Haute Fageotte (au pied de la colline) et dans les précipitations. Du fait de la faible épaisseur des calcaires au dessus de la zone exutoire (5 à 8 mètres), il semblait pertinent d'utiliser le traçage naturel afin d'apprécier les transferts de masse dans le système. Les résultats obtenus (Figure ) montrent un très fort amortissement du signal des pluies pourtant variable sur le domaine (de -2 ‰ à -13 ‰). L'amplitude des variations à la source est de l'ordre de -0.7‰, elle est encore plus faible à la Haute Fageotte située plus bas dans le système de la colline de Lascaux. A partir des pluies efficaces déterminées par le modèle réservoir, le signal moyen pondéré des entrées est de l'ordre de -7.6 ‰ pour -7 ‰ à la sortie du système au sas1. Ces observations démontrent les faibles vitesses de transit dans le système et le rôle très important de filtre du sol et de l'épikarst sur le signal isotopique.

Grâce aux flux d'oxygène 18 mensuels déterminés dans les pluies brutes, les pluies efficaces et en sortie au sas1, il est possible de calculer les proportions d'eau nouvelle à l'exutoire (Lopez, 2009) par bilan de flux. Les résultats montrent qu'à l'échelle du cycle et à partir des pluies brutes seulement 12% des eaux se retrouvent à l'exutoire (Figure ). A partir des pluies efficaces environ 80% des flux isotopiques passent à l'émergence. Ceci montre qu'une partie des eaux restent stockée dans l'épikarst ou passent par d'autres exutoires diffus ou occulte. Ces résultats restent indicatifs car l'échelle de temps utilisé est contrainte par le pas de prélèvement à l'exutoire (15 jours) et la période de cumul des pluies. La méthode permet cependant de confirmer qu'à l'échelle du mois, nous observons une participation d'eau nouvelle de 30 à 40% lorsque l'épikarst est suffisamment rechargé et que les écoulements sont plus directs. Les écoulements sont beaucoup plus retardés à d'autres périodes ce qui confirme les observations réalisées lors de l'étude de la fonction de production ou par l'observation du signal en oxygène18 très amorties pendant le cycle.

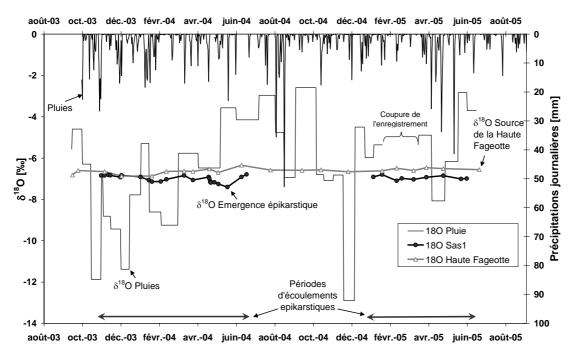


Figure 5 : Evolution des teneurs en oxygène 18 au sas1 de Lascaux, à la source de la haute Fageotte et dans les précipitations de 2003 à 2005

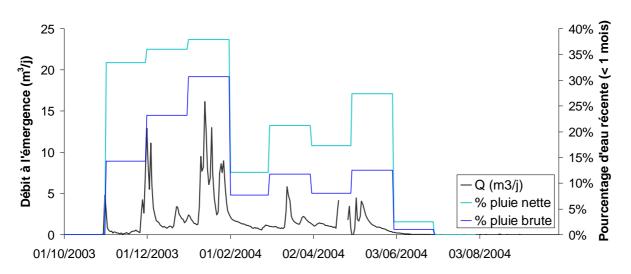


Figure 6 : Calcul du pourcentage d'eau récente (< 1 mois) dans les eaux de l'émergence du Sas1 à partir de la proportion de flux d'oxygène 18 des pluies brutes et des pluies nettes dans les flux à l'exutoire du sas1

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### IV.2 Conditions d'écoulement et d'équilibre des eaux : la méthode ISc\_pCO<sub>2</sub> (Peyraube et al., 2012)

Le système épikarstique de Lascaux est un lieu privilégié pour caractériser le signal chimique et isotopique des eaux d'infiltration. Cependant la configuration de l'exutoire, égouttements au plafond calcaire du sas1 par des concrétions, influe sur le signal calco-carbonique. Les pressions de CO<sub>2</sub> équilibrantes calculées à partir du pH sont donc influencées par les conditions de site ce qui se produit aussi dans d'autres environnements dans les eaux karstiques. C'est le cas de l'émergence du système karstique de la grotte préhistorique de Cussac à côté de Cadouin au sud de la Dordogne. Plusieurs points d'eau étagés dans ce système, de l'épikarst jusqu'à la zone saturée, ont été suivis pendant deux cycles et ont permis de développer une méthode de lecture et d'interprétation du diagramme ISc vs pCO2. Ces deux paramètres sont liés par une relation linéaire de pente 1 (Figure 7). Cette méthode permet de caractériser les conditions d'équilibre qu'ont rencontrées les eaux au cours de leur transit (écoulement diphasique, noyé, milieu fermé), d'évaluer la complexité du fonctionnement d'un système karstique (système plus ou moins compartimenté, mélangeur, plus ou moins karstifié etc.). De plus, il est possible de déterminer la pCO₂sat intrinsèque d'un compartiment ou du système lui même, qui est la pression de CO<sub>2</sub> calculée pour ISc=0 à partir du centre de gravité de l'ensemble des points prélevés. Il s'avère que dans des systèmes à forte composante "zone non saturée" dans les écoulements, les points s'alignent sur une droite de gazage (ISc < 0)\_ dégazage (ISc > 0). C'est ce que l'on a observé dans la source de Cussac et que l'on peut confirmer sur le site puisque les écoulements en amont de la source passent dans la cavité et ont au moins un cheminement reconnu sur 600 mètres en milieu diphasique.

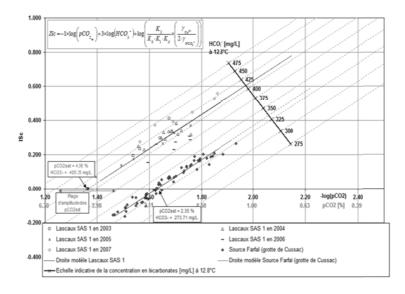


Figure 7 : Représentation des eaux des sources du sas1 de Lascaux et de Farfal à la grotte de Cussac dans le diagramme ISc\_pCO2

A Lascaux les eaux provenant de l'épikarst jusqu'à l'exutoire pour les trois cycles analysés sont systématiquement sursaturées vis à vis de la calcite. Ce sont des eaux qui ont dégazées dans le système ou à l'exutoire. Les pCO $_2$  équilibrantes varient entre 1.5 et 3%. et la pCO $_2$ sat, en moyenne de 4.36 %, peut monter jusqu'à environ 6% comme observée en 2003. Le signal pCO $_2$ sat de l'épikarst montre une certaine variabilité suivant les cycles soit due à la plus ou moins grande production de CO $_2$  dans le sol fonction des conditions climatiques, soit aux conditions d'écoulement dans cette zone (vitesse de transfert fonction de l'importance de la recharge épikarstique).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Ces valeurs indiquent que les eaux ont circulé dans une atmosphère particulièrement riche en CO<sub>2</sub>. Celle-ci a effectivement été mesurée sur le site dans les remplissages du karst (jusqu'à 8.5%) mais aussi en partie basse de la grotte de Lascaux au puits des sorciers (8%) (Denis et al., 2005). L'origine biogénique du CO<sub>2</sub> est confirmée par des analyses en **carbone 13**. Les valeurs trouvées dans les remplissages et le calcaire sont en moyenne de -22,05 ‰ et dans la cavité entre -21.5 ‰ et -22.8 ‰. Dans la cavité de Cussac la pCO<sub>2</sub> varient saisonnièrement de 0.3 % à 3.5 %, et les valeurs de Carbone 13 fluctuent entre -20.5 ‰ et -23.8 ‰. Ces variations sont expliquées par un mélange d'air du massif et de l'atmosphère extérieur, une relation logarithmique liant la teneur en carbone 13 et la pCO<sub>2</sub> de l'air (Peyraube, 2011). A partir des données de carbone 13 dans l'air de la cavité, nous avons reconstitué le signal carbone 13 dans l'air de l'épikarst qui est en moyenne de -23.4 ‰. Puis en considérant les valeurs de carbone 13 dans l'eau et l'alcalinité, et en fixant les conditions d'évolution de l'eau dans le système (dégazage, précipitation...) nous avons pu reconstituer théoriquement la pCO<sub>2</sub> de l'épikarst (Peyraube et al., 2013 a et b).

Un programme de recherche est lancé sur le sujet sachant que la dynamique du  $CO_2$  est très importante pour la conservation des parois ornées de la grotte de Lascaux.

#### **CONCLUSION**

Au cours de ces dernières décennies, de nouveaux outils et de nouvelles méthodes ont permis de progresser dans la connaissance des transferts en milieu karstique. Le système karstique de Lascaux est un lieu privilégié pour l'étude des mécanismes d'infiltration et l'analyse du signal entrée du karst. Nous sommes cependant confrontés dans ce contexte particulier à l'effet d'échelle et à la définition même de système car les limites sont mal définies dans cette zone sub-superficielle du karst. Nos recherches démontrent la variabilité des paramètres physiques et géochimiques dans le temps et l'espace dans cette zone très complexe et il est difficile d'en tirer une loi de comportement uniforme. L'épikarst a un rôle prépondérant dans la régulation de la fonction entrée pour la réponse hydrodynamique des systèmes karstiques et dans le marquage chimique et isotopique des eaux d'infiltration que l'on retrouvera après transfert à l'exutoire.

#### Références bibliographiques

Denis A., Lastennet R., Huneau F. and Malaurent P., 2005 – Identification of functional relationships between atmospheric pressure and CO2 in the cave of Lascaux using the concept of entropy of curves. Geophysical Research Letters, vol. 32, L05810

Lastennet R., Denis A., Malaurent P., Vouvé J., 1999 – Behaviour of the epikarstic aquifer: signal analysis and flow analysis. Site of LASCAUX cave. Acte et présentation orale. I symposium of Geology Nerja Cave, Malaga (Espagne), 17-20 juin 1999.

Lopez B., 2009 – Les processus de transfert d'eau et de dioxyde de carbone dans l'épikarst. Ph. D. thesis, Bordeaux Univ.

Peyraube N., Lastennet R. and Denis A., 2012 – Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of a karstic massif, using the Pco2-SIc relationship. Journal of Hydrology, vol. 460, 13-24.

Malaurent P., Lacanette D., Brunet J., Riss J., 2011. – Climatologie du milieu souterrain à Lascaux: d'une étude globale à la microclimatologie des parois. eds FMSH, pp 121-143.

Mangin A., 1984 - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrale. Journal of Hydrology, 67(1-4), p25-43.

Peyraube N., 2011 - Apports des équilibres calco-carboniques et du carbone 13 pour l'étude de l'air et des écoulements d'eau dans la zone non saturée du karst. Ph. D. thesis, Bordeaux Univ. 350p.

Peyraube, N., Lastennet, R., Denis, A., 2013a - estimation of epikarst air Pco2 using measurement of water d13CTDIC, cave air Pco2 and d13Co2. In Press Geochemica et Cosmochimica Acta.

Peyraube, N., Lastennet, R., Denis, A., 2013b - CO2 baseline estimation in unsaturated zone of limestone aquifers, using the Pco2-SIc relationship. In press, Geophysical Research Letters.

Schoeller H, 1965, - Etude géologique, hydrogéologique et climatologique de la grotte de Lascaux pendant le cycle 1964-1965. Rapport pour la première commission scientifique internationale de la grotte de Lascaux, université Bordeaux1, France, 97p.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Comment les variations spatiales de la géochimie des eaux souterraines de la craie sont-elles liées aux processus d'infiltration et aux formations superficielles dans la ZNS ?

S. Barhoum <sup>(1)</sup>, D. Valdés-Lao <sup>(1)</sup>, R. Guérin <sup>(1)</sup>, P. Gombert <sup>(2)</sup>, J. Benmamar <sup>(1)</sup>

(1) UMR 7619 Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, Paris ; <sup>(2)</sup>

Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS), Verneuil-en-Halatte sarahbarhoum@upmc.fr, daniele.valdes\_lao@upmc.fr, roger.guerin@upmc.fr, philippe.gombert@ineris.fr, jamel.benmamar@upmc.fr

#### I. INTRODUCTION

Avant les années 70, il était admis que la zone non saturée (ZNS) de la craie était drainée par la fracturation. En 1970, il est démontré que la vitesse des écoulements à travers la ZNS est de l'ordre du mètre par an et donc que la majorité des écoulements (75%) se fait à travers la matrice [1]. Depuis, de nombreuses études ont confirmé la prédominance des écoulements à travers la matrice [2]; [3]; [4]; [5].

Les écoulement à travers la fracturation ne sont amorcés que lorsque la pression de condensation est suffisante [6]. La fracturation ne participe donc aux écoulements qu'à proximité de la nappe ou lors d'événements pluvieux importants [7]; [8]; [9].

La diffusion entre la fracturation et la matrice tend à égaliser les concentrations en solutés dans les deux domaines d'écoulements [10]; [11]. Toutefois, lors d'événements climatiques intenses, l'équilibre des solutés entre la matrice et les fractures n'est temporairement plus atteint [5].

L'étude des concentrations en ions majeurs des eaux souterraines couplée à celles des paramètres physicochimiques peut permettre d'identifier les différents processus qui ont lieu au sein de la zone non saturée. On distingue ainsi des groupes d'ions provenant de différentes origines [12] :

 $HCO_3^-$  et  $Ca^{2+}$  sont les deux principaux ions autochtones marqueurs de la dissolution de la craie auxquels on peut ajouter l'ion  $Mg^{2+}$  qui peut provenir de la dissolution d'une craie dolomitique.

Les ions  $Mg^{2+}$  et  $K^+$  pourrait également avoir une origine allochtone et provenir des argiles à silex qui constituent souvent les formations superficielles surmontant des formations crayeuses.

D'autres ions comme Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> peuvent être d'origine météorique. Cl<sup>-</sup> est conservatif tandis que Na<sup>+</sup> peut être retenue dans la ZNS [13]. L'évolution comparée de ces deux ions peut donc nous renseigner sur le temps de résidence des eaux dans la ZNS et sur les phénomènes de concentration et de dilution des eaux sous l'effet de l'évapotranspiration ou de la recharge.

Enfin, d'autres ions dont NO<sub>3</sub> sont des marqueurs anthropiques, généralement d'origine agricole, très fréquents dans les eaux souterraines.

Des lacunes subsistent dans la compréhension du rôle de la nature et de la structure de la zone non saturée et notamment du rôle des formations superficielles (FS) sur les écoulements, sur les transferts de solutés et sur la géochimie des eaux souterraines. Cette étude s'appuie sur un site expérimental permettant l'accès à l'interface entre la ZNS et la nappe de la craie. Il s'agit d'une ancienne carrière souterraine de craie. Des eaux provenant de la ZNS percolent au plafond et la nappe de la craie affleure au fond de la cavité formant une vingtaine de « lacs » souterrains. Dans un premier temps la variation spatiale de la géochimie des eaux souterraine a été étudiée. Dans un second temps, la ZNS a été étudiée afin de comprendre comment et par l'intermédiaire de quels processus celle-ci peut influencer la qualité des eaux souterraines.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### II. SITE D'ETUDE

Le site expérimental se trouve à Saint Martin le Nœud, au sud de Beauvais (Oise). Il s'agit d'une ancienne carrière souterraine de craie qui s'étend sur 1200 m de long, 150 m de large, et se situe à environ 30 m de profondeur (figure 1).

Cette cavité est particulièrement intéressante pour étudier le rôle des formatons superficielles et des processus d'infiltration et de dissolution de la zone non saturée sur la géochimie des eaux car :

- elle permet d'accéder à l'interface entre la zone non saturée (ZNS) et la zone saturée (ZS): des eaux percolent du plafond de la cavité en provenance de la zone non saturée et la nappe de la craie affleure en formant une vingtaine de lacs souterrains tout au long de la cavité (figure 2).
- la zone non saturée comprend des formations superficielles plus ou moins épaisses constituées d'argiles à silex et de lœss surmontant les différentes couches de craie.

Dans la suite de l'étude, on s'intéressera plus particulièrement à 3 lacs souterrains : le lac Bleu, le lac des Stalactites et le lac Pedro (figure 1).

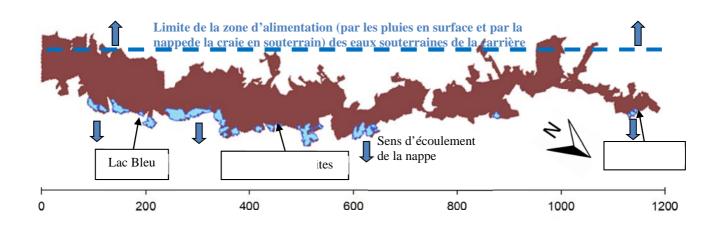


Figure 1 : délimitation de l'enveloppe de la carrière souterraine de Saint Martin le Nœud et de ses principaux lacs

#### **III. METHODOLOGIE ET DONNEES**

#### III. 1 Caractérisation des eaux souterraines

La dynamique temporelle et l'hétérogénéité spatiale des eaux souterraines (lacs et percolation) ont été suivies grâce à l'enregistrement en continu de différents paramètres hydrogéochimiques (température, conductivité, pH, ...) et de la hauteur d'eau des lacs souterrains. Des campagnes de terrain régulières ont permis de compléter ces enregistrements en réalisant notamment des prélèvements d'échantillons d'eaux. Les échantillons prélevés ont été analysés en chromatographie ionique afin de connaître la concentration en ion majeur des eaux.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

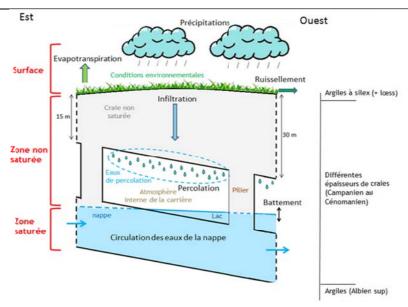


Figure 2 : Coupe schématique de la cavité

#### III. 2 Caractérisation de la zone non saturée

Les premiers résultats de géochimie ont permis de sélectionner des points à étudier en priorité.

Une dizaine de points sélectionnés tout au long de la cavité ont été géolocalisés en X, Y, et Z grâce à l'Underground GPS (UGPS) de l'INERIS, afin de connaître le positionnement exact de la cavité ainsi que l'épaisseur de la ZNS.

La nature et la structure de la ZNS et des FS ont été étudiées grâce à la réalisation de deux tomographies de résistivité électrique (non invasives) et du creusement de trois fosses en surface, au-dessus de la cavité.

#### **IV. RESULTATS et INTERPRETATION**

Les résultats présentés dans cette partie sont ceux obtenus durant l'année hydrologique 2011-2012.

#### IV. 1 Géochimie des eaux souterraines

Cette période d'étude a été relativement sèche avec une très faible recharge ainsi qu'une percolation quasi inexistante dans la carrière.

Seules les eaux des lacs souterrains ont pu être échantillonnées et analysées. Néanmoins on a pu constater visuellement, lors des campagnes de terrain, que la percolation était nulle au lac des Stalactites mais significative au lac Pedro.

La variation temporelle de la géochimie des eaux des lacs est très faible avec une baisse générale du niveau d'eau des lacs.

#### Hétérogénéité spatiale des paramètres physicochimiques

Les paramètres physicochimiques ont été mesurés dans les lacs souterrains lors de 9 campagnes de terrain s'étalant de fin Janvier 2012 à novembre 2012. La figure 3 présente les boites à moustaches de chaque paramètre en fonction de la distance des lacs projetée sur un axe Sud/Nord le long de la cavité.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

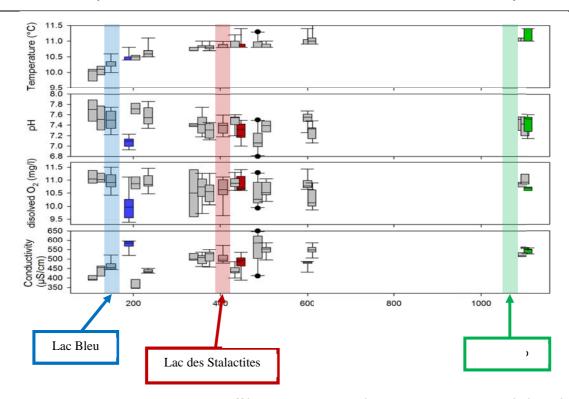


Figure 3 : Physicochimie des eaux des différents lacs organisés suivant leur distance à l'entrée de la cavité

La température moyenne des lacs est organisée spatialement, les plus froids sont les plus proches de l'entrée ainsi que du puits d'aération de la cavité, leur température étant probablement influencée par les échanges avec la surface par le biais de ces ouvertures.

Le pH, l'oxygène dissous et la conductivité ne semblent pas organisés spatialement. Une hétérogénéité spatiale importante peut être observée. Les variations de ces trois paramètres semblent cohérentes : en effet il est possible de distinguer d'une part des eaux plus acides, plus faiblement minéralisées et riches en oxygène, se rapprochant d'eaux de surface et d'autre part des eaux légèrement plus basiques, une minéralisation plus forte et une oxygénation plus faible, plus proches d'eaux souterraines.

#### Hétérogénéité spatiale de la géochimie des eaux des lacs souterrains

La géochimie est très différente d'un lac à l'autre, ce qui est inattendu à l'échelle de la carrière. Tous les ions majeurs varient spatialement (figure 4).

Il est possible de distinguer différentes familles d'ions dont les variations sont similaires :

- Mg<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup>
  - o origine autochtone (provenant de la part dolomitisée de la craie)
  - o origine allochtone (peuvent être liées à la présence d'argiles<sup>12</sup>)
- Ca<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (exception faite des trois derniers lacs de la carrière)
  - o origine autochtone (provenant de la craie)
- $NO_3$ , Cl et  $SO_4^2$ 
  - o origine allochtone et anthropique (provenant des intrants utilisés en agriculture)

Les trois derniers lacs (dont le lac Pedro) montrent de fortes concentrations en  $Ca^{2+}$  et  $NO_3^-$  qui pourraient résulter de l'utilisation du nitrate de calcium  $Ca(NO_3)_2$  comme fertilisant.

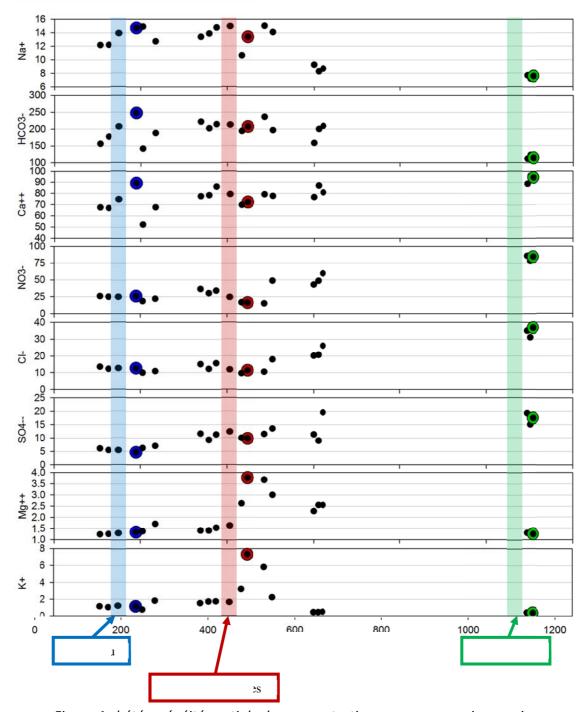


Figure 4 : hétérogénéité spatiale des concentrations moyennes en ions majeurs.

#### IV. 2Nature et structure la ZNS

Hétérogénéité spatiale de l'épaisseur de la ZNS et des FS

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Les résultats de l'UGPS, des tomographies de résistivité électrique et de l'observation des trois fosses creusées au-dessus du lac Bleu, du lac des Stalactites et du lac Pedro (figure 5), ont permis de mettre en évidence l'hétérogénéité spatiale de l'épaisseur de la ZNS (environ 30 m d'épaisseur pour le lac Bleu et le lac des Stalactites et 22 m au lac Pedro) ainsi que des FS (de 0 cm au-dessus du lac Pedro à plus de 2,45 m au-dessus du lac des Stalactites). Ces formations sont constituées d'argiles à silex et localement de lœss.

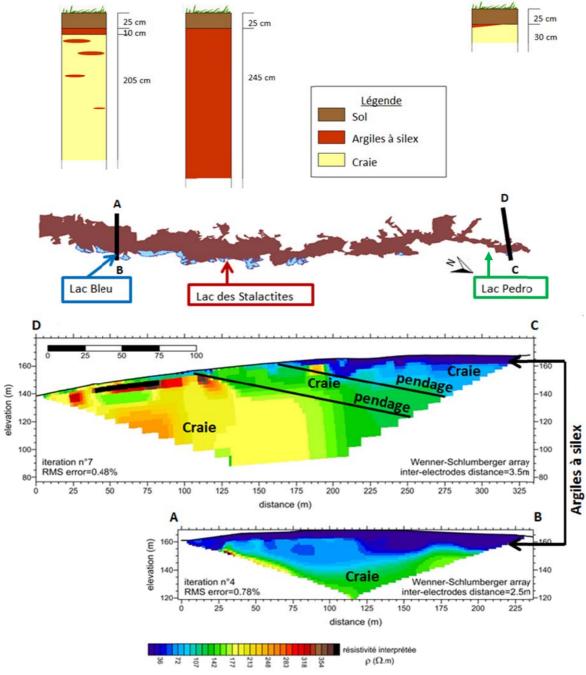


Figure 5 : Résultats des tomographies électriques et des fosses creusées à dessus de la cavité.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### V. UNE RELATION SPATIALE ENTRE LA ZNS ET LA GEOCHIMIE

Les lacs souterrains résultent d'un mélange entre les eaux de la nappe de la craie et les eaux de percolation au toit de la cavité.

Trois différents lacs peuvent être distingués, d'une part par leur géochimie et d'autre part par la nature et l'épaisseur des formations qui les surplombent :

#### Le lac Bleu:

- Aucune percolation
- Forte conductivité, pH plus faible, teneur en O₂ dissous plus faible
- Fortes concentrations en HCO₃ et en Ca²+
- Forte épaisseur de ZNS
- Faible à moyenne épaisseur de FS

#### Le lac des Stalactites

- Faible percolation
- Fortes concentrations en Mg<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup>
- Forte épaisseur de ZNS
- Forte épaisseur de FS

#### Le lac Pedro

- Percolation moyenne
- Fortes concentrations en ions d'origine agricole (NO<sub>3</sub>) et de faibles concentrations en HCO<sub>3</sub>
- Plus faible épaisseur de ZNS
- Quasi absence de FS

A première vue, il est donc possible de relier la géochimie des lacs à la nature et à la structure de la ZNS.

L'absence ou la faible épaisseur d'argile à silex pourrait faciliter un transfert rapide des eaux depuis la surface jusqu'à la nappe.

Au contraire, de fortes épaisseurs d'argile à silex formeraient une « couche protectrice » peu perméable limitant les transferts d'ions depuis la surface tout en marquant la géochimie des eaux par une surabondance des ions  $Mg^{2+}$  et  $K^+$ .

Des chemins préférentiels d'écoulements entrainent une variabilité spatiale de la percolation dans la cavité et il est à noter que les zones où la percolation est la plus abondante sont aussi celles où les concentrations en « ions de surface » sont les plus élevées et où les concentrations en ions provenant de la dissolution de la craie sont les plus faibles. Il est possible que, dans ces zones, les écoulements soit plus rapides, entrainant une plus faible dissolution de la roche.

#### **CONCLUSION**

Les études portant sur l'influence des formations superficielles sur la géochimie des eaux de la nappe de la craie s'intéresse généralement au fait que la nappe peut devenir captive sous ces formations, ce qui va entrainer une modification de la qualité des eaux. A notre connaissance, aucune étude n'a porté sur le lien direct entre la présence et la nature des formations superficielles et la géochimie des eaux de la nappe de la craie. Le site expérimental de Saint-Martin-le-Nœud a permis de mettre en évidence une forte variation d'hydrogéochimie des lacs souterrains. Ces lacs sont un mélange entre les eaux de percolation provenant de la ZNS et les eaux de la nappe de la craie qui affleurent au fond de la carrière souterraine. Or la quantité et la qualité des eaux de percolation varient à l'échelle de la cavité et cette variation est à mettre en lien avec la nature et la structure de la ZNS. L'étude a pu mettre en évidence que l'épaisseur des formations superficielles était très différente d'un point

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

à un autre. Cependant trop peu de points ont été étudiés et il sera nécessaire d'approfondir les connaissances sur les FS. L'étude des FS réalisée grâce à l'EM31 (méthode électromagnétique) doit permettre de cartographier leur épaisseur au-dessus de la cavité.

L'hiver 2012/2013 a été très pluvieux et l'on a pu constater une reprise de la percolation suivie d'une forte augmentation du niveau d'eau des lacs. Des échantillons d'eaux de percolation et d'eaux des lacs ont pu être prélevés et sont en cours d'analyse. L'étude de l'hétérogénéité de la réponse des différents lacs à ce nouveau forçage climatique doit permettre de compléter les résultats obtenus pendant la première année. Ces premiers résultats mettent en évidence qu'à la limite ZNS/ZS, les données de géochimie mesurées en un point ne sont pas représentatives de l'ensemble du site d'étude et qu'il est donc nécessaire de comprendre les processus qui contrôlent la qualité et la quantité des eaux souterraines.

#### Remerciements

Nous souhaiterions remercier le Conservatoire des Esp aces Naturels de Picardie qui a autorisé et facilité l'accès à la carrière souterraine de Saint Martin le Nœud, site classé pour la protection des chiroptères.

#### Références bibliographiques

- [1] Smith, D. B., Wearn, P. L., Richards, H. J. & Rowe, P. C., 1970 Water movement in the unsaturated zone of high and low permeability strata by measuring natural tritium. *IAEA Symposium on Isotope Hydrology*, pp 73–87.
- [2] Wellings, S. R., 1984 Recharge of the Upper Chalk aquifer at a site in Hampshire, England: 1. Water balance and unsaturated flow. *Journal of Hydrology*, *N°69*,*pp* 259–273.
- [3] Zaidman, M. D., Middleton, R. T., West, L. J. & Binley, A. M., 1999 Geophysical investigation of unsaturated zone transport in the Chalk in Yorkshire. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, N°32, pp 185–198.
- [4] Mathias, S. A., Butler, A. P., McIntyre, N. & Wheater, H. S., 2005 The significance of flow in the matrix of the Chalk unsaturated zone. *Journal of Hydrology, N°310, pp 62–77.*
- [5] Ireson, A. M., Mathias, S. A., Wheater, H. S., Butler, A. P. & Finch, J., 2009 A model for flow in the chalk unsaturated zone incorporating progressive weathering. *Journal of Hydrology, N°365, pp 244–260.*
- [6] Price, M., Low, R. . & McCann, C., 2000 Mechanisms of water storage and flow in the unsaturated zone of the Chalk aquifer. *Journal of Hydrology, N°233, pp 54–71*.
- [7] Johnson, A. C. *et al.*, 2001 Penetration of herbicides to groundwater in an unconfined chalk aquifer following normal soil applications. *Journal of Contaminant Hydrology,N°53, pp 101–117.*
- [8] Haria, A. H., Hodnett, M. G. & Johnson, A. C., 2003 Mechanisms of groundwater recharge and pesticide penetration to a chalk aquifer in southern England. *Journal of HydrologyN° 275, pp 122–137.*
- [9] Brouyère, S., Dassargues, A. & Hallet, V., 2004 Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation. *Journal of Contaminant Hydrology*, N°72, pp 135–164.
- [10] Foster, S. S. D., 1975 The Chalk groundwater tritium anomaly. A possible explanation. *Journal of Hydrology*, N°25, pp 159–165.
- [11] Van den Daele, G. F. A. *et al.*, 2007 Unsaturated flow and solute transport through the Chalk: Tracer test and dual permeability modelling. *Journal of Hydrology, N°342, pp 157–172*.
- [12] Stuart, M. E. & Smedley, P. L., 2009 Baseline groundwater chemistry: the Chalk aquifer of Hampshire. *British Geological Survey*.
- [13] Sun, H., Huffine, M., Husch, J. & Sinpatanasakul, L., 2012 Na/Cl molar ratio changes during a salting cycle and its application to the estimation of sodium retention in salted watersheds. *Journal of Contaminant Hydrology*, N°136–137, pp 96–105.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Origine de la salinisation des eaux souterraines en zone saharienne : Exemple de la nappe alluviale de la palmeraie de Béni Abbes (Vallée de la Saoura, Sud Ouest algérien)

#### T. Merzougui<sup>12</sup>, A. Bouanani<sup>2</sup>, K. Baba-Hamed<sup>2</sup>, A. Mekkaoui<sup>3</sup>

1 : Agence nationale des ressources hydrauliques- secteur -Bechar. BP 63 Hai El Feth 08018 BECHAR Email: touhamime@yahoo.fr

2 Laboratoire n°25, Faculté des Sciences de la nature et de la vie et de sciences de la terre et del'univers, département des sciences de la terre et de l'univers,

BP. 119, Université de Tlemcen, Tlemcen b

3: Institut d'Architecture, de Génie civil, et d'Hydraulique, B.P. 417, Université de Bechar, Algérie, 08000.

#### Résumé

La nappe des terrasses alluviales de la palmeraie de Béni Abbes est soumise à un climat hyperaride. Le problème de salinité des eaux souterraines est causé par plusieurs facteurs humains et naturels, engendrant des sérieux problèmes d'irrigation.

Les analyses hydrochimiques sur un intervalle de 40 ans, montrent une évolution spatio-temporelle de la alarmante de la salinité: l'assèchement de la vallée de la Saoura dû, d'une part à l'impact de la construction du barrage de Djorf torba, d'autre part à la forte évaporation qui règne, ont sérieusement affecté la qualité des eaux de l'inféro-flux.

En plus de la diffusion de la salinité à travers le drain naturel, la surexploitation des eaux des terrasses de la vallée de la Saoura et la prolifération anarchique des puits en quête d'eau douce, destinées à l'irrigation de la palmeraie conduisent à une accélération spectaculaire de ce phénomène destructeur de tout le système hydrogéologique de cette région. Une telle analyse comparative à l'avantage de permettre d'apprécier certaines influences soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères sur l'acquisition Des caractéristiques chimiques des eaux.

Mots clés: Salinité, Hydrochimie, Béni Abbès, la Saoura, inféro-flux, Sahara, aride, Palmeraie.

#### I. INTRODUCTION

Les nappes d'eaux souterraines en zone aride ou hyperaride ont des caractéristiques hydrogéologiques et hydrogéochimiques classiques, leurs conditions de réalimentation et d'exploitation induisent des problèmes particuliers dont on doit tenir compte lors de leur caractérisation.

La palmeraie de Béni Abbés s'étend sur la rive gauche de la vallée de la Saoura, de 6 km de longueur et 5 km de largeur en moyenne couvrant une superficie de 40 hectares. Elle puise de l'eau à partir de la grande source, des foggaras et les puits creusés dans les terrasses alluviales et d'inféro-flux de l'oued Saoura. Toutefois, on constate que le phénomène de salinité des eaux souterraines devient de plus en plus menaçant. En effet le problème causé par plusieurs facteurs humains et naturels, engendre de sérieux problèmes d'irrigation. Cette palmeraie a perdu 60 % de sa superficie et environ trois tiares de ses palmiers. La maladie de « Bayoudh », des transformations socio- économiques et des décisions parfois médiocres ont contribué à cette détérioration de la palmeraie.

Cette région connaît depuis une trentaine d'années un important essor économique avec un grand développement surtout agricole associé à une forte expansion démographique. Par conséquent les eaux

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

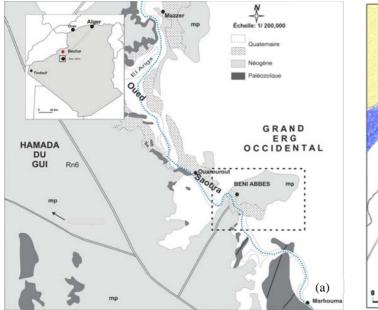
souterraines de la région sont de plus en plus sollicitées par les habitants des Oasis où on note une dégradation de la qualité des eaux dans les périmètres irrigués avec la présence de forte salinité qui pose le problème quant à son utilisation comme eau potable et d'irrigation.

Notre objectif est de contribuer à comprendre le processus et l'origine de salinisation des eaux souterraines dans ces zones en En se basant sur l'évolution spatio-temporelle des éléments chimiques majeurs et mineurs.

#### **II. SITUATION GEOGRAPHIQUE**

L'oasis de Béni Abbès s'affiche comme la capitale des Oasis de la Saoura. Elle est située à environ 240 km au Sud Ouest de Bechar et à 880 Km au Sud Ouest d'Alger (fig.1 a). La vallée de la Saoura résultant de la jonction des oueds Guir et la Zouzfana, représente le principal cours d'eau du Sahara nord occidental de l'Algérie. Elle est bordée à l'Est par le Grand Erg occidental, à l'Ouest par la Hamada du Guir et la Petite Hamada. Au niveau de la basse Saoura, elle touche les monts de l'Ougarta (Conrad G, Roche MA, 1965.).

L'aquifère alluviale de la palmeraie s'étend sur une superficie d'environ 40 ha (fig. 1.b). Le climat aride de la région se caractérise par une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 30 et 40 mm. L'été est chaud et sec, l'hiver froid et sec. L'évaporation annuelle est importante (autour de 2012 mm/an).



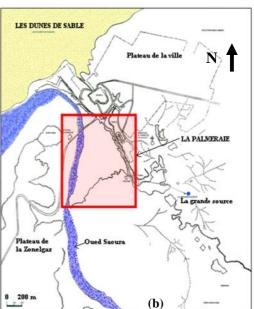


Figure 1 a: carte de localisation de Béni AbbesFigure 1.b. Situation de la palmeraie de Béni Abbés (Roche1973, Modifiée)

Figure 1. Situation géographique de Béni Abbes

#### III.CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUE DE LA NAPPE DE LA PALMERAIE

#### III. 1 Condition de gisement et alimentation

Le système aquifère met en scène deux unités lithologiques : les calcaires et marnes sableuses du Mio-pliocène et les formations quaternaires. Le réservoir est constitué par des dépôts quaternaires composés par trois couches (sable, argile sable, conglomérat) d'épaisseur moyenne de quinze mètres, l'ensemble repose sur un substratum schisteux dévonien supérieur plissé (fig.2). L'épaisseur moyenne de l'aquifère alluviale varie entre 10 à 30 m.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

La recharge de la nappe alluviale de la palmeraie est assurée par l'infiltration des eaux de la grande source (débit 28l/s); par l'apport latéral des eaux de la nappe de l'erg d'un drain naturel (roche 1973) et occasionnellement par les crues de l'oued Saoura.

#### III. 2 Débit de la nappe et d'exploitation

La palmeraie principale, est irriguée par les eaux de la grande source et le prélèvement des puits creusés dans l'aquifère alluvial. Le débit déversé en continu est voisin de 8 l/s (jaugeage 2008), présente le 1/3 de la quantité déversée pendant les années soixante, soit 0,22 l/s/ha ou une hauteur d'eau irriguée de 683,35 mm/an.

Les sources et foggara drainant l'eau dans le talus néogène fournissent au total un débit inférieur à 3 m³/h, l'autre débit qui passent par les assises inférieures du Mio- Pliocène puis dans les terrasses quaternaires (80l/s), donne un débit total de 83 l/s.

Le système aquifère est exploité par 40 puits, dont la plus part sont équipés de pompes et moto pompes. Les prélèvements sont évalués à 52 l/s et le débit de vidange de la nappe vers l'oued est évalué t à 20 l/s. Aussi, une quantité de 20 l/s qui s'évapore, avec un déficit de l'ordre de 12 l/s traduit la surexploitation intense de la réserve régulatrice annuelle, ce qui se marque par la baisse continue du niveau piézométrique et l'intrusion du biseau salé le long de l'oued Saoura (inféro- flux).

La transmissivité des formations quaternaires, calculée sur deux piézomètres un situé à 200 m au nord du ksar et l'autre près de la piscine, est égale à 2 10<sup>-4</sup> et 4.4 10<sup>-4</sup> m²/s. Les valeurs des coefficients d'emmagasinement au niveau de la nappe de la palmeraie varient de 0.02 et 0.059 au Nord, au Sud les valeurs s'échelonnent entre 0.014, 0.038 et 0.0011.

Vingt et un puits bien repartis dans toute la palmeraie ont été suivis afin de tenter une surveillance de l'écoulement souterrain de l'erg vers l'oued.

#### III. 3 Evolution piézométrique de la nappe de la palmeraie (Fig. 3)

Nous considérons d'abord trois situations piézométriques : celles de 1973, 1991, 2008 et 2009.

La piézomètrie de 1973 (Roche, 1973) a permis d'identifier le sens d'écoulement naturel de la nappe, qui se fait du Nord- Est vers le Sud- Ouest en direction de l'oued Saoura. L'oued Saoura draine la nappe alluviale.

La piézomètrie de 1991(Yousfi, 1991), a permis d'enregistrer une nouvelle avancée des valeurs de rabattement de la nappe de la palmeraie. L'aggravation de la situation piézomètrique, souligne un rabatement de 1m liée à la réalisation de nouveaux puits, à l'approfondissement des puits existants et à l'augmentation des volumes pompés suite à l'électrification des pompes. Cette situation critique est due essentiellement à la sollicitation continue de l'aquifère et à la diminution de la part de la palmeraie en quantité d'eau d'irrigation de 2/3 à 1/3 (17L/s à 8L/s).

L'état piézomètrique de 2008 et 2009(Fig4), indique qu'à proximité du talus hamadien une baisse de niveau piézomètrique, accompagnée d'une augmentation alarmante de la salinité, elle montre aussi que les dépressions observées ne font que l'accroître avec le temps. En effet, la recharge naturelle (drain naturel) n'arrive pas à couvrir l'extraction et le niveau du plan d'eau de l'inféro flux de la surface de la palmeraie. Durant notre période d'observation en 2008 et 2009, la profondeur de la surface piézométrique dans l'aquifère, ne dépasse pas 10 m (puits 7), dans la plus part des puits, elle se trouve dans une moyenne de 6 m. En 1973, la profondeur se situait souvent entre 3 et 5 m, actuellement elle s'échelonne entre 2 et 9m. L'état piézomètrique de 2008 et 2009, enfin marque la poursuite de l'évolution vers un abaissement du niveau piézométrique et une augmentation de la salinité, actuellement la nappe est presque stable.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

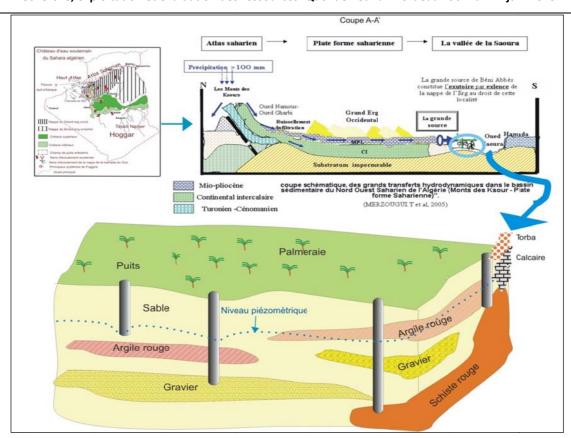


Figure 2 : Condition et gisement des aquifère alluviale de la palmeraie

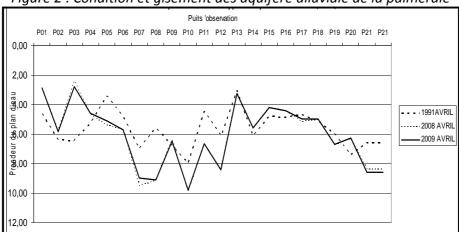


Figure 3 : Evolution du plan d'eau de la nappe de la palmeraie.

Les campagnes de mesures annuelles ont permis de tracer les courbes d'évolution du plan d'eau dans l'aquifère alluvial de la palmeraie (Fig. 3 et 4)

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

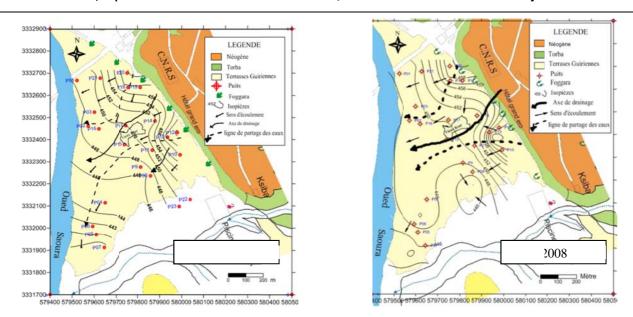


Figure 4: Carte piézométrique de la nappe alluviale de la palmeraie

#### VIII. SYSTEME AQUIFERE ET EVOLUTION HYDROGEOCHIMIQUE

Le système aquifère de Béni Abbès comprend des nappes plus ou moins importantes. Pour caractériser hydrochimiquement l'eau de chaque nappe et d'estimer leur origine en les corrélant avec la géologie et la piézométrie. Nous avons procédé à une compilation des données sur un intervalle de 60 ans, en effet plusieurs analyses à notre possession remontent aux années 1963 et 2008 (tab.1).

La série de données hydrochimiques recueillie est discontinue, mais elle s'avère très utile dans l'étude de l'évolution spatio-temporelle des constituants physico-chimiques, néanmoins elle permet de tracer des histogrammes et des cartes des quantités de sels dissous, ainsi que la migration exogène de la salinité.

En ce qui concerne la nappe des terrasses, l'évolution est nettement soulignée de l'ouest vers l'Est. Les valeurs des cations et des anions se sont multipliées par 3 à 7 fois au niveau des terrasses 3, deux fois dans les terrasses 2 et 1.5 fois au niveau des terrasses1.

Les eaux de la nappe du Grand Erg occidental et de la Hamada du Guir, présentent une modeste évolution chimique, elles se caractérisent par un pH neutre et des teneurs en minéralisation très faible. En revanche, selon leur disposition par apport à l'axe de l'Oued, les nappes des terrasses et l'inféro-flux, montrent une évolution alarmante.

En 1966 (fig5); Seul l'inféro-flux, montre une teneur en résidu sec de 5,1 g/l. Au niveau des différentes terrasses cette concentration n'excède pas la valeur de 2 g/l.

En 2005 (Fig. 5); les eaux des terrasses et de l'inféro-flux se chargent d'avantage en résidu sec de 4 à 20 g/l.

#### IV.1 Evolution de la salinité de la nappe de la palmeraie (Fig.5)

Roche (1963) a décrit dans sa thèse, que les eaux de la zone le long de l'oued Saoura a des concentrations en sel relativement faibles, ne dépassant pas les 2g/l, ce qui est expliqué par l'infiltration des eaux d'irrigation de la grande source avec une quantité importante et des crues de l'oued Saoura dans l'aquifère alluviale de la palmeraie. Les eaux de la partie amont de la nappe accusent des teneurs très faibles. Par contre (Yousfi 1991), a trouvé des valeurs de la salinité supérieur à 3 g/l. l'assèchement de l'oued Saoura, et la diminution de la part de

#### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

#### recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

la quantité d'eau destinée à l'irrigation, sont les principales causes. La recharge de la nappe alluviale ayant baissée.

Cette forte salinité peut être expliquée par la nature géologique, du remplissage alluvionnaire, l'évolution anarchique des puits et l'augmentation de pompage ont traduit un appel des eaux de l'inféro- flux chargées en sel.

Avec la carte de 2008 on peut identifier trois zones de salinité, de la moins concentrée (0,3 à 3g/l) au centre de la palmeraie (3 à 7g/l) à la plus concentrée (20 g/l) au Sud-Ouest (près de l'oued Saoura)

En conclusion, l'augmentation de la salinité explique le nombre élevé des puits de surface abandonnés, l'exploitation excessive, dépassant généralement le pouvoir régulateur de l'aquifère, entraînant une dégradation continue de la qualité des eaux causée par les activités anthropiques et agronomiques. Cette augmentation de la salinité influe essentiellement sur le rendement des cultures par la destruction de la structure du sol. La faible salinité en bordure du talus hamadien est assurée grâce à la recharge latérale régulière par le drain naturel d'une part, et par la recharge artificielle des eaux d'irrigations de la grande source de bonne qualité d'autre part.

Les résultats de l'étude hydrochimique sur un profil, confirme un écoulement souterrain lent; les valeurs moyennes permettent de distinguer trois types de comportement des éléments analysés :

Le premier ensemble d'éléments, regroupant le pH, la CE, le RS, HCO3-, Ca 2+, Mg+2, Na+, K+, et le Cl-Le second ensemble est caractérisé par des évolutions très nettes de la salinité.

Tableau 1: caractéristiques Hydrochimiques des différentes nappes à Béni Abbès.

Groupe d'eau	Année	рН	Res. sec	Ca++	Mg++	Na+	K+	Cl-	SO4	НСО3
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Eaux de nappe du grand erg occidental	1966	7.6	530	75	30	50	15	90	600	285
	2005	7.7	556	96	27	40	10	80	850	310
	2008	7,5	300	48	33	28	5	45	120	119
Eaux nappe des terrasses alluviales 1	1963	7.5	625	110	40	90	12	85	900	400
	2005	7.4	862	98	39	78	09	220	123	76
	2008	7,19	960	138	56	97	10,5	165	220	308
Eaux nappe des terrasses alluviales 2	1963	7.5	430	100	40	100	30	300	350	350
	2005	7.7	3250	180	78	205	45	320	359	-
	2008	7,09	8050	473	632	2300	70	900	1500	305
Eaux nappe des terrasses alluviales 3	1963	7.3	2000	120	45	280	50	210	290	300
	2005	7.2	15000	400	1076	2500	230	8000	1630	400
	2008	6,8	9245	516	659	1800	26	2850	3000	476
Eaux nappe de l'inféro-flux	1963	7.5	5802	148	52	95	15	180	220	400
	2005	7.1	20587	1100	1076	3380	230	8400	2230	100
	2008	7.2	15587	2100	1080	2380	300	7400	3230	440

#### IV.2 Origine de la salinité de l'aquifère alluviale de la palmeraie

Des campagnes de mesure de la salinité à différents horizons ont été effectuées dans les zones1, zones 2 et zone 3 ainsi que l'inféro-flux (Fig6).

Zones1: une eau de bonne qualité, de 1g/l à 2g/l de salinité.

Zones 2 : la salinité évolue de 2g/l à 5g/l, contient une eau de qualité moyenne.

Zones 3 : une eau de qualité médiocre. La salinité est élevée et évolue de 5g/l à 15g/l.

Zone 4 de (Inféro- Flux): une eau de mauvaise qualité chimique. La salinité dépasse 15g/l.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

La salinité et donc plus importante au fond de la vallée (oued), qu'en amont de la nappe près du talus hamadien ce qui confirme l'intrusion du biseau salée observée le long de la nappe de l'inféro-flux à la lisière de l'oued. L'interprétation des analyses chimiques par la méthode de Piper montre en outre que la plus part des échantillons d'eau de la zone numéro un de la première terrasse une et de l'inféro-flux sont chlorurés sodiques, ce qui est cohérent avec l'hypothèse de la salinisation de l'aquifère par l'avancé de l'inféro-flux vers les trois terrasses.

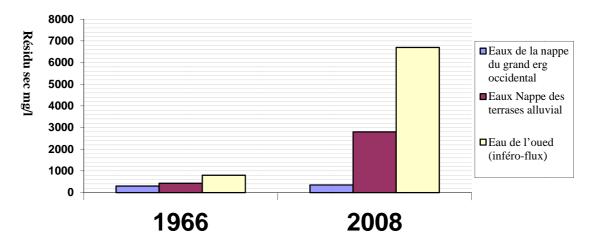


Figure5 : Evolution du résidu sec des eaux des nappes de la région de Béni Abbès

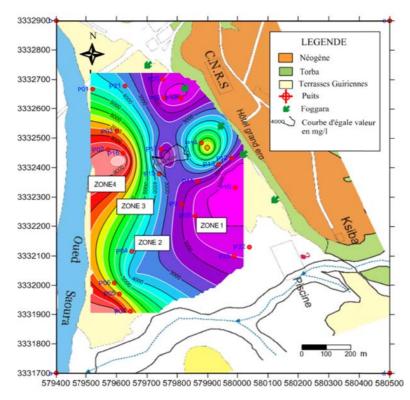


Figure 6 : Zonation selon la salinité des eaux de la nappe de la palmeraie 2008.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### IX. RESULTATS ET DISCUSION

L'interprétation des résultats de l'étude de la piézomètrie et de la salinité de la nappe de l'aquifère alluvial de la palmeraie permet de dégager les conclusions suivantes :

Les dômes piézomètriques observées au nord et au sud du ksar se sont accentués avec le temps sous l'effet de la recharge des eaux d'irrigation de la source et Le bombement local du toit du substratum imperméable ;

- La zone près du talus hamadien de la palmeraie se caractérise par des faibles valeurs en salinité et en chlorures ; par contre des fortes valeurs sont observées à la lisière de l'Oued
- L'intrusion du biseau salé, consécutive à la surexploitation des eaux souterraines de la nappe des terrasses alluviales est démontrée ;
- L'intense évaporation des eaux d'irrigation concentre en sels les eaux infiltrées sous les cultures : la réutilisation multiple des eaux de la nappe pour l'irrigation augmente en effet continuellement la salinité, puisque la même eau chargée est extraite, concentrée dans la zone racinaire par l'évapotranspiration et percolée de nouveau vers la nappe. Le retour de ces eaux induit la chute de rendement des cultures maraîchères et du palmier dattier dans la palmeraie, principale production agricole dans la région.
- La nature fluviale des dépôts des formations réservoirs alluviales de la palmeraie constitue également une des sources principales de la salinité des eaux souterraines (lessivage des lentilles de gypse).
- Les diamètre des puits a grande diamètre (2 à 3 m) ainsi que la faible profondeur du plan d'eau et la forte évaporation favorisant l'exfiltration des eaux la nappe alluviale.
- Les pollutions anthropiques proviennent de sources multiples : rejets des eaux usées non raccordées au réseau d'assainissement, formation des marées d'eau usées et l'utilisation intensive des engrais dans les surfaces irriguées de la palmeraie.
- L'assèchement de l'oued Saoura dû à la diminution des apports pluviaux de ces dernières décennies

#### **CONCLUSION**

L'étude physico-chimique des eaux de la palmeraie de Béni Abbès montre que les eaux sont relativement minéralisées quand on se dirige du plateau de l'erg vers l'oued à cause de l'évaporation intense d'une part, et de la surexploitation de la nappe d'autre part.

Les eaux de la région de Béni Abbés, sont chlorurées sodiques et calciques parfois bicarbonatées calciques et magnésiennes. La prédominance des chlorures (CI-), du sodium (Na+), et du calcium (Ca++) est due essentiellement au lessivage des calcaires Mio- Pliocène, et de la présence des lentilles de gypse et des argiles d'une part et aux processus chimiques résultant de l'évapotranspiration d'autre part.

Les cartes d'isoteneurs indiquent une augmentation de la concentration de la salinité de l'Est vers l'Ouest, c'est-àdire de l'erg vers l'oued selon l'écoulement des eaux souterraines,

Les séries de données hydrochimiques recueillies sont discontinues, mais elles s'avèrent très utile dans l'étude de l'évolution spatio-temporelle des constituants physico-chimique, elles permettent de tracer des histogrammes et des cartes de qualités d'eaux souterraines, ainsi que la migration exogène de la salinité. En effet, ce problème causé par plusieurs facteurs anthropiques et naturels, engendre de sérieux problèmes d'irrigation.

L'hydrochimie montre que les puits situés à la lisière du grand erg ne sont pas attaqués par la salinité. En revanche, ceux situés au bord de la Saoura sont très salés (15 à 20g/l). En outre, les eaux prélevées des puits de la palmeraie présentent en général un faciès chloruré- calcique et magnésien, parfois bicarbonaté calcique.

La potabilité des eaux passe d'une potabilité excellente à mauvaise selon la position des puits par rapport à l'oued Saoura.

L'utilisation des éléments chimiques majeurs et mineurs nous a permis de comprendre le processus de salinisation des eaux. Ainsi, cette salinisation proviendrait de la dissolution-précipitation de la roche aquifère, des évaporites et des échanges de base.

#### Références bibliographiques

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

ANRH, 1995 - Carte hydrogéologique de la région de Bechar Echelle 1/500 000 (Notice explicative)

ANRH, 2009- carte de qualité des eaux souterraines dans la wilaya de Bechar.;

Alimen H., 1957- Tertiaire et villafranchien au Sahara nord-occidental. C R .Soc Géol Fr, pp 238-40.

Chavaillon J, 1964 -Les Formations quaternaires du Sahara nord-occidental (de Colomb-Béchar à Reggane). Géologie et préhistoire. Paris: Publ CNRS, série Géol,; 393p.

Fabre, J., 1975 -. Introduction à la géologie du Sahara algérien. - Ed. SNED, Alger, 422 p.

GTZ Coopération Technique Algéro-Allemande (2006) gestion intégrée des eaux oasis de Béni Abbès atelier de restitution et d'évaluation, rapport interne

Merzougui T, 2011- Caractérisation hydrogéologique et modélisation d'un aquifère alluvial en zone hyper aride : cas de la nappe de la palmeraie de Béni Abbés (vallée de la Saoura, sud ouest algérien). Mem. de magister, pp 160.

Merzougui T, Kabour A et Bouanani A. (2008). Un modèle de gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyperaride : Cas de l'oasis de Béni Abbès (Vallée de la Saoura, sud ouest algérien), 13e Congrès Mondial de l'Eau, 1-4 septembre, Montpellier, France

Roche MA. (1973). Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord-occidental). Paris: Publ CNRS, série Géol, 91p.

Scholler H.,1945-. L'hydrogéologie d'une partie de la vallée de Saoura et du grand d'erg occidental, bull, soc, géol.fr.5 .T.XV, page 563-585.

Yousfi N et Ait-Ahmed C, 1992- Contribution à l'étude hydro-géologique de la Grande Source et de la palmeraie de Béni-Abbès (Sahara occidental). Thèse Ing Etat, Univ Sci Tech d'Oran-Algérie, p 440

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### **SESSION 3**

OUTILS D'AIDE A LA CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES SEDIMENTAIRES : DE L'APPROCHE TERRAIN A LA MODELISATION

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

## Cartographie des drains karstiques noyés par une sonde autonome semi-flottante.

#### S. Pistre (a), V.Hakoun (a), P. Falgayrettes (b)

(a) Laboratoire Hydrosciences-Montpellier (b) Institut d'Electronique du Sud Severin.pistre@univ-montp2.fr vivien.hakoun@univ-montp2.fr pascal.falgayrettes@univ-montp2.fr

#### I.CONTEXTE ET OBJECTIFS

Depuis 50 ans, la connaissance des aquifères karstiques a largement progressé amenant, sur la base de modèles conceptuels de plus en plus détaillés, à des modes de captage et d'exploitation spécifiques. Le captage de la source de Lez, mis en place en 1981 pour l'AEP de la ville de Montpellier, en est un exemple probant. Malgré ces avancées, la simulation du comportement hydrodynamique de ces aquifères nécessaire à leur gestion reste problématique. Les modèles numériques existants bien qu'utiles pour les gestionnaires, sont limités tant d'un point de vue temporel que spatial par des hypothèses restrictives sur l'hydrodynamique de ces milieux. En somme, ces modèles se heurtent à la prise en compte de la géométrie des drains karstiques actifs qui conditionnent le fonctionnement hydrodynamique en concentrant les mises en charge et les écoulements rapides. Les expériences de traçages très usitées dans le karst permettent de mettre en évidence la présence de drains. Elles mettent en évidence la connectivité hydraulique entre un point d'injection et un ou plusieurs points de restitution. Cependant, elles ne permettent pas d'inférer sur la géométrie des drains ni de préciser leur position au sein de l'aquifère. Par ailleurs, l'exploration des drains karstiques noyés par plongée est limitée en raison de la dangerosité et des limites techniques de ce type d'exploration. Dans cette optique, nous proposons un nouvel outil de terrain autonome, de type sonde, capable de cartographier in situ son parcours dans les réseaux de conduits noyés.

#### I. CARACTERISTIQUES DE LA SONDE

La sonde se présente sous la forme d'une sphère étanche de 3cm de diamètre. Elle est lestée pour adopter un comportement semi-flottant. Elle intègre un capteur de trajectoire et une source d'énergie. Elle fait l'objet du brevet FR 11/61985 (PCT/FR 2012/052918) [1].

#### II. 1 Principe de mesure et capteurs utilisés

Le capteur intègre la mesure de l'accélération 3D simultanément à la mesure du champ magnétique dans le référentiel 3D du capteur. Cet ensemble de mesures permet de s'affranchir de l'inclinaison possible du mobile, même si celui-ci est lesté. Les données brutes mesurées sont stockées sur carte mémoire. L'intégration du vecteur « accélération » permet de remonter à la vitesse instantanée de la sonde en chaque point de l'écoulement. Les angles d'inclinaison précédemment calculés servent à projeter, par une série de 3 rotations, le vecteur vitesse de la sonde dans le référentiel terrestre. Enfin, la position de la sonde est obtenue par intégration des composantes du vecteur vitesse sur les 3 axes du référentiel fixe (référentiel terrestre).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### II. 2 Correction du facteur d'échelle

Lorsque la trajectoire est entièrement déterminée, une dernière correction est réalisée en effectuant la fusion des données « terrain » (coordonnées cartographiques ou GPS) avec celles issues de la sonde

Le point de départ, ainsi que celui d'arrivée, sont connus et servent à calculer un facteur d'échelle pour la trajectoire mesurée par la sonde. Ce facteur d'échelle permet de corriger la dérive du capteur accélérométrique. La différence de position entre le point d'arrivée calculé à partir des mesures de la sonde et le point d'arrivée des coordonnées « terrain » détermine l'erreur de trajectoire. Une correction de l'ensemble des points de la trajectoire de la sonde peut ainsi être réalisée.

#### II. RESULTATS

La sonde a été progressivement testée sur des trajets aériens, en canaux ouverts et finalement en domaine karstique dans des drains noyés de faible extension déjà topographiés. Les cartographies 3D obtenues sont conformes aux géométries attendues. Ces résultats encourageants permettent d'envisager des tests sur de plus longs trajets et dans le cas de drains à topographie inconnue.

Cet outil de caractérisation de la géométrie interne du karst ouvre des perspectives nouvelles pour l'implantation de captages, la définition des périmètres de protection ou la réalisation de modèles numériques. Ainsi, il pourrait permettre une avancée notable dans la topographie des réseaux de conduits noyés qui apparaît comme un élément-clé dans l'essor de l'hydrogéologie karstique.

#### Références bibliographiques

[1] Pistre S., Falgayrettes P., Hakoun V. (2012): Procédé et appareil de détermination d'une trajectoire d'un écoulement aqueux, et sonde autonome mise en œuvre dans ce procédé. - FR 11/61985.

## Modélisation des hydrosystèmes par approche systémique : exemple d'application à la Sèvre Niortaise (79)

#### F. Bardolle

BRGM f.bardolle@brgm.fr

#### Résumé.

Les modèles basés sur les fonctions de transfert sont largement utilisés en modélisation hydrologique, en particulier pour les simulations pluie-débit. Nous présentons ici un nouveau modèle, associant trois fonctions de transfert élémentaires en série, sur quatre branches parallèles. Chaque fonction de transfert est une fonction de densité de probabilité paramétrique, ayant un sens physique par rapport aux transferts hydrologiques. L'inversion du modèle s'effectue par une technique dite d'optimisation par essaim de particule (PSO). Elle consiste à déplacer des particules à l'intérieur de l'espace des paramètres pour trouver le minimum d'une fonction objectif qui mesure la distance entre les sorties simulées et les données. Le modèle systémique et la méthode PSO ont été testés sur la Sèvre Niortaise (79). La précision des simulations et l'exactitude des prédictions sont comparées pour différentes combinaisons de fonctions de transfert en utilisant le coefficient de Nash.

#### I. PRESENTATION DU MODÈLE

Le modèle hydrologique présenté ici est basé sur l'approche systémique. Il établit une relation entre des signaux hydrologiques au moyen de fonctions de transfert. Son architecture peut associer trois fonctions de transfert élémentaires en série, sur quatre branches parallèles (Fig. 1).

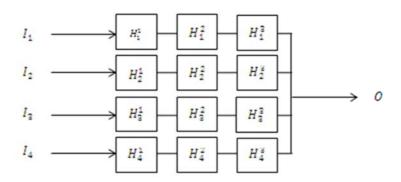


Figure 1 – Architecture du modèle : branches parallèles de fonctions de transfert en série

La sortie (e.g. le débit d'une rivière) est donc la somme des quatre produits de convolution :

$$O(t) = I_1 * H_1^{eq}(t) + I_2 * H_2^{eq}(t) + I_2 * H_2^{eq}(t) + I_4 * H_2^{eq}(t)$$
(1)

Où O(t) est la sortie,  $I_i(t)$  est la  $i^{\text{ème}}$  entrée (e.g. la pluie) et  $H_i^{\text{eq}}$  (t) est la  $i^{\text{ème}}$  fonction de transfert équivalente.  $H_i^{\text{eq}}$  (t) est le produit de convolution de trois fonctions de transfert élémentaires :

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

de l'Association Internationale des Hydrogeologues.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

$$H_i^{eq}(t) = K_i \cdot (H_i^1 * H_i^2 * H_i^3(t))$$

Où  $K_i$  est le facteur de gain, et  $H_i^{\alpha}$  est la  $\alpha^{\text{ème}}$  fonction de transfert de la  $i^{\text{ème}}$  branche. Du point de vue des phénomènes de transport, les branches parallèles peuvent correspondre à de multiples mécanismes de transfert simultanés, alors que les fonctions en série représentent des phénomènes successifs. L'architecture proposée peut aussi être vu comme une variabilité spatiale des mécanismes de transfert.

Les fonctions de transfert élémentaires sélectionnées pour cet exemple sont des fonctions de densité de probabilité paramétriques, ayant un sens physique du point de vue des transferts hydrologiques (voir exemple dans le Tableau 1).

Distribution	Formule	Sens physique	Référence
Gamma	$H_G(t) = \frac{t^{b-1}.\exp(-t/a)}{a^b.\Gamma(b)}$	cascade de réservoirs linéaires	[1]
Normale	$H_N(t) = \exp\left(\frac{-(t-a)^2}{b^2}\right)$	convection et dispersion	[2]
Loi-puissance	$H_{p}(t) = \frac{1}{(1+a.t)^{b}}$	diffusion	[3]

Tableau 1 – Trois fonctions de transfert issues de notre librairie de fonction

Pour chaque problème, il est possible de choisir à la fois le nombre d'entrée (donc de branche) et le nombre de fonction de transfert élémentaire. Les fonctions de transfert inutilisées sont remplacées par une distribution de Dirac  $\delta(t)$  correspondant à l'élément neutre de l'opération de convolution, soit :

$$f(t)*\delta(t) = f(t)$$

Chaque modèle possède donc de trois à vingt-huit paramètres à optimiser : un paramètre par branche, et deux paramètres et par fonction de transfert élémentaire.

#### **II. OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULE**

Pour rechercher des paramètres permettant d'obtenir une bonne convergence entre la sortie du modèle et les données observées, nous utilisons un algorithme dit d'optimisation par essaim de particule, ou particle swarm optimization (PSO).

Le PSO est un algorithme de recherche stochastique initialement développé pour simuler les volées d'oiseau. Il utilise des particules (des jeux de paramètres) se déplaçant dans l'espace des paramètres pour trouver le minimum d'une fonction objectif mesurant la distance entre les sorties simulées et les données (ici, la somme des erreurs au carré entre les données et les simulations).

Chaque particule est un vecteur dont la taille correspond au nombre de paramètres du modèle. Une particule est déplacée aléatoirement de manière itérative dans l'espace des paramètres. À

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

l'itération t+1, elle garde en mémoire à la fois la meilleure position qu'elle a découvert  $p_i^{t}$  et la meilleure position découverte par l'essaim qt.

Après une étape d'initialisation assignant à chaque particule une vitesse et une position aléatoires dans l'espace des paramètres, la valeur de la fonction objectif est calculée à chaque itération pour chaque particule, et les vitesses  $v_i^{t+1}$  et positions  $x_i^{t+1}$  sont mises à jour :

$$v_i^{t+1} = w. v_i^t + c_1.r_1(g^t - x_i^t) + c_2.r_2(p_i^t - x_i^t)$$
(1)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} (2)$$

w est le poids inertiel,  $c_1$  et  $c_2$  sont les constantes d'accélération,  $r_1$  et  $r_2$  sont des nombres aléatoires distribués uniformément sur (0,1).

Le PSO est souvent considéré comme bien adapté aux problèmes inverses mal-posés (*ill-posed inverse problems*) car sa recherche « globale » dans l'espace des paramètres ainsi que l'échange d'information entre les solutions (individus) diminue les risques de converger vers un minimum local. De plus, cet algorithme de recherche est relativement simple à programmer et converge rapidement par rapport à d'autres techniques globales [4].

#### III. APPLICATION

Le modèle systémique et le PSO ont été confrontés aux données de débit de la Sèvre Niortaise, située dans le département des Deux-Sèvres (79) en France. Le débit est mesuré à la station hydrométrique de Pont-de-Ricou, à l'exutoire du sous-bassin versant dit « Sèvre amont » [5].

Dans un premier temps, le PSO recherche les paramètres des fonctions de transfert, en comparant les sorties du modèle aux données, sur une période de calibration allant du 1<sup>er</sup> août 1994 au 31 juillet 1996. Ensuite, la meilleure solution inverse est utilisée pour prédire le débit de la rivière sur deux périodes de vérification, du 1<sup>er</sup> août 1993 au 31 juillet 1994 et du 1<sup>er</sup> août 1996 au 31 juillet 1997 (Fig. 2).

#### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

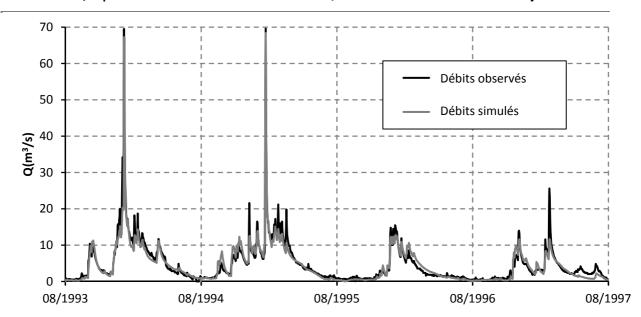


Figure 2 – Débits observés et simulés pour le modèle utilisant la distribution Gamma

Le modèle a trois entrées au pas de temps journalier : une chronique de pluie efficace (calculée à partir de la pluie nette et de l'ETP mesurée à Niort), la même chronique affectée d'un seuil ( $P_{eff} > 30$  mm) et un niveau piézométrique relevé à Saint Coutant (à environ 25km de la station hydrométrique) captant la nappe superficielle du Callovien (Dogger) (Fig. 3).

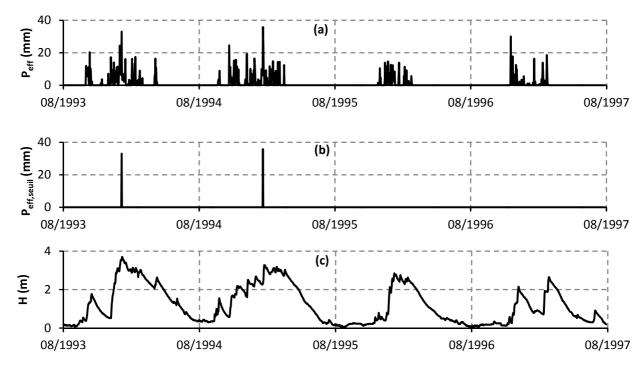


Figure 3 – Données d'entrée : (a) Pluie efficace ; (b) Pluie efficace seuillée ; (c) Hauteur piézométrique

Différentes combinaisons de fonctions de transfert ont été testées : distribution Gamma (G), distributions Gamma et Normale (G\*N), distribution Loi-puissance (L), distributions Loi-puissance et Normale (C\*N), et distributions Gamma, Loi-puissance et Normale (G\*L\*N).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Le coefficient de Nash permet de comparer la précision des simulations des différentes combinaisons mentionnées précédemment. Ce coefficient est calculé comme suit :

$$N = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T} (Q_{obs}^{t} - Q_{mod}^{t})^{2}}{\sum_{t=1}^{T} (Q_{obs}^{t} - \overline{Q}_{obs})^{2}}$$
(1)

Qobs

est le débit observé moyen,  $Q^t$  obs est le débit journalier observé et  $Q^t$  mod est le débit journalier modélisé. N est compris entre -  $\infty$  et , la valeur optimale étant N = 1

		G	G*N	L	L*N	G*L*N
Calibration	1994/95/96	0.945	0.944	0.840	0.911	0.945
Prédiction	1993/94	0.912	0.912	0.882	0.931	0.911
	1996/97	0.747	0.743	0.748	0.771	0.737

Tableau 2 – Coefficients de Nash pour différentes combinaisons de fonction de transfert

Les coefficients de Nash reportés dans le tableau 2 montrent que chaque combinaison de fonction de transfert donne un relativement bonne simulation pour à la fois la période de calibration ( $N_{94/95/96} > 0.8$ ) et de prédiction ( $N_{93/94} > 0.8$ ) et  $N_{96/97} > 0.7$ ).

On peut également noter que le modèle le plus complexe (G\*L\*N) n'est pas plus précis que d'autres modèles plus simples (G ou G\*N). Cela peut provenir de l'utilisation systématique du même nombre de particules (50) et d'itérations (200), quel que soit le nombre de paramètre du modèle (de 9 pour G ou L, à 21 pour G\*L\*N). Ainsi, il y a plus de particules et d'itérations par paramètre pour les modèles simples que pour les modèles complexes.

#### Références bibliographiques

[1] Nash, J. E., 1957 – The form of the instantaneous unit hydrograph. IAHS Publ, 45(3), 114-121

[2]Pinault, J-L., Berthier F., 2007 – A methodological approach to characterize the resilience of aquatic ecosystems with application to Lake Annecy, France. *Water resources research 43(1)* 

[3] Drogue, C., 1972 – Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques. Statistical analysis of hydrographs of karstic springs. *Journal of Hydrology*, 15(1), 49-68

[4] Fernández-Martínez, J. L., Mukerji, T., García-Gonzalo, E., & Fernández-Muñiz, Z., 2011 – Uncertainty assessment for inverse problems in high dimensional spaces using particle swarm optimization and model reduction techniques. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(11), 2889-2899

[5] Bichot, F., Lavie, J., Thinon-Larminach, M. & Dequidt, D., (2010) – Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements en nappe : Phase 3. *Rapport BRGM, RP-56481-FR* 

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Deux outils gratuits d'aide à l'interprétation : le logiciel TRAC (traçages), et un logiciel bientôt disponible : OUAIP (interprétation des pompages d'essai).

#### A. Gutierrez, T. Klinka, D. Thiéry, B. Dewandel, N. Croiset

#### **BRGM**

a.gutierrez@brgm.fr; t.klinka@brgm.fr

L'expérimentation par traçage est la méthode la plus adaptée et la plus courante pour étudier la migration de substances miscibles dans un aquifère. Son interprétation renseigne l'hydrogéologue sur les vitesses des écoulements souterrains et les paramètres hydrodispersifs du milieu aquifère. Les paramètres déterminés dans les conditions d'écoulement de l'expérience peuvent être utilisés pour simuler le comportement hydrodispersif du milieu dans d'autres conditions d'écoulement.

L'interprétation est cependant souvent limitée à des estimations de vitesses. Ainsi, si les traçages sont régulièrement pratiqués par les bureaux d'études, peu d'entre eux prolongent l'expérience par une interprétation plus poussée. Plusieurs raisons permettent d'expliquer cette constatation. La plupart du temps, le traçage comme marqueur d'un passage ou d'une connexion est l'objectif principal de l'opération. L'apparition du traceur satisfait l'opérateur qui peut lui adjoindre une vitesse maximale (pour le temps d'apparition) et éventuellement une vitesse modale (pour le pic de restitution). Une autre raison, réside dans la complexité du signal de restitution en liaison avec des écoulements plus ou moins turbulents dans des réseaux karstiques par exemple, et pour lesquels il semble évident qu'aucune solution simple ne sera applicable. Ainsi en milieu karstique et dans une certaine mesure, en milieu fissuré, la carence d'interprétation provient également de la faible représentativité des solutions simples face à la complexité du milieu. En revanche, en milieu poreux, les équations déterministes de transport ont permis de développer des méthodes d'interprétation par modélisation ou à l'aide solution analytiques, ces dernières étant nettement plus facile à mettre en œuvre. Pourtant, il existe assez peu d'outils rassemblant ces solutions, et tous sont aujourd'hui obsolètes ou peu diffusés. L'une des raisons de ce manque d'intérêt pour les interprétations poussées des traçages tient donc également à l'absence d'outil récent permettant de les réaliser sans y consacrer un temps considérable.

#### I. ETAT DES CONNAISSANCES ET OUTILS EXISTANTS

#### I.1. Rappel de la physique des transferts

L'interprétation des traçages repose sur l'analyse des flux massiques de traceur observés à l'exutoire, connaissant la fonction d'entrée du système, c'est-à-dire le flux massique injecté dans l'aquifère en un point.

La migration d'un soluté dans les eaux en mouvement est gouvernée par la convection, c'est-à-dire l'entrainement du produit par le mouvement de l'eau, et sa dispersion. Cette dernière correspond à

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

l'étalement du produit avec le temps (et donc la distance) ce qui se traduit par l'occupation d'un volume croissant d'aquifère avec une décroissance de la concentration, au fur et à mesure que le traceur s'éloigne du point d'injection. La dispersion au sens large résulte de deux phénomènes, d'une part la diffusion moléculaire, négligeable dans les milieux perméables devant le second phénomène, la dispersion cinématique, sauf si la vitesse est très lente.

Des échanges entre le soluté transporté par l'eau et la matrice poreuse qu'il traverse peuvent se produire lors du transfert. Ils prennent place soit par adsorption sur les grains, soit par échange avec l'eau immobile adsorbée sur les grains. En outre le milieu peut réagir avec le soluté, en particulier par l'intermédiaire de sa biomasse. La dégradation d'un produit est un phénomène complexe dont la cinétique varie selon les conditions environnementales et les constituants de ce produit.

Si l'on se limite au transport d'un produit parfaitement miscible, conservatif et sans échange avec le milieu qu'il traverse (ce qui définit le traceur parfait), sa propagation dans le milieu est régit par l'équation de diffusivité :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_T \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_V \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

Avec

C: la concentration en traceur;

u : la vitesse réelle de l'écoulement.  $u=\frac{V_D}{\omega_c}$  , avec  $V_D$  : vitesse de Darcy et  $\omega_c$  : porosité cinématique.

D: la dispersion ( $D_L$  coefficient de dispersion longitudinale,  $D_T$  dispersion transversale et  $D_V$  dispersion verticale).

D= $\alpha$ .u, avec  $\alpha$ : dispersivité qui se décline en  $\alpha_L$ , dispersivité longitudinale,  $\alpha_T$  transversale et  $\alpha_V$  verticale.

L'axe x est considéré comme étant celui de la vitesse maximale.

Le premier terme de l'équation  $\left(-u\frac{\partial C}{\partial t}\right)$  représente la convection, tandis que les suivants représentent la dispersion cinématique.

Les paramètres intrinsèques que l'interprétation des traçages se propose de déterminer sont donc la porosité cinématique et les paramètres de dispersion. Rappelons que la première, inférieure à la porosité totale, ne concerne que les pores qui participent à l'écoulement de l'eau (les pores cul-desac par exemple contiennent de l'eau immobile). La dispersivité est indépendante de la vitesse mais est sensible à un effet d'échelle. Le paramètre ainsi déterminé n'est valable que pour représenter des transports de soluté à l'échelle de l'expérience du traçage.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### I.2. Comparaison de plusieurs outils analytiques existants

Depuis la fin du XIXème siècle de nombreuses études ont été réalisées pour comprendre et simuler le transport, l'adsorption/désorption, la dégradation et les réactions de solutés en milieu souterrain variablement saturé. Divers modèles analytiques ou numériques ont été développés pour déterminer la concentration d'un soluté dans le temps et l'espace à partir de l'injection au point d'origine.

L'interprétation d'un essai de traçage consiste notamment à reconstituer l'évolution de la concentration d'un traceur mesurée au point d'observation, en fonction du temps à partir de l'injection. La courbe de restitution du traceur une fois obtenue (« breakthrough curve » en anglais), permet d'estimer certains paramètres caractéristiques du milieu étudié, comme le temps de transit du traceur, le taux de restitution, le caractère conservatif du milieu, la dispersivité et la porosité efficace. Ces paramètres caractérisent le milieu et permettent de simuler le comportement d'un polluant miscible dans l'aquifère.

L'interprétation des courbes de restitution en un point de contrôle peut se faire de 2 manières différentes :

- En estimant au préalable les paramètres de l'écoulement, on essaye de reproduire au mieux la courbe de restitution observée : c'est le *problème direct* ;
- à partir des concentrations mesurées on calcule directement les paramètres de l'aquifère (par exemple la dispersivité latérale et transversale ou le débit d'écoulement) : c'est le problème inverse.

Quelques codes de calcul existent, permettant d'évaluer le transport de soluté en milieu poreux. Certains utilisent des solutions analytiques dérivant de l'équation générale de convection-dispersion, d'autres par méthodes graphiques ou empiriques. Plusieurs outils ont été comparés. Il s'agit principalement des logiciels CXTFIT (Toride et al., 1995), Traci95 (Käss, 1998), CATTI (Sauty et Kinzelbah, 1992) et QTRACER2 (Field et al., 2002). Certains de ces codes proposent des solutions pour le milieu fissuré (Traci95, Qtracer2) ou l'écoulement de surface (Qtracer2).

Dans tous les codes présentés ci-dessous, plusieurs hypothèses communes sur le milieu poreux sont effectuées :

- le milieu est homogène, (excepté la solution pour milieu fissuré dans Traci95) ;
- l'écoulement est uniforme, dans une ou deux directions, ou radial.

L'injection du traceur peut être instantanée ou continue : plusieurs solutions existent pour une injection instantanée (Dirac) ou continue et constante (palier), mais les solutions sont plus complexes pour une injection caractérisée par une série de paliers successifs (injection par paliers de concentration) ou une exponentielle décroissante.

La multiplicité des phénomènes pris en compte va de pair avec la complexité de la solution : parmi les outils étudiés peu d'entre eux permettent de paramétrer de manière rigoureuse les phénomènes de dégradation, d'adsorption/désorption (retard, production) du traceur au cours de son transfert dans la matrice poreuse. Seul CATTI prend en compte la variabilité de la dispersivité dans l'espace.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

La plupart des outils utilisent des équations déterministes pour traiter le problème inverse. QTRACER2 diffère puisqu'il utilise une méthode graphique pour estimer les paramètres recherchés.

La méthode FVPDM, Finite Volume Point Dilution Method, (Brouyères et al., 2008) est également considérée : contrairement aux autres outils présentés ici, elle ne s'applique pas à estimer la concentration du traceur en un puits de contrôle mais directement au puits d'injection. L'interprétation de la dilution du traceur dans le puits d'injection en fonction du débit d'injection et du débit de transit de la nappe fournit une estimation de la vitesse de Darcy.

Le tableau 2 suivant, qui ne prétend pas être complet, synthétise les principales caractéristiques des codes recensés. Une ligne est ajoutée pour le code TRAC présenté ici.

	Résolution		Dimension			Fonction d'entrée				Phénomènes physiques pris en compte					
Code	Direct	Inverse	10	2D	radial	Dirac	Palier	Paliers multiples	Exponentielle décroissante	Dégradation	Retard	Production	Variation de la dispersion avec la distance	Double porosité	Récupération
CATTI (Sauty et al., 1992)	х	Х	х	х	х	х	х			х	X <sup>(1)</sup>	X <sup>(2)</sup>	Х	х	X <sup>(3)</sup>
CXTFIT (Toride et al., 1995)	х	х	х			х	х	х	х	х	х	х			
TRACI95 (Käss, 1998)	х	х	х	Х	Х	Х									
QTRACER2 (Field, 2002)		х	х			Х						X <sup>(2)</sup>			
EHTD (Field, 2003)	X <sup>(4)</sup>		х		Х	Х	Х				Х				
FVPDM (Brouyères, 2008)	х		х		Х			X <sup>(5)</sup>							
TRAC	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	X <sup>(2)</sup>	Х		

- (1) Pour CATTI le terme de retard est une constante (« initial delay »).
- (2) Le terme de production correspond à un bruit de fond initial constant (concentration initiale naturelle dans l'aquifère).
- (3) Le terme de récupération (« recovery ») est une constante qui permet de prendre en compte les pertes en traceur inexpliquées.
- (4) EHTD est utilisé pour dimensionner un traçage. Il ne permet pas son interprétation.
- (5) La méthode FVPDM consiste à injecter le traceur par paliers de concentration dans un puits et à en observer la dilution.

Tableau 1 : Comparaisons de plusieurs codes de calcul analytiques d'interprétation de traçages

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### II. LES SOLUTIONS ANALYTIQUES DISPONIBLES DANS TRAC

Au travers d'une interface graphique simple et conviviale, TRAC permet de simuler des courbes de restitution théoriques et d'interpréter des courbes de restitution expérimentales à partir de formulations analytiques de l'équation d'advection-dispersion.

Toutes les solutions disponibles peuvent être utilisées dans un mode de simulation directe, sans donnée d'observation, dans le but de dimensionner un essai de traçage à partir d'hypothèses sur les paramètres, ou dans un mode interprétatif, où le calage des courbes théoriques sur des données observées permet la détermination des paramètres des équations (cf. Figure 1)

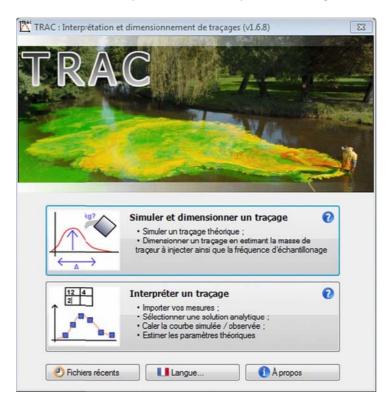


Figure 1: Ecran d'accueil de TRAC.

Afin de répondre à différentes configurations de traçages en milieu poreux saturé, de multiples solutions ont été incorporées à TRAC permettant un vaste choix (Tableau 2) selon :

- le type d'écoulement considéré : 1D (écoulements en tube ou colonnes), 2D (avec observation dans l'axe d'écoulement ou décalée par rapport à cet axe) ou radial (cas particulier d'un forage en pompage ou en injection) ;
- le type d'injection : l'injection peut être brève (de type Dirac, impulsion brève et unique) ou continue pendant une certaine durée, avec possibilité de faire varier la concentration par paliers.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

DIMENSION	TYPE D'INJECTION	Numéro de la solution dans TRAC
ECOULEMENT 1D	INJECTION BREVE	
	Injection brève d'une masse dans un milieu infini	2
	Injection d'une masse dans un milieu semi-infini	3
	INJECTION CONTINUE	
	Injection continue d'un flux de masse dans un milieu infini	10
	Injection continue d'un flux de masse dans un milieu semi-infini.	9
	Injection continue, dans un milieu semi-infini, d'une concentration avec décroissance exponentielle du traceur.	7
	Injection continue dans un milieu semi-infini d'une concentration en traceur dont la dégradation se fait uniquement dans la nappe.	8
ECOULEMENT 2D	INJECTION BREVE	
	Injection d'une masse dans un milieu infini	4
	Injection d'une masse dans un milieu infini avec angle d'écoulement	5
	Injection d'une masse dans un milieu infini avec dispersion variable	6
	INJECTION CONTINUE	
	Injection continue, imposition d'un flux massique dans un milieu infini	11
ECOULEMENT RADIAL	INJECTION BREVE	
	Injection d'une masse dans un écoulement radial convergent induit par un pompage continu	1
	Injection brève d'une masse dans un écoulement radial convergent induit par un pompage continu.	18
	INJECTION CONTINUE	
	Injection continue dans un écoulement radial convergent induit par un pompage continu.	19

Tableau 2 : Solutions analytiques disponibles dans TRAC v.1.6.9 (mai 2013)

La validation de ces solutions a été réalisée et consignée dans un rapport public (Klinka et al., 2013). Elle a consisté d'une part à comparer les résultats de la solution analytique réécrite avec un autre logiciel, ce qui valide l'absence d'erreur informatique dans l'outil et d'autre part à comparer les résultats de la solution analytique avec ceux d'une modélisation numérique, ce qui valide également la méthode.

Le logiciel présente en particulier deux méthodes d'interprétation de traçage en écoulement radial, c'est-à-dire avec une injection du traceur dans la zone d'appel d'un forage en cours de pompage.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

L'utilisation d'un puits de pompage pour réaliser des traçages présente en effet plusieurs avantages et est fréquemment utilisée :

- L'injection se fait directement en nappe par l'intermédiaire d'un piézomètre ou d'un autre puits existant.
- Les temps de transfert sont écourtés par l'accélération artificielle des vitesses à proximité du puits. Les temps de suivis sont alors relativement courts et l'essai est plus économique qu'une expérience en écoulement non influencé.
- Le système de pompage peut être adapté pour prélever autant d'échantillon que nécessaire.
- Les taux de restitutions sont bons si l'injection se fait bien dans la zone d'appel du captage.

Les paramètres obtenus correspondent bien à des vitesses d'écoulement à proximité d'un captage, ce qui est généralement l'objectif recherché pour la protection de captage pour l'alimentation en eau potable.

Les solutions présentées se basent sur les travaux de Sauty (1977) et Thiéry (nouvelle méthode - publication à venir).

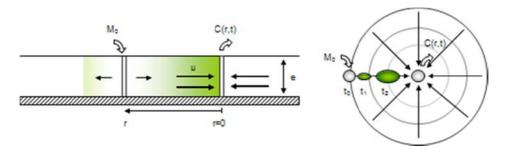


Illustration 1 : Schéma de traçage - Injection brève d'une masse  $M_0$  dans un écoulement radial convergent induit par un pompage continu

#### III. MISE A DISPOSITION DE L'OUTIL

TRAC est téléchargeable gratuitement *via* son site internet dédié : <a href="http://trac.brgm.fr">http://trac.brgm.fr</a>. Le site web rassemble les informations propres au projet et met à disposition du public, divers documents (manuel, rapports, publications, newsletters).

Le site permet également de communiquer avec l'équipe du projet de TRAC par l'intermédiaire d'un formulaire de contact. Les utilisateurs de TRAC peuvent partager leurs apports et concourir à étoffer l'outil et élargir son domaine d'utilisation. Les apports de chacun pourront s'ils le souhaitent être intégrés à TRAC après validation du contenu ou proposés en téléchargement sur le site web du projet.

Pour partager une nouvelle traduction ou de nouvelles solutions analytiques il suffit d'envoyer via le formulaire de contact du site web de TRAC le fichier correspondant :

- Traduction : pour partager une nouvelle traduction, le fichier « Langue.ini » ;
- Unités : pour partager de nouvelles unités, le fichier « Unites.ini » ;
- Solutions : pour partager des solutions, le fichier « MesFormules.ini ».

L'objectif, in fine, est de mutualiser les connaissances acquises afin d'améliorer la pratique de l'interprétation et du dimensionnement des traçages en milieux poreux. L'outil est en effet modulable et peut également faire l'objet de développements spécifiques dans le cadre de nouveaux projets de recherche avec des partenaires publics ou industriels. Les thématiques des milieux karstiques ou fissurés sont riches de potentialités en matière d'interprétation des traçages.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### IV. OUAIP, un outil pour l'interprétation des pompages d'essais dans la lignée de TRAC

De manière analogue au projet TRAC, OUAIP est un logiciel développé au BRGM dédié à l'interprétation et à la simulation des pompages d'essai. Il repose sur l'utilisation de solutions analytiques pour quantifier les paramètres hydrodynamiques caractéristiques des aquifères.

L'utilisateur de TRAC reconnaitra l'interface graphique: OUAIP conserve le principe d'une fenêtre graphique accolée à un espace constitué d'onglets. Les onglets permettent la saisie des informations, l'import et/ou l'édition des données de l'essai, le choix de la solution analytique la plus adaptée, la saisie et l'ajustement des paramètres. Pour l'instant à l'état de prototype, OUAIP a un nombre limité de solutions analytiques mais il est opérationnel. Il est mis gratuitement à la disposition des bêtatesteurs qui voudraient apporter leur concours à l'amélioration du logiciel. Des financements sont recherchés pour le faire évoluer. L'ADEME a apporté récemment son soutien pour le développement d'une version dédiée à la géothermie.

L'outil est téléchargeable sur le site web <a href="http://ouaip.brgm.fr">http://ouaip.brgm.fr</a>

#### Références bibliographiques

Brouyère, S., Batlle-Aguilar, J., Goderniaux, P. & Dassargues, A. 2008 - A new tracer technique for monitoring groundwater fluxes: the Finite Volume Point Dilution Method. J. Contam. Hydrol. 95: 121-140.

Field MS., 2002 - The QTRACER2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems. EPA/600/R-02/001

Field MS, 2003 - Tracer-Test Planning using the Efficient Hydrologic Tracer-Test Design (EHTD) Program. EPA/600/R-03/034

Käss W., 1998 - Tracing Technique in Geohydrology, A. A. Balkema, Brookfield, Vt.

Klinka T., Gutierrez A., Thiéry D., 2013 - Validation du logiciel TRAC : Aide à l'interprétation de traçages en milieu poreux Rapport BRGM/RP-59425-FR

Sauty JP, Kinzelbach W., Voss A., 1992 - CATTI: Computer Aided Tracer Test Interpretation – Program Documentation. BRGM

Sauty J.P., 1977 – Contribution à l'identification des paramètres hydrodispersifs dans les aquifères par l'interprétation des expériences de traçage. Thèse Doct.-Ing. Grenoble

Toride N., Leij F.J., Van Genuchten Th., 1995 - The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments. Version 2.0, Research Report n°137, US Salinity Laboratory

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### **SESSION 4**

DYNAMIQUE DES AQUIFERES SEDIMENTAIRES. QUELLES ECHELLES SPATIALE ET TEMPORELLE A PRENDRE EN COMPTE POUR UNE MEILLEURE GESTION?

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Perspectives d'évolutions méthodologiques pour une meilleure évaluation de la qualité des masses d'eau souterraine

#### I. Fournier

Agence de l'eau Adour Garonne Isabelle.fournier@eau-adour-garonne.fr

Pour les collectivités territoriales, les établissements publics, les services de l'état, l'évaluation de la qualité des eaux souterraines est une préoccupation constante afin de vérifier que l'utilisation de celles-ci ne pose pas de difficultés pour les différents usages que sont notamment : la distribution de l'eau potable, l'irrigation agricole et le soutien à l'étiage des débits des cours d'eau. Les réseaux de suivi des eaux souterraines ont pour objectif de surveiller et d'évaluer la qualité de ces aquifères.

#### I. La mise en place des réseaux de mesures

Dans le bassin Adour Garonne, l'effort de surveillance à l'échelle du bassin s'est fait en plusieurs étapes depuis les années 2000.

Conformément aux orientations arrêtées au niveau national, suite au rapport du Conseil Général des Mines, dit rapport « Martin » en 1997, le Ministère de l'Environnement a demandé aux agences de l'Eau d'assurer la responsabilité générale et le financement du « réseau national de connaissance des eaux souterraines ». Les réseaux patrimoniaux de la qualité et de la quantité des eaux souterraines se sont mis progressivement en place à partir de 2000 en s'appuyant sur les stations existantes et en les complétant par de nouvelles (hors AEP si possible). La densité des stations traduisait l'importance stratégique des aquifères vis-à-vis des usages. En ce qui concerne spécifiquement le réseau « qualité », il était constitué au total de 250 stations et a permis d'établir la qualité intrinsèque de l'eau souterraine au cours du temps.

**Pour répondre aux exigences de la DCE** (Directive Cadre Européenne sur l'Eau 2000/60/CE), les réseaux de contrôle se mettent en place sur la base des réseaux patrimoniaux déjà fonctionnels. De nouvelles règles de densité affectées à chaque typologie de masse d'eau souterraine (=regroupement d'aquifères et/ou partis d'aquifère) cadrent ce remaniement.

Type de la masse d'eau								Densité minimale (nombre points/km²)	de		
Dominante sédimentaire non Libre(s) et captif				Entièrement libre	Avec	présence	de	1/500			
alluviale	dissociés				karstificat	ion					
					Sans	présence	de	1/500			
					karstificat	ion					
				Entièrement captif		1/3000					
	Libre(s)	et	captif	Une ou des partie(s) libr	partie(s)	1/3000					
	associés	ssociés captive(s), les écoulements sont majoritairement captifs									
				Une ou des partie(s) libr	e(s) et ur	ne ou des	partie(s)	1/500			
				captive(s), les écoulements s	ont majori	tairement li	bres				
Alluvial								1/500			
Socle								1/3500			
Edifice volcanique								1/3500			
Système hydraulique composite propre aux zones intensément plissées de montagne							1/3500				
Système imperméable localement aquifère								Au cas par cas en tenant compte des			
								connaissances sur le fonctionne	ment		
								hydrodynamique du système.			

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Tableau 1 – Les densités minimales par types de masses d'eau pour la surveillance qualité

Deux niveaux de surveillance voient le jour progressivement à partir de 2007 :

- Le **RCS** = Réseau de contrôle de surveillance de l'état chimique. Il doit permettre de fournir des informations pour l'évaluation de la qualité des masses d'eau, les tendances à long terme, la spécification du RCO et les futurs programmes d'actions.
- Le **RCO** = Le réseau de contrôle opérationnel de l'état chimique doit en plus de participer aux différentes évaluations décrites ci-dessus, évaluer l'efficacité du programme de mesures visant à réduire la cause de la dégradation.

En collaboration avec les collectivités locales et l'appui technique du BRGM, le RCS du bassin Adour Garonne issu du réseau patrimonial a été restructuré pour respecter les densités minimales pour chaque typologie des masses d'eau du bassin.

Le RCO est constitué soit de nouvelles stations (localisées dans les secteurs dégradés) soit d'analyses supplémentaires sur les stations RCS afin de suivre les évolutions des territoires à enjeu (ex : PAT, Plan d'Action Territoriaux) ou des masses d'eau en RNOE (Risque de Ne pas atteindre les Objectifs Environnementaux).

Les caractéristiques environnementales et hydrogéologiques sont précisées pour chaque station de mesures. Ainsi 310 stations de mesures constituent le RCS « qualité » du bassin Adour Garonne. Il est complété de 200 stations complémentaires pour une meilleure connaissance locale des masses d'eau eau concernées.

Malgré des règles de mise en place différentes une préoccupation persiste sur le niveau de la représentativité des stations de mesures pour l'aquifère ou la masse d'eau dont elle dépend. Des premiers principes issus de ces réflexions sont l'utilisation en priorité de sources qui sont « intégratrices » des activités humaines qui s'exercent sur le bassin versant hydrogéologique puis des ouvrages utilisés régulièrement sans que cela soit des ouvrages AEP (mieux protégées des pollutions ponctuelles mais généralement choisis parce que peu impactés par des pollutions anthropiques).

#### II. LES GRABDES ETAPES D'EVALUATION

Les évaluations à la station pour les besoins de connaissance du bassin se faisaient à des fréquences aléatoires et à l'aide de l'outil «SEQ EAU pour les eaux souterraines ». Avec la DCE, les évaluations sont conduites à l'échelle de la masse d'eau.

Puis les différentes évaluations pour répondre à la DCE sont les suivantes:

- 2004-2006 : première évaluation à l'échelle des masses d'eau souterraine avec des règles « bassin »
- 2008 : réévaluation des états chimique et quantité des masses d'eau souterraine avec des règles nationales stabilisées par un guide national et un réseau RCS en place depuis 2007.
- 2012 : nouvelles évaluations des états pour la préparation du prochain SDAGE 2016-2021.

Ces évaluations ont été toutes réalisées avec des outils propres à chaque bassin dans l'attente des outils nationaux comme le SEEE (Système d'Evaluation des Etats des Eaux).

La procédure pour l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine est le calcul des Moyenne des moyennes annuelles (Mma) pour l'ensemble des points disponibles bancarisés dans ADES et pour chaque paramètre puis la comparaison de ces moyennes à des valeurs seuils ou normes de qualité. Si à l'échelle de la masses d'eau aucun dépassement de norme qualité et aucune tendance à la hausse n'est observé, alors la masse d'eau sera classée en bon état chimique.

Pour l'exercice de 2012, l'ensemble des données des réseaux RCS et complémentaires ainsi que les analyses des captages AEP, disponibles dans ADES (banque nationale d'Accès aux Données des Eaux

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Souterraines) en févier 2012 ont été utilisées. Un peu plus de 850000 analyses ont été traitées pour le bassin Adour Garonne.

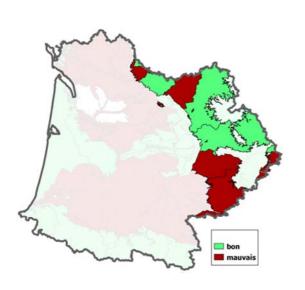
A ce stade 22% des masses d'eau sont classées en bon état chimique, pour les autres un processus de validation (les enquêtes appropriées) s'est mis en place en analysant la représentativité surfacique des problèmes rencontrés ainsi que d'autres tests notamment sur les relations avec les autres milieux aquatiques. Un effort particulier a été demandé afin de mieux évaluer le niveau de la représentativité d'une station dans les différentes masses d'eau souterraine permettant également d'établir un indice de confiance à la masse d'eau.

L'évaluation de l'état chimique des 105 masses d'eau souterraine montre que 41 MESO (Masses d'eau souterraine) sont en mauvais état et 64 sont en bon état, soient pour les masses d'eau majoritairement libres



Tableau 2 – Répartition surfacique (en %) de l'état chimique des masses d'eau -2012

#### III. Bilan de l'évaluation de l'état chimique 2012



A l'échelle du bassin, ces évaluations montrent des situations contrastées selon les différentes typologies des masses d'eau souterraines et les pressions anthropogéniques qui s'y exercent.

#### Le socle

8 masses d'eau souterraine sont surveillées par 14 points de mesures du réseau RCS et sont complétées par de nombreux captages AEP (environ 900). La représentativité surfacique calculée montre une très mauvaise estimation

de celle-ci pour les masses d'eau souterraines les plus grandes (supérieure à 2000 km2). Une station de mesures représente en moyenne quelques pourcentages à peine de la surface totale de la masse d'eau.

Le respect des règles de densité minimale n'est donc pas suffisant pour assurer une bonne représentativité des mesures face à la masse d'eau, de plus des niveaux aquifères présentant des chimies différentes sont rarement différenciés dans les masses d'eau souterraine de socle.



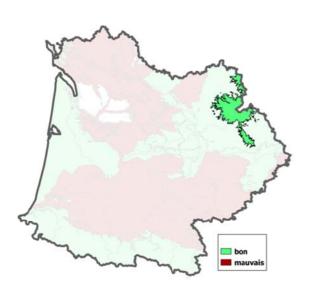
Aussi les résultats de l'état chimique validés par les experts locaux montrent une grande diversité de la qualité des eaux souterraines, 4 masses d'eau en bon état et 4 masses d'eau en mauvais état mais chacune d'entre elles pouvant avoir des secteurs en bon état et inversement.

#### L'intensément plissé :

8 masses d'eau souterraines de typologie «intensément plissé» localisées dans les Pyrénées sont surveillées par 20 points RCS complétés par un peu plus de 800 captages AEP.

La densité minimale DCE est peu adaptée aux masses d'eau de petites surfaces (inférieures à 600 Km2) car au mieux il y a un seul point de mesures RCS, pour les masses d'eau dont les surfaces sont supérieures à 1800 Km2, il y a entre 2 à 7 stations RCS (ce qui reste supérieur à la densité RCS).

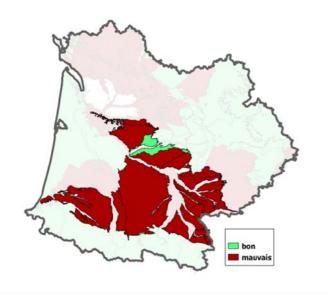
La représentativité surfacique calculée est moyenne et largement complétée par les analyses



du contrôle sanitaire des captages AEP nombreux. Au vue des faibles pressions anthropiques qui s'exercent sur ces masses d'eau, cela ne pose pas de problème de représentativité. L'ensemble de ces 8 masses d'eau reste classée en bon état chimique.

#### Le volcanisme :

Les 4 masses d'eau souterraine «volcanisme» sont suivis par 3 stations RCS pour les deux masses d'eau les plus grandes. La densité minimale DCE (1/3500km2) étant très supérieures aux surfaces de ces masses d'eau, et le peu de pression anthropique s'exerçant sur ces dernières font que les analyses issues du contrôle sanitaire des captages AEP (environ 100) ont été utilisées pour évaluer l'état chimique. Ces masses d'eau ont été régulièrement classées en bon état chimique.



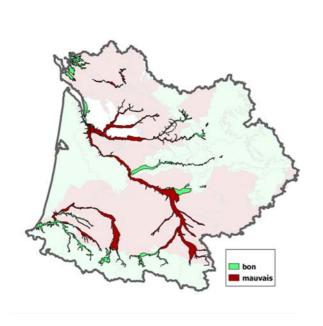
# Les molasses ou masses d'eau localement aquifères :

Les 6 masses d'eau souterraine de typologie «imperméable ou localement aquifère» surveillées par 3 stations RCS, posent un vrai problème de représentativité.

Elles représentent 22% de la surface des masses d'eau souterraine libre du bassin. Elles sont de grandes surfaces, très hétérogènes et surtout peu aquifères. Localement la présence de quelques captages AEP (environ 50) a justifié le découpage de ces masses d'eau

#### souterraine.

Il n'y a pas de densité minimale DCE, ce sont les analyses du contrôle sanitaire qui ont été utilisées mais dans certains secteurs elles n'ont été pas assez nombreuses.



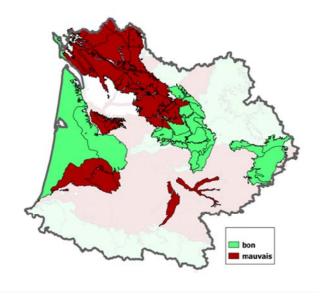
Après de longues discussions avec les experts locaux, prenant en compte les fortes pressions anthropiques qui s'exercent sur ces masses d'eau, l'ensemble d'entre elles sauf une ont été classées en mauvais état.

#### Les alluvions:

17 masses d'eau souterraine de typologie «alluvions» de surface moyenne de 400 km2 sont surveillées par 51 stations RCS pour répondre au mieux aux pressions très hétérogènes de ces masses

d'eau ou se concentrent beaucoup d'activités anthropiques.

La représentativité moyenne du dispositif RCS est généralement complétée par des stations appartenant à des réseaux complémentaires (RCD, RCO) et par les captages AEP (environ 280).



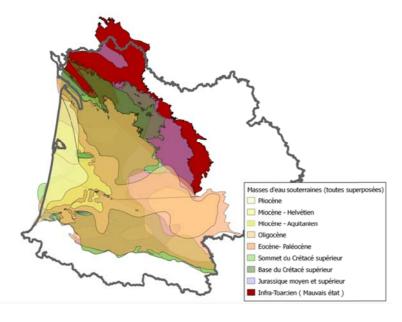
8 masses d'eau restent en mauvais état chimique contre 9 en bon état. En 2012, 3 masses d'eau ont basculées vers le bon état.

#### Le sédimentaire libre :

42 masses d'eau de typologie « sédimentaire libre » sont surveillées par 114 stations de mesures RCS complétées par des stations des réseaux complémentaires et les captages AEP

(environ 500).

La représentativité surfacique est moyenne à bonne sauf pour les masses d'eau de très grandes surfaces ou la densité minimale DCE est mal respectée (en Aquitaine pour les sables du plio-quarternaires).



19 masses d'eau souterraine sont en bon état chimique contre 23 en mauvais état

#### Le sédimentaire captif :

Pour les masses d'eau souterraine

majoritairement captives, la règle de densité minimale (1/3000km2) pourrait être suffisante mais la grande profondeur de certaines masses d'eau rend difficile voire très couteux l'accès aux différents niveaux aquifères.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Les parties libres sont souvent dégradées mais aussi de plus petites surfaces que les parties captives des masses d'eau. Elles ne suffisent donc pas à classer l'ensemble de la masse d'eau en mauvais état.

Sur ces 20 masses d'eau, une seule a été classée en mauvais état (FG078 - l'Infra-Toarcien) à cause du déséquilibre entre la protection naturelle et les fortes pressions anthropiques au nord du bassin Adour Garonne.

Notons que l'ensemble de résultats de l'état chimique présentés dans ce document restent provisoires jusqu'à la validation du comité de bassin Adour Garonne (fin 2013).

#### V. LES EVOLUTIONS ENVISAGEES POUR LE BASSIN ADOUR-GARONNE

A l'échelle du bassin Adour Garonne suite aux différents constats sur la fiabilité des différentes évaluations en lien avec le manque de représentativité sur certaines masses d'eau des stations du réseau RCS, des pistes d'évolutions méthodologiques par type de masses d'eau sont envisagées.

Pour le sédimentaire majoritairement captif, il est envisagé de séparer la partie libre de la partie captive pour tenir compte d'une vulnérabilité et d'une pression anthropique différente. Le respect de la densité minimale pour la partie libre (1/500km2) devrait permettre d'augmenter le nombre de stations RCS et de mieux identifier les surfaces dégradées.

Pour les alluvions et le sédimentaire libre, certaines masses d'eau nécessitent une meilleure connaissance hydrochimique afin de fiabiliser le dispositif de surveillance RCS en lien avec des pressions anthropogéniques très hétérogènes (ex: la nappe de la Dordogne, le pliocène...). Des études de connaissance sous forme d'image photographique par exemple pourront être envisagées au cas par cas selon les besoins.

Pour le volcanisme et l'intensément plissé, le dispositif actuel complété du contrôle sanitaire des nombreux captages AEP suffisent à une évaluation correcte à l'échelle des masses d'eau d'autant plus que les pressions anthropiques y sont généralement faibles.

Pour le socle, différencier les stations qui représentent les niveaux les plus profonds des niveaux superficiels et augmenter le nombre de stations RCS reparties par grands bassins versants, puis compléter le dispositif de contrôles sanitaires (beaucoup de captages AEP sur ces masses d'eau souterraine) permettrait d'augmenter la fiabilité des futures évaluations.

Pour la molasse (ou l'imperméable ou localement aquifère) sans règle de densité minimale, il est nécessaire de mettre en place une stratégie spécifique pour mieux surveiller les parties aquifères de ces grands ensembles. Il est donc envisagé de :

- vérifier que l'ensemble des captages actifs et/ou abandonnés soit bien identifiés par la présence du code BSS (Banque du Sous-Sol gérée par le BRGM) et le code SISE-EAUX, identifiant du captage pour l'ARS (Agence Régionale de la Santé)
- hiérarchiser ces captages en fonction du nombre de la population desservie, du débit journalier supérieur à  $10m^3$ /jour, de la présence d'une ressource de substitution, etc. ...

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

- définir l'aire d'alimentation de chaque captage retenu (AAC).

Cela permettra donc d'identifier ainsi un nouveau référentiel surfacique résultant de la concaténation des Aires d'Alimentation des Captages sur lequel s'appliqueront les règles d'évaluation de la masse d'eau.

Pour l'ensemble des masses d'eau souterraine, il faudra également continuer les efforts de mise en cohérence entre les codes BSS et SISE-EAUX par les ARS et le BRGM pour que l'ensemble des analyses du contrôle sanitaire soit disponible dans la banque nationale de données ADES.

Pour ce qui est de la cohérence entre les pressions et les impacts sur la qualité des eaux souterraines, une meilleure connaissance des temps de résidence moyen des eaux par masse d'eau reste nécessaire à une analyse pertinente des évolutions de la qualité en fonction des changements des activités anthropiques.

#### VI. CONCLUSIONS

Les différents bilans réalisés sur les difficultés à réaliser les évaluations de la qualité des eaux souterraines attendues par la DCE et les avis des experts locaux sur les résultats produits ont permis de réfléchir à des méthodes de travail complémentaires au seul respect des densités minimales par typologie de masses d'eau.

Toutes les évolutions envisagées visent à augmenter l'indice de confiance par masses d'eau des évaluations de la qualité des eaux souterraines. Cette approche par typologie devra nous permettre de mieux prendre en compte les spécificités hydrogéologiques par des réponses adaptées aux différents contextes.

Néanmoins une meilleure coordination de bassin entre les différents partenaires institutionnels sera indispensable pour une optimisation des différents dispositifs envisagés par type de masses d'eau. La réactivation de la cellule CABRES (Cellule d'Animation de Bassin pour les Réseaux de suivis des Eaux Souterraines) est en cours de réflexion pour le bassin Adour Garonne.

De plus l'accès aux ouvrages captant les eaux souterraines se trouvant majoritairement dans le domaine privé, ces dispositifs de surveillance resteront fragiles sans nouvelle réglementation.

L'ensemble de ces travaux pourront alimenter les modifications à venir de la prochaine circulaire nationale pour la surveillance des eaux souterraines dans le cadre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau.

#### Références bibliographiques :

Directive n°2000/60/CE du 23 octobre 2000 : Cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Directive n°2006/118/CE (directive fille) du 12 décembre 2006 : Protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Arrêté du 17 décembre 2008 : Les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines

Directive n°2009/90/CE du 31 juillet 2009 : Les spécifications techniques pour l'analyse chimique et la surveillance de l'état des eaux.

Guide « procédure pour la définition des valeurs seuils et l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau » Version 5.4 – BRGM

Arrêté du 29/07/2011 modifiant l' 'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R.212-22 du code de l'environnement.

Arrêté du 23 juillet 2012 portant modification de l'arrêté du 17 juillet 2009 relatif aux mesures de prévention ou de limitation des introductions de polluants dans les eaux souterraines.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Caractérisation physique et approche numérique du rôle des aquitards dans les systèmes aquifères multicouches – Application au complexe tertiaire nord-aquitain

### CABARET Olivier (1), DUPUY Alain (2), LARROQUE François (2)

(1) Travaux de recherche réalisés à l'Institut EGID – Bordeaux 3, Actuellement au BRGM Aquitaine

(2) ENSEGID – Institut Polytechnique de Bordeaux o.cabaret@brgm.fr; Alain.DUPUY@ensegid.fr; Francois.LARROQUE@ipb.fr

#### I. Introduction

Le Bassin aquitain forme un système multicouche complexe dans lequel six grands aquifères sont séparés par des horizons semi-perméables baptisés aquitards ou épontes (Figure 1). Ces derniers sont généralement représentés au sein des bassins sédimentaires par des matériaux argileux ou marneux de faible perméabilité, où le captage de quantités d'eau appréciables n'est pas possible, mais à travers lequel des transferts d'eau significatifs sont possibles en provenance ou à destination d'aquifères contigus [1].

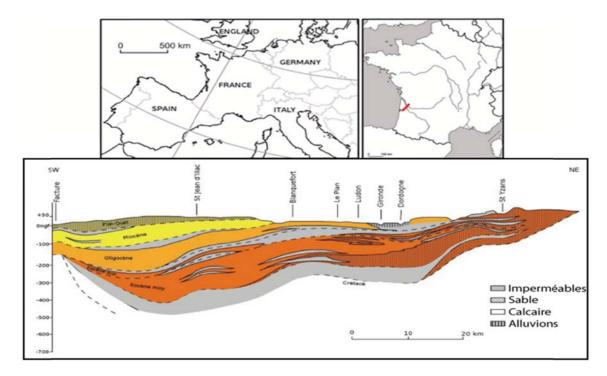


Figure 1 – Coupe hydrogéologique schématique du multicouche tertiaire nord-aquitain [2]

Au sein de ces grands systèmes, les aquitards jouent un rôle majeur dans la recharge des réservoirs. En effet, le phénomène de drainance qui correspond à un flux d'eau transitant des aquitards vers les aquifères peut représenter une composante non négligeable de la recharge des nappes d'eau souterraine. Toutefois, l'actuel manque de connaissances sur les caractéristiques géologiques et

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

hydrogéologiques de ces aquitards entraine de grandes incertitudes quant aux quantités d'eau participant à la recharge des aquifères. Ce déficit d'informations s'explique par le fait que ces horizons ne sont pas exploitables pour l'alimentation en eau potable mais aussi que les méthodes de caractérisation hydrogéologique sont plus difficiles à appréhender que celles des aquifères [3, 4, 5].

Dans le Bassin aquitain, l'estimation des flux de drainance n'est réalisée qu'à partir des modèles hydrodynamiques dans lesquels soit les horizons semi-perméables sont considérés homogènes soit la zonation des champs de perméabilités et leurs plages de variations ne sont qu'indicatives puisqu'elles ne sont obtenues que par calage, « faute d'informations sur les épontes » [6]. Nous proposons au cours de ce travail de caractériser ces formations semi-perméables tant du point de vue géologique qu'hydrodynamique en s'appuyant sur des méthodes directes, indirectes et numériques. Elles ont pour support d'étude le complexe tertiaire nord-aquitain et plus particulièrement la région de Bordeaux, soumise à d'importants prélèvements, qui intègre les aquifères captifs de l'Eocène, de l'Oligocène et du Miocène ainsi que de celui, libre, du Plio-Quaternaire. La première méthode consiste à intégrer les outils diagraphiques pour redéfinir l'agencement vertical des couches et préciser le degré d'hétérogénéité des aquitards. La seconde méthode s'appuie sur la mise en place inédite dans la région d'un forage réalisé directement dans un aquitard et dédié à la mesure des propriétés hydrodynamiques de ces horizons semi-perméables. L'ensemble des données sera in fine intégré dans un modèle hydrodynamique numérique afin de préciser les flux de drainance et le rôle de ces aquitards dans la recharge des systèmes aquifères multicouches.

#### II. Caractérisation géologique

A l'image des aquifères, les horizons aquitards ne sont pas homogènes. Des niveaux plus ou moins perméables sont présents au sein des formations argileuses et se manifestent par des horizons silteux, sableux ou encore calcaires. Ainsi, certains de ces aquitards renferment des aquifères isolés. Cependant, les épaisseurs ou les propriétés transmissives faibles de ces niveaux permettent de considérer l'ensemble comme une éponte. Dans l'optique d'une évaluation des propriétés hydrogéologiques de ces formations semi-perméables, une caractérisation lithologique détaillée de l'ensemble s'avère alors nécessaire. Celle-ci a été entreprise à l'aide de diagraphies qui correspondent à des enregistrements en continu de paramètres physiques et/ou chimiques en fonction de la profondeur [7]. Ces paramètres, étroitement reliés à la géologie, constituent une aide précieuse à la description lithologique des formations traversées par le forage.

La constitution d'une base de données a permis de récupérer sur 114 ouvrages du secteur bordelais l'ensemble des informations nécessaires à une réinterprétation géologique multicouche tertiaire. Ces données concernent aussi bien les informations sur la complétion des forages que les données géologiques et géophysiques. Ces dernières intéressent la radioactivité naturelle totale, la résistivité normale et la débitmétrie. La réinterprétation de la géologie à partir de mesures géophysiques de puits a reposé sur la notion de faciès diagraphiques [8, 9, 10] qui synthétise l'ensemble des réponses diagraphiques qui permettent de caractériser un banc ou une formation. Ainsi, la « signature diagraphique » [11] attendue des aquitards correspond, de par leur caractère argileux, à une radioactivité naturelle forte, une résistivité faible et l'absence de production d'eau.

La complexité du secteur d'étude qui s'exprime au travers d'un réseau de failles important, de la présence d'une structure anticlinale (Villagrains-Landiras) ou encore l'incision des formations par un réseau hydrographique dense, a rendu difficile l'identification de ces faciès diagraphiques. Toutefois, cette réinterprétation a conduit à la mise à jour de l'agencement vertical des formations

sédimentaires de la région bordelaise et a défini un nouveau schéma hydrogéologique dont les éléments marquants sont (Figure 2) :

- la présence d'un niveau argileux à la base du recouvrement plio-quaternaire
- des lacunes de dépôts de l'éponte chattienne conduisant à une continuité hydraulique des aquifères miocène et oligocène,
- la présence d'un niveau plus calcaire et sableux au sein de l'éponte oligocène-éocène d'épaisseur faible (≈ 10 m) et d'extension limitée,
- la distinction en trois sous-unités du réservoir éocène.

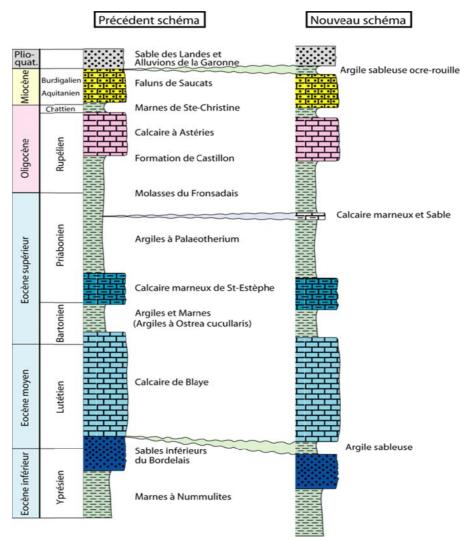


Figure 2 – Nouveau schéma sédimentaire bordelais [12]

Au final, l'apport des mesures diagraphiques a permis l'amélioration de la résolution structurale et sédimentaire du système géologique. Elle aura changé une vision globale « continue » des structures en une vision « discontinue » liée à la présence ou non de couches argileuses et à leur hétérogénéité.

#### III. Caractérisation hydrogéologique

Les propriétés hydrodynamiques des aquitards ont été approchées grâce à la réalisation d'un forage expérimental, dénommé OPURES\_1, dédié à l'étude de l'aquitard oligocène-éocène au nord de la

zone d'étude (Figure 3). Ce forage, réalisé directement dans les formations argileuses présentes entre 29 m et 85 m de profondeur, a été exécuté par la méthode rotary et par carottage. Après mesures diagraphiques, il a été instrumenté sous la forme d'un puits multi-niveaux où chacune des cinq chambres de contrôle a consisté à disposer au sein d'un gravier grossier deux tubages inox crépinés sur un mètre. L'un pour effectuer un suivi en continu des pressions, l'autre permettant de réaliser des prélèvements. Chaque chambre est surmontée d'une couche de gravier fin puis est isolée par cimentation sous pression.

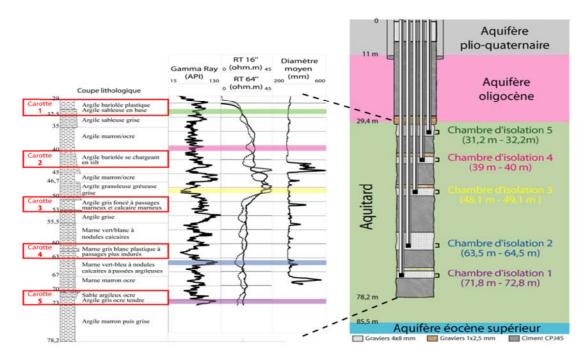


Figure 3 – Forage OPURES\_1. Coupe géologique, mesures diagraphiques et coupe technique [12]

L'observation des cuttings et carottes ainsi que les mesures diagraphiques montre une certaine hétérogénéité de cet aquitard qui se manifeste au sein d'un ensemble argileux par des niveaux siltosableux et calcaires généralement peu développés et avec des indurations plus ou moins marquées. Les mesures de résistivité identifient un passage silto-sableux correspondant à la couche semi-perméable observée précédemment à l'échelle du domaine d'étude.

Sur les carottes récupérées, une caractérisation du réseau poreux des argiles a été effectuée à l'aide de la méthode de porosimétrie mercure [13, 14]. Celle-ci consiste à soumettre un échantillon de roche désaturé à une injection de mercure. Sous l'effet de l'augmentation de pression sur ce mercure, par paliers successifs, l'air contenu dans l'échantillon est progressivement remplacé par le mercure. Ce mercure étant un liquide non mouillant, son injection dans un matériau est réalisée en lui appliquant une pression d'autant plus forte que les pores sont plus petits. A partir de ces mesures pétrophysiques, une estimation de la conductivité hydraulique des carottes a été réalisée selon deux approches différentes. La première, celle de Dullien [15], assimile la distribution du réseau poreux à des tubes capillaires. La méthode de Katz-Thompson [16] s'appuie quant à elle sur la longueur caractéristique de l'échantillon, obtenue à partir de la courbe d'injection de mercure, et reliée à la perméabilité grâce à des mesures de résistivité du milieu.

Les deux modèles s'accordent sur une valeur moyenne de perméabilité de l'ordre de 1.10<sup>-9</sup> m.s<sup>-1</sup> mais avec des amplitudes plus importantes pour le modèle de Katz-Thompson, comprises entre 10<sup>-12</sup> à 10<sup>-7</sup> m.s<sup>-1</sup>. Les niveaux silto-sableux, à plus forte proportion de macropores, présentent des conductivités hydrauliques supérieures d'environ un ordre de grandeur (Figure 4).

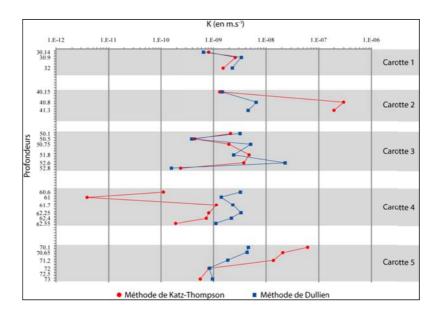


Figure 4 – Résultats des conductivités hydrauliques obtenues par la méthode de Katz-

#### Thompson et de Dullien [12]

En complément, l'enregistrement des pressions au sein de l'aquitard a servi à l'estimation de la diffusivité de l'aquitard. Dans un premier temps, la réponse de l'aquitard à la pression atmosphérique a été utilisée pour déterminer le coefficient d'<u>emmagasinement</u> spécifique de la formation à environ  $10^{-6}$  m<sup>-1</sup>. Ensuite, les fluctuations cycliques observées sur les enregistrements de pression ont permis d'estimer la diffusivité verticale de l'aquitard. Les perméabilités obtenues sont comprises entre  $1.10^{-11}$  m.s<sup>-1</sup> et  $7.10^{-12}$  m.s<sup>-1</sup>, lesquelles sont dans la gamme basse de celles obtenues par l'analyse pétrophysique.

#### IV. Approche numérique

Le nouvel agencement vertical des dépôts issu des réinterprétations diagraphiques et les propriétés hydrodynamiques des aquitards obtenues à partir de mesures en laboratoire et in situ ont servi de base à un modèle hydrogéologique 3D réalisé dans le but d'approcher quantitativement le rôle des aquitards dans le fonctionnement hydrodynamique du système <u>aquifère</u>.

Le domaine modélisé (Figure 5) prend en compte l'essentiel du domaine d'exploitation d'eau potable de la communauté urbaine de Bordeaux et couvre une superficie de 827 km². Il consiste en un maillage carré au pas de 200 m. La période de simulation s'étend de 1999 à 2008 avec un pas de temps

mensuel.

La discrétisation verticale des horizons observés dans le domaine d'étude est reproduite sous forme de 13 couches de calcul représentées par 6 <u>aquifères</u> et 6 aquitards auxquelles s'ajoute l'horizon semi-perméable révélé au sein de l'<u>éponte</u> oligocène-éocène.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

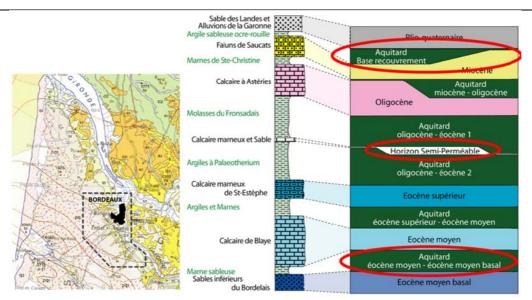


Figure 5 – Emprise du modèle et transposition numérique de la géologie [12]

Suite aux calages en permanent puis transitoire, le modèle a permis de restituer le comportement des fonctions stockage/destockage des différents aquitards (Figure 6). Selon la position des aquitards au sein du multicouche, des différences de comportement sont observables. Ainsi, ceux situés à proximité de la surface, comme celui entre les <u>aquifères</u> plio-quaternaire et miocène, destockent durant la majeure partie de l'année tandis que le stockage ne s'effectue que sur des périodes courtes durant la recharge par les précipitations de janvier à mars. Plus en profondeur, la dynamique des flux est similaire mais présente moins de régularité dans le destockage. Enfin, les aquitards de l'Eocène montrent une structuration nettement différente des aquitards précédents. Les contraintes hydrodynamiques auxquelles sont soumis ces aquitards par le biais des pompages d'exploitation étant probablement à l'origine de cette dynamique.

En complément, l'influence de l'horizon semi-perméable révélé au sein de l'aquitard oligocèneéocène sur l'hydrodynamisme général a été précisé. Un second modèle a ainsi été réalisé. Il reprend en tout point les caractéristiques du modèle précédent et ne diffère que par les valeurs de conductivité hydraulique de cet horizon semi-perméable qui ont été affectées de celles de l'aquitard oligocène-éocène.

Les résultats ont montré que l'intégration d'une couche semi-perméable, d'extension et d'épaisseur relativement faibles, au sein de l'aquitard principal de la zone d'étude n'a pas généré d'influence notable sur les variations de charges calculées au sein des <u>aquifères</u>. Toutefois, le bilan global révèle que la présence de cette couche a conduit à une augmentation de l'ordre de 3 % des flux provenant de l'aquifère oligocène et ceux participant à la recharge de l'aquifère éocène supérieur. Enfin, un calcul des vitesses moyennes de transfert réalisé à l'aide du modèle a montré que la non prise en compte d'une couche semi-perméable revient à minorer les transferts hydriques verticaux en introduisant un retard dans l'écoulement. En effet, la présence de cet horizon semi-perméable a permis d'observer une augmentation de l'ordre de 10 % des vitesses d'écoulement. L'intégration d'hétérogénéités même de faible extension au sein des aquitards apparait dès lors essentielle pour une gestion raisonnée à moyen et long-terme d'un système aquifère multicouche complexe à l'échelle locale.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

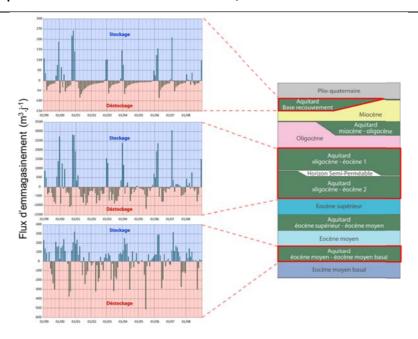


Figure 6 – Evolution du flux d'emmagasinement de trois aquitards sur la période 1999-2008

[12]

#### V. Conclusion

Dans les bassins sédimentaires, sièges de systèmes aquifères multicouches, les aquitards exercent un rôle prépondérant sur l'hydrodynamisme, contrôlant à la fois la quantité et la qualité d'une partie des eaux circulant dans les aquifères. La complexité de l'organisation de ces formations aquitards, qu'elle soit structurale, géologique ou encore hydrodynamique, mais également le défaut d'informations les concernant conduisent généralement à des incertitudes quant à la quantification de leur influence sur les transferts inter-aquifères.

Le système aquifère multicouche nord-aquitain fait ici figure d'exemple tant les inter-relations entre les différents aquifères au travers des aquitards sont marquées. Une approche quantitative du rôle de ces couches semi-perméables a été menée dans un premier temps en revisitant le schéma conventionnel d'agencement vertical des dépôts tertiaires de la région bordelaise à l'aide de réinterprétations diagraphiques. Celles-ci ont ainsi permis d'identifier la continuité ou non d'horizons argileux au sein du multicouche et d'évaluer le degré d'hétérogénéités des aquitards en révélant notamment la présence d'une couche semi-perméable au sein de l'éponte principale du domaine d'étude. Dans un second temps, un puits multi-niveaux dédié à l'étude des aquitards a été réalisé pour la première fois dans la région. Les mesures pétrophysiques réalisées sur les carottes récupérées au cours de forage, ainsi que le suivi et l'analyse des séries de pression au sein de l'aquitard ont permis de préciser les propriétés hydrodynamiques des horizons argileux. Enfin, l'approche quantitative du rôle des aquitards dans le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère a été réalisée à l'aide d'un modèle hydrogéologique. Celui-ci prend en compte la géométrie revisitée, issue des données diagraphiques, et intègre les valeurs des paramètres hydrodynamiques obtenues par les mesures de laboratoire et in situ. L'analyse des résultats du modèle a mis en exergue l'importance des flux de drainance issus des aquitards dans la recharge des aquifères et a démontré l'impact et le rôle d'un horizon semi-perméable au sein d'un aquitard puissant.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Ces résultats montrent au final que l'utilisation de paramètres hydrauliques équivalents reste une solution correcte pour un modèle hydrodynamique régional. Toutefois, dans l'optique d'une gestion raisonnée (quantitative et qualitative) à court et long terme des ressources en eau souterraines d'un système aquifère multicouche complexe, la prise en compte des hétérogénéités au sein des aquitards pour un modèle à résolution plus élevée reste indispensable.

#### Références bibliographiques :

- [1] Castany G., Margat J., 1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM.
- [2] Moussié B., 1972. Le système aquifère de l'Éocène moyen et supérieur du bassin nord aquitain Influence du cadre géologique sur les modalités de circulation, *Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 73p*.
- [3] Van der kamp G., 2001. Methods for determining the in situ hydraulic conductivity of shallow aquitards an overview, *Hydrogeology Journal*, *9*, pp.5-16.
- [4] Bradbury K.R., Gotkowitz M.B., Hart D.J., Eaton T.T., Cherry, J.A., Parker B.L., Borchardt M.A., 2006. Contaminant transport through aquitards: technical guidance for aquitard assessment. *Publication 91133b, American Water Works Association Research Foundation, 176p*.
- [5] Cherry J.A., Parker B.L., Bradbury K.R., Eaton T.T., Gotkowitz M.B., Hart D.J., Borchardt M.A., 2006. Contaminant transport through aquitards: a state-of-the-science review. *Denver, Colorado, Awwa Research Foundation*, 152p.
- [6] Pédron N., Platel J.P., Lopez B., 2005. Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine Développements et maintenance du modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes Module 4 Année 2. *Rapport BRGM/RP-53659-FR*, 96 p., 43 fig., 8 tableaux, 8 annexes.
- [7] Ellis D.V., Singer J.M., 2007. Well logging for earth scientists. Springer, 692p.
- [8] Sigal J., 1982. La stratigraphie, ses méthodes; crise et renouveau. *Travaux du Comité Français d'histoire de la géologie. 1e série, n°50, 18p., 4fig.*
- [9] A.S.F., 1989. Dynamique et méthodes d'étude des bassins sédimentaires. Association des sédimentologistes français, Editions Technip, 444p.
- [10] Muldoon M.A., Simo J.A., Bradbury K.R., 2001. Correlation of hydraulic conductivity with stratigraphy in a fractured-dolomite aquifer, northeastern Wisconsin, USA, *Hydrogeology Journal*, *9*, pp.570-583.
- [11] Nida M.J., 1993. Etude diagraphique des faciès du Dogger du bassin de Paris, *Thèse de doctorat, Université de Nancy I, 226p*.
- [12] Cabaret O., 2011. Caractérisation physique et approche numérique du rôle des aquitards dans les systèmes aquifères multicouches Application au complexe tertiaire nord-aquitain. *Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 3, 317p*.
- [13] Pittman E.D., 1992. Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves for sandstone, *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 76 (2), pp.191-198.
- [14] Daïan J.F., 2007. Porométrie au mercure Le modèle XDQ, 97p.
- [15] Dullien F.A.L., 1992. Porous media: Fluid transport and pore structure. *Second edition, Academic press, 574p*.
- [16] Katz A.J., Thompson A.H., 1986. Quantitative prediction of permeability in porous rock, *Physical review B*, 34 (11), pp.8179 -8181.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Modélisation Mathématique d'Hydrosystèmes Complexes Application au système de l'eau minérale naturelle d'Evian

A. Henriot<sup>(1,2)</sup>, O. Beon<sup>(1)</sup>, B. Blavoux<sup>(2)</sup>, B.Dewandel<sup>(3)</sup>, P. Lachassagne<sup>(1)</sup>, B.Ladouche<sup>(3)</sup>, Y.Travi<sup>(2)</sup>

(1) Evian Volvic World Sources, BP 87, 11 Av. Général Dupas, 74503 Evian-les-Bains Cedex, France

patrick.lachassagne@danone.com, abel.henriot@danone.com

(2) UMR 1114 EMMAH - Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse – INRA- , 33 rue Louis Pasteur, 84000 Avignon, France

bernard.blavoux@gmail.com, yves.travi@univ-avignon.fr

(3) BRGM, Water Division, 1039 rue de Pinville, F-34000 Montpellier, France b.ladouche@brgm.fr, b.dewandel@brgm.fr

#### I.OBJET D'ETUDE

Situé sur la rive sud du lac Léman, l'aquifère d'Evian est un complexe sédimentaire d'origine glaciaire d'âge quaternaire, reposant en discordance sur les nappes de charriage des Préalpes. Son édification due au glacier du Rhône s'est faite en trois phases majeures qui contrôlent en partie son fonctionnement (Fig. 1).

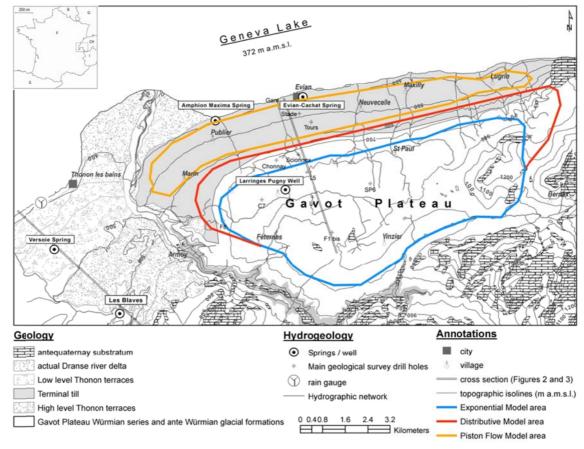


Figure 1 – Localisation de la région d'Evian et principales unités géologiques (Blavoux et al, 2013, modifiée)

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Le **Complexe Inférieur** daté du Riss se présente majoritairement sous la forme de moraines de fond considérées comme imperméables. Elles interdisent les échanges éventuels avec les nappes des Préalpes et constituent donc une limite à flux nul.

Le **Complexe du Plateau de Gavot** d'âge würmien constitue le sous-sol du plateau de Gavot et consiste en une épaisse série sédimentaire détritique témoignant de conditions de dépôts sous glaciaires (moraine de fond) et de marge glaciaire (moraines latérales, argiles lacustres varvées, tourbes ; d'épaisseur plurihectométrique) dans un contexte de crue du glacier avec de fortes oscillations climatiques [1]. C'est dans cette formation que s'effectue l'essentiel du temps de transfert de l'eau minérale naturelle.

Le **Complexe Emboîté** s'est déposé lors de la dernière récurrence würmienne. Protégées par une épaisse moraine de fond terminale (stade du petit lac), des terrasses de Kame (stade lémanique), formées à la faveur de la progradation de cours d'eaux locaux dans un paléo-lac juxtaglaciaire permettent le transfert de l'eau du système profond du Complexe du Plateau de Gavot vers l'émergence d'eau minérale située à 404 m d'altitude.

#### **II.DIFFERENTES APPROCHES DE MODELISATION**

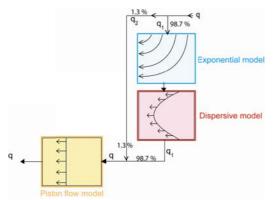
Face à l'extrême complexité du site, la modélisation déterministe du gisement dans son ensemble est, pour le moment, hors d'atteinte du fait du manque d'éléments de contraintes (géométrie de détail, flux précis, etc.) mais reste pour autant un objectif de moyen terme. L'amélioration des connaissances du site est axée autour de (i) la formulation d'un modèle conceptuel portant sur la structure et le fonctionnement des aquifères superficiels du Complexe du Plateau de Gavot, désigné comme l'aire de recharge du système [2]; (ii) le développement de stratégies de modélisation mathématique déclinées à différentes échelles en fonction des éléments de connaissance et de contraintes disponibles, qui visent notamment à améliorer le modèle conceptuel du fonctionnement de l'hydrosystème minéral et à donner localement des éléments de gestion opérationnelle.

#### II. 1. Modèle Conceptuel de l'aire de recharge

L'étude de détail des aquifères locaux de l'aire de recharge (géométrie, piézométrie, géochimie, isotopes, etc.) [2] permet de préciser leur fonctionnement et permet d'accéder à une estimation des flux verticaux alimentant le système profond et à la caractérisation précise des origines de sa recharge. D'autre part, l'intégration de données de traceurs conservatifs (<sup>3</sup>H, Cl<sup>-</sup>, <sup>18</sup>O) à cette démarche permet de fournir une contrainte forte au modèle déterministe.

#### II. 2 Modèles « Boîte Noire » de l'ensemble de l'hydrosystème

Appliqués à des chroniques de concentration en tritium [3] (Fig 2 et 3), les modèles de type « boîtes noires » permettent de montrer que :



- (i) les aquifères superficiels du Plateau de Gavot ont un temps de transit moyen de l'ordre de huit ans et que les écoulements sont de type exponentiel;
- (ii) l'aquifère profond peut être modélisé au moyen d'un modèle dispersif dont le temps de transit moyen est de l'ordre de 60 ans (paramètre de dispersion (DP) 0.75);
- (iii) la partie terminale du complexe hydrominéral (sables et graviers des terrasses de Kame) peut quant à elle être modélisée par un modèle de type piston dont le temps de transit moyen est de l'ordre de 2.5 ans.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

Figure 2 – Synoptique du modèle global, combinaison de modèles globaux en séries (Blavoux et al, 2013, modifiée)

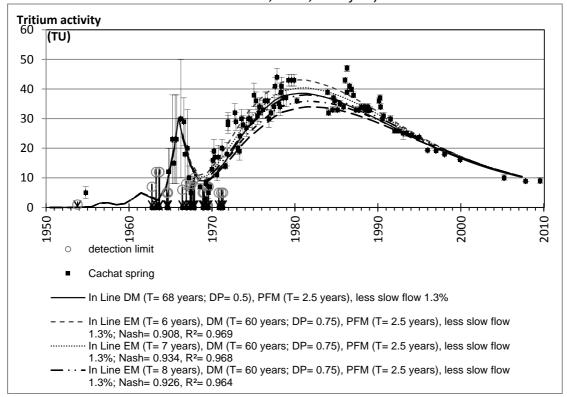


Figure 3 – Restitution du modèle global, chronique de tritium mesurée à la source Cachat (Blavoux et al, 2013, modifiée)

#### II. 3 Modèles déterministes

Sur des sites dont la géométrie notamment est mieux caractérisée, la modélisation déterministe (modèle maillé aux différences finies) des systèmes terminaux du complexe emboîté est mise en œuvre. Ce type de modèle permet de critiquer et de consolider le modèle conceptuel local et les hypothèses de circulation dans les corps sableux des terrasses de Kame. Il permet également d'évaluer les hypothèses d'alimentation des systèmes terminaux, au regard notamment de la piézométrie et sert d'appui à la gestion opérationnelle du gisement minéral. Il est fortement basé sur les apports de l'approche de type boîte noire, notamment en termes de fonction d'entrée des traceurs conservatifs.

#### III. PERSPECTIVES

L'intégration des nombreuses données disponibles d'estimation des âges de l'eau (CFC, SF6, <sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He, traceurs conservatifs) ou de l'altitude de recharge (<sup>18</sup>O) au sein des différents modèles représente une perspective d'amélioration des modèles.

Les différents apports des approches conjointes de modélisation de type boîte noire et déterministe améliorent le modèle conceptuel de l'hydrosystème. La prochaine étape avant un réel modèle de gestion opérationnel est la modélisation déterministe simplifiée à l'échelle du complexe du plateau de Gavot et du complexe emboîté.

#### Références bibliographiques :

[1] Triganon A., Nicoud G., Guiter F., Blavoux B., 2005. Contrôle de la construction de l'ensemble détritique de la région d'Evian par trois phases glaciaires durant le Würm. Quaternaire 16, 57-63.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

<sup>[2]</sup> Henriot. A., Lachassagne P., Blavoux B., Travi Y., in prep. Fonctionnement hydrogéologique d'un complexe de marge glaciaire (plateau de Gavot). Hydrogeology Journal.

<sup>[3]</sup> Blavoux B., Lachassagne P., Ladouche B., Marc V., Olive Ph., Beley J.J., Henriot A., Nicoud G., 2013, sous presse. A Forty-five-years chronicle of tritium data for characterizing the functioning of the Evian and Thonon (France) glacio-fluvial aquifers. Journal of Hydrology.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai − 2 juin 2013

## L'aquifère des calcaires oligocènes du bassin de Saffré (44), une ressource en eau au comportement hydrogéologique atypique

PH. Mondain <sup>(1)</sup>, C. Boulay <sup>(1)</sup>

(1) CALLIGEE – 1, rue de la Noë – BP 82118 – 44321 Nantes Cedex 3 ph.mondain@calligee.fr - c.boulay@calligee.fr

#### **I.INTRODUCTION**

Au sein du Massif armoricain les ressources en eau souterraines sont le plus souvent médiocres. Cependant les sédiments tertiaires piégés au cœur de bassins d'effondrements, isolés et alignés le long de fractures régionales, constituent une ressource en eau appréciable. Le bassin de Saffré, au Nord de Nantes, en est un exemple. D'une superficie de l'ordre de 30 km², il est constitué par une série sédimentaire reconnue en forage sur 331 m qui s'est déposée entre l'Eocène moyen (Lutétien sup.) et l'Oligocène inférieur (Stampien inférieur). Ces sédiments ont ensuite été exondés et soumis à l'altération et à l'érosion à partir du Miocène, avant d'être recouverts par des dépôts sablo-graveleux au Plio-Quaternaire.

Les calcaires marins du Stampien renferment une nappe exploitée par 2 forages voisins équipés pour fournir un débit total instantané de 500 m³/h. Leur production annuelle est en moyenne de 2,5 Mm³. Une étude hydrogéologique approfondie a été engagée par le S.I.A.E.P. de la Région de Nort-sur-Erdre, propriétaire des captages, dans le but de mieux cerner les conditions d'alimentation des captages et d'apprécier le degré de karstification de cet aquifère carbonaté. La mise en exploitation des forages est en effet suspectée par la population locale de provoquer des effondrements karstiques (1, 2).

#### II.CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET HYDROGRAPHIQUE

Le Bassin de Saffré est localisé en Loire-Atlantique, à environ 25 km au Nord de l'agglomération nantaise. La présence du bassin se traduit dans la topographie par un relief relativement plat où les altitudes sont en règle générale comprises entre 25 et 30 m. Le bourg de Saffré est implanté au cœur du bassin. Celui-ci est recoupé par un réseau hydrographique composé de 4 cours d'eau dont l'écoulement global est dirigé du Nord / Nord-Est vers le Sud / Sud-Ouest (Fig. 1) :

- l'Isac, le cours d'eau principal qui traverse du Nord au Sud le bourg de Saffré ;
- Le Pas-Sicard et son affluent le ruisseau de Puceul au Nord-Ouest. Il se jette dans l'Isac à 2 km au Sud-Ouest du bourg de Saffré;
- L'Apsiguais au Sud-Est qui rejoint l'Isac à 1 km au Sud du bourg.

Ces cours d'eau ont un écoulement temporaire. Ils se tarissent naturellement en période de basses eaux principalement en raison d'un manque de soutien de leur débit d'étiage par les eaux souterraines dont les réserves sont insignifiantes au sein des formations à dominante schisteuse du socle armoricain constituant l'amont de leur bassin versant.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### **III.CONTEXTE GEOLOGIQUE**

#### III. 1 Historique des reconnaissances du bassin

La première carte géologique du bassin de Saffré a été établie par Vasseur en 1881 (3). Il signale notamment la présence de calcaires oligocènes qui étaient dès 1813 déjà exploités en carrières pour alimenter des fours à chaux. En 1951 une campagne de 7 forages ayant pour objectif la recherche d'eau permet d'obtenir les premières coupes géologiques du bassin (4), le plus profond atteint alors 112 m de profondeur. D'autres campagnes de reconnaissance en vue de l'exploitation de roches calcaires sont réalisées par la société Lafarge entre 1964 et 1966. La synthèse de tous ces résultats débouche ensuite en 1977 sur une première interprétation de la structure d'ensemble du bassin et l'implantation d'un sondage (sondage « Montavon ») destiné à reconnaître l'ensemble de la série sédimentaire cénozoïque du bassin de Saffré (5).

#### III. 2 Le contexte stratigraphique

La stratigraphie du bassin est connue grâce à la coupe fournie par le sondage Montavon qui a reconnu a 331 m de profondeur le socle armoricain représenté par les schistes (Ordovicien-Silurien) du Complexe de Saint Georges-sur-Loire (6, 7) (Fig. 2). Elle permet de distinguer quatre grands ensembles sédimentaires :

- un ensemble sablo-gréseux de 30 à 35 m à la base de la série (Eocène, Lutétien sup.) reposant sur des graviers issus de l'érosion du socle ;
- un ensemble argileux verdâtre très épais (173 m) déposé à la fin de l'Eocène (Barthonien sup.) et au début de l'Oligocène (Stampien inf.) ;
- une ensemble carbonaté marin puis palustre essentiellement calcaire de près de 90 m d'épaisseur (Stampien sup.) constituant l'aquifère exploité pour les besoins AEP du SIAEP de Nort-sur-Erdre;
- un ensemble marno-calcaire d'environ 35 m de puissance déposé en milieu lacustre (Stampien sup.) correspondant à la fermeture du bassin.

Ce bassin a été exondé durant tout le Miocène, soit durant près de 20 millions d'années. La série sédimentaire oligocène a donc été soumise à l'érosion et à l'altération, avant que ne se déposent durant le Plio-Quaternaire des sables et des graviers plus ou moins argileux dont la puissance peut localement dépasser à Saffré la vingtaine de mètres.

#### III. 3 Le contexte structural

Le massif armoricain a été affecté par une phase d'extension au début du Cénozoïque, au moment de l'orogénèse pyrénéenne. C'est à cette période qu'apparaissent des failles normales donnant naissance au bassin d'effondrement de Saffré. Cependant la position des failles majeures encadrant le bassin demeurait imprécise. Une campagne de prospection géophysique a donc été effectuée pour préciser la structure centrale du bassin (1). Plusieurs méthodes complémentaires ont été mises en œuvre : prospection électromagnétique EM34-3 (maille 100x 100 m), panneaux et sondages électriques. Elle a été complétée par la réalisation de 4 piézomètres dans le bourg de Saffré. Ces nouvelles données ont permis d'établir une carte géologique plus précise de la structure du bassin, et de dresser des coupes géologiques interprétative mettant notamment en évidence l'agencement des calcaires oligocènes au sein de ce bassin (Fig. 3 et 4).

Les calcaires aquifères affleurent à l'Ouest et au Sud-Ouest du bourg de Saffré, puis à la faveur de failles successives, ils s'enfoncent progressivement vers l'Est / Sud-Est. Un couloir faillé étroit est à l'origine de la remontée du toit des calcaires à une dizaine de mètres de profondeur (Fig. 4). Il sert de transition entre le compartiment central du bassin qui est le plus effondré et les compartiments

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

surélevés est et nord-est où la série argileuse inférieure revient à l'affleurement. Cette structure permet de découper le bassin en trois principaux ensembles (Fig. 3) :

- un ensemble central bordé de failles au sein duquel sont implantés les captages AEP où les calcaires sont surmontés par une série marno-calcaire puis argileuse de 30 à 50 m d'épaisseur;
- un ensemble à l'Ouest et au Sud-Ouest où les calcaires sont proches de la surface et le plus souvent surmontés par une couverture plio-quaternaire sableuse plus ou moins épaisse. Des faciès marneux peuvent aussi affecter localement la partie supérieure des calcaires ;
- à l'Est et au Nord-Est, des compartiments surélevés où affleurent uniquement les argiles de la base de la série oligocène. Les calcaires y sont donc absents.

Ce contexte structural particulier est à l'origine d'un comportement hydrogéologique singulier mis en évidence par la réalisation de nombreux suivis piézométriques, de jaugeages, d'essais de pompages et d'un suivi de la conductivité sur les captages (2).

#### IV.FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN

#### IV. 1 L'aquifère exploité et son alimentation

Il s'agit des calcaires marins oligocènes possédant des caractéristiques hydrodynamiques intéressantes qui ont été déterminées à partir des pompages d'essai effectués sur les captages : une transmissivité moyenne de 5,95 .  $10^{-2}$  m²/s et un coefficient d'emmagasinement moyen de 4,7 .  $10^{-3}$  . Ces calcaires sont très peu visibles à l'affleurement, car ils sont soit surmontées par des dépôts sableux pliocènes, soit par des marnes issues de leur altération en surface. Leur alimentation se fait de deux manières :

- à partir des pluies qui s'infiltrent à travers les formations sableuses pliocènes recouvrant les calcaires ;
- à partir de pertes dans le lit des cours d'eau recoupant le bassin.

Des pertes bien individualisées sont observables dans le lit des cours d'eau, mais celles-ci peuvent être aussi diffuses. Des jaugeages sériés ont permis de localiser les tronçons de cours d'eau concernés. Il s'avère qu'ils correspondent généralement aux tronçons où les cours d'eau sont établis à l'aplomb des failles majeures structurant le bassin (Fig. 3). Ces pertes absorbent en période de moyennes à basses eaux l'intégralité des débits des quatre cours d'eau entrant dans le bassin. Plusieurs traçages ont mis en évidence une relation étroite entre ces pertes et l'alimentation des captages AEP (8, 9). Les vitesses maximales de transit mises en évidence demeurent modérées. Elles sont de l'ordre de 20 m/h.

De nombreuses pertes ponctuelles étaient associées à des effondrements se produisant dans le lit des cours d'eau ou en bordure. Dans les années 1990 à 2000, ces pertes étaient systématiquement rebouchées par souci d'assurer la protection des captages. Mais aussitôt après leur colmatage, de nouvelles zones de perte apparaissaient non loin dans le lit des ruisseaux. L'existence de ces pertes et de ces effondrements laissa penser que nous étions en présence d'un aquifère très karstifié risquant de provoquer d'importants désordres aux habitations du secteur, ce que viennent tempérer les résultats présentés ici.

#### IV. 2 Le degré de karstification de l'aquifère

Dans un contexte topographique assez plat, il paraissait pour le moins surprenant de rencontrer un aquifère karstique développé, d'autant plus qu'aucun exutoire naturel du système karstique n'était

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

clairement identifié. Par ailleurs les manifestations karstiques en surface, ou en profondeur grâce à l'analyse des coupes de forage, restent très modestes.

En surface, en dehors des pertes et des effondrements de taille métrique à plurimétrique signalés, aucune morphologie exokarstique typique (doline, lapiaz ...) n'est observable. Aucune cavité karstique pénétrable n'est signalée. Seulement ont été observés quelques conduits karstiques subverticaux de taille pluridécimétrique en lien avec des effondrements, et une cavité (probablement modeste) mise à jour par des terrassements dont les dimensions n'ont pas été précisées. En profondeur, le seul indice signalé en forage concerne le captage F2 qui a recoupé une zone karstifiée entre 64 et 68 m de profondeur au sein des calcaires.

La présence d'une véritable cavité karstique est néanmoins signalée dans des documents historiques (10) qui font état d'un gouffre insondable en bordure de l'Isac au Sud de la ferme de la Chutenaie. Il s'agissait en réalité d'une source vauclusienne temporaire constituée par une vasque de 40 m de diamètre dont les écoulements alimentaient l'Isac.

Ce gouffre a par la suite été comblé et n'est plus visible aujourd'hui. Ainsi l'exutoire naturel du système karstique a disparu, mais il est de nos jours remplacé par l'existence dans ce même secteur d'une zone de perte-émergence bien mise en évidence dans le lit de l'Isac par des jaugeages effectués récemment. Des entonnoirs sont bien visibles dans le lit de l'Isac lorsque celui-ci est asséché. Des remous sont parfaitement observables à la surface de l'eau à l'aplomb de ces derniers en période de hautes eaux.

Il apparaît donc que les calcaires marins oligocènes sont bien le siège d'écoulements de nature karstique, mais leur degré de karstification reste modéré. Les principaux moteurs de la karstification sont liés aux apports d'eau par les pertes des ruisseaux et à la présence de zones fracturées associées à la structure du bassin de Saffré, qui en dépit de l'existence d'un faible gradient hydraulique, assure le transit des eaux infiltrées vers l'exutoire du système. Ainsi la karstification est-elle préférentiellement concentrée le long de ces zones de fracture empruntées par le tracé des écoulements superficiels (Isac et Pas-Sicard).

L'appréciation de ce degré de karstification reste difficile à cerner compte tenu des modalités d'émergence du système karstique. Une tentative a été faite à partir de l'analyse de la courbe de distribution de fréquence de la conductivité de l'eau pompée sur les captages. Elle met en évidence la participation à leur alimentation de seulement deux principaux types d'eau (Fig. 6) :

- des eaux peu minéralisé (380  $\pm$  40  $\mu$ S/cm) représentatives de la période de hautes eaux où l'alimentation par les pertes de cours d'eau prédomine ;
- des eaux plus minéralisées (600  $\pm$  30  $\mu$ S/cm) représentatives des réserves de l'aquifère prélevées dès lors que les cours d'eau sont asséchés.

#### IV. 3 Approche piézométrique du fonctionnement de l'aquifère

A partir de la trentaine de piézomètres implantés sur le bassin, des suivis piézométriques à différentes échelles de temps ont été réalisés : suivi hebdomadaire, enregistrement continu (au pas de 5 mn) durant des périodes de temps plus ou moins longues. Ils ont permis d'une part d'identifier les ouvrages représentatifs de l'aquifère calcaire exploité pour l'AEP, de ceux qui caractérisent des nappes perchées au dessus de l'aquifère, et d'autre part de préciser les modalités d'écoulement au sein de l'aquifère.

• Piézométrie générale : les deux campagnes piézométriques effectuées tant en hautes eaux qu'en basses eaux mettent clairement en évidence que les zones de perte identifiées sur le Pas-Sicard et l'Isac correspondent à des dépressions piézométriques marquées indiquant l'effet du soutirage induit par les prélèvements AEP et soulignant la relation privilégiée entre zones de perte associées aux failles et captages.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

- Impacts des pompages journaliers: les créneaux de pompages associés aux pompages journaliers (3 à 4 périodes des plusieurs heures par jour) sont enregistrés avec des amplitudes de l'ordre de 10 cm en aval des zones de perte, ou de 3 à 4 cm sur les piézomètres et puits du centre bourg implantés dans le couloir faillé, soit à des distances comprises entre 500 et 1100 m des captages. C'est la preuve que le long des principales failles, la transmission des impulsions de pression au sein de l'aquifère est bonne.
- Relations entre nappe et rivières: une comparaison entre les niveaux de la nappe enregistrés sur un piézomètre et ceux mesurés sur le cours d'eau voisin ont été réalisés sur deux sites. Sur le Pas-Sicard, le niveau de la nappe reste inférieur à celui de la rivière d'au moins 20 à 80 cm suivant les conditions hydrologiques. La nappe soutire donc en permanence l'eau du Pas-Sicard qui demeure perchée au-dessus. Au sud de la Chutenaie, les créneaux des pompages AEP se répercutent sur le niveau de l'Isac. Selon les conditions hydrologiques, tantôt la nappe possède une charge supérieure à celle de l'Isac, tantôt c'est l'inverse (Fig. 7): tantôt la nappe alimente la rivière, tantôt elle la draine. Nous sommes donc bien dans la zone de perte-émergence mise ne évidence précédemment par des jaugeages. Les différences de charge restent cependant très proches, généralement inférieures à 10 cm. Ainsi la nappe demeure-t-elle proche d'une situation d'équilibre avec l'Isac, tant que les débits sont suffisants pour maintenir un écoulement continu.
- Fonctionnement saisonnier de l'aquifère : l'enregistrement en continu du niveau de la nappe sur près d'un cycle hydrologique (octobre 2011 à septembre 2012) montre clairement que dans le secteur de la Chutenaie, la nappe est en quasi-équilibre avec l'Isac tant que ce dernier reste en eau (Fig. 5). Après assèchement total des cours d'eau, on observe une décroissance régulière du niveau de la nappe à un rythme moyen de 4,66 cm par jour. On assiste à une vidange du réservoir calcaire qui n'est pas ou très peu réalimenté en été. Un essai de pompage de 72 h réalisé à l'étiage en octobre 2011 a montré un comportement identique de l'aquifère : baisse rectiligne du niveau dynamique, en coordonnées arithmétiques, au bout de 42 h de pompage. Au cours de l'étiage 2011, la nappe est ainsi descendue à 6,5 m en-dessous de son niveau moyen en période de moyennes eaux. Dès la remise en eau des écoulements superficiels, on assiste à une recharge de l'aquifère qui peut être très rapide. En effet au cours de la recharge de fin 2011, après quelques pluies ayant fait remonter le niveau d'environ 1 m, on a constaté lors de la crue du 16 décembre que la nappe était remontée de 6 m en l'espace de 3 jours seulement. Ainsi l'aquifère se vidange progressivement au rythme des prélèvements AEP, mais peut se recharger très brutalement à la reprise des écoulements superficiels. Le reste du temps il demeure en équilibre avec les cours d'eau, les débits soutirés par les pertes sous l'influence des prélèvements AEP se trouvant largement compensés par les débits des ruisseaux fournis par l'amont du bassin versant.

#### IV. 4 Caractéristiques des réserves de l'aquifère

L'exploitation de la ressource en eau contenue dans les calcaires marins oligocènes pour les besoins de l'AEP puise, en période d'assèchement des cours, dans les réserves de l'aquifère. La baisse rectiligne des niveaux de la nappe constatée à cette période est directement fonction de l'importance des débits prélevés. Ainsi connaissant le volume total prélevé par l'AEP sur la période de 3 mois observée en 2012, il a été possible d'apprécier l'importance des réserves de l'aquifère. Cellesci sont capables de fournir en moyenne un volume de 112 500 m³ pour un abaissement du niveau d'eau de 1 m sur le piézomètre d'observation retenu.

L'eau des réserves est caractérisée par une minéralisation plus élevée fournissant une conductivité voisine de  $600 \, \mu \text{S/cm}$ , soit près de deux fois plus que la conductivité mesurée en hautes eaux (cf. § IV 2). A cette plus forte minéralisation est associée l'apparition de pics de Sélénium. D'une teneur oscillant entre 3 et  $7 \, \mu \text{g/l}$  en période de hautes eaux, les concentrations augmentent progressivement dès que les écoulements superficiels commencent à tarir. Elles ont atteint des teneurs de 17 à 18  $\mu \text{g/l}$  en octobre 2011. A l'arrivée des premiers épisodes pluvieux assurant la

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

reprise des écoulements superficiels, ces teneurs ont progressivement diminué pour retrouver des valeurs faibles après l'épisode de crue du 16 décembre 2011. Ce phénomène se reproduit systématiquement depuis plusieurs années à chaque étiage. Des phénomènes similaires d'occurrence de Sélénium dans les eaux prélevées à l'étiage ont été décrits dans la littérature sur divers captages du bassin parisien (11, 12) qui concernent des aquifères en lien avec des formations tertiaires. Le Sélénium serait associé à des horizons riches en matières organiques contenus dans des dépôts continentaux ou fluviatiles constitués le plus souvent par des sables et graviers plus ou moins argileux. Ces matières organiques seraient oxydées du fait du dénoyage estival de l'aquifère sous l'effet des prélèvements AEP, et libèreraient le Sélénium complexé qui passerait à l'état soluble. Or plusieurs horizons riches en matières organiques ont précisément été décrits sur la coupe de la série stratigraphique de référence du bassin de Saffré (6, 7). Sachant par ailleurs que l'exploitation AEP provoque un dénoyage partiel de l'aquifère en été lequel serait alors susceptible d'induire l'oxydation de cette matière organique, il y a tout lieu de penser que l'origine du Sélénium rencontré à Saffré est naturelle et relève du même processus géochimique que celui décrit sur plusieurs aquifères du bassin parisien.

#### IV. 5 l'origine des effondrements constatés à Saffré

En analysant la répartition des effondrements répertoriés sur le bassin de Saffré (Fig. 1), on constate que ces derniers apparaissent avec une forte densité dans les secteurs où les calcaires sont fracturés et où les pertes les plus importantes de cours d'eau sont connues. Ces effondrements sont visiblement en lien avec la karstification des calcaires dont le toit est généralement proche de la surface et recouvert par des formations pliocènes peu épaisses et assez perméables. Par ailleurs il a été constaté que ces phénomènes apparaissaient essentiellement en période de début de recharge de l'aquifère.

Ces constats conduisent à suggérer une hypothèse sur le mécanisme conduisant à l'apparition de ces effondrements, en s'appuyant sur la description de phénomènes similaires étudiés dans d'autres régions karstiques (13) :

- les pertes des ruisseaux constituent des zones privilégiées de dissolution des calcaires facilitant l'élargissement des fractures et l'écoulement des eaux souterraines ;
- à la recharge, l'eau s'engouffre par les pertes dans le réservoir calcaire partiellement dénoyé, et prend la place de l'air qui occupait les voies d'écoulement dénoyées. L'air est alors repoussé à l'interface entre le toit des calcaires et la couverture meuble pliocène qui les surmonte;
- l'air ne peut s'échapper par les pertes puisque celles-ci sont saturées par l'eau qui réalimente l'aquifère ;
- du fait du caractère brutal de la recharge, l'air piégé au toit des calcaires se trouve comprimé et cherche à diffuser à travers la couverture meuble des sables pliocènes, en provoquant leur déstructuration et favorisant ainsi l'expulsion de l'air vers la surface;
- suite à l'expulsion de l'air ainsi comprimé, un effondrement peut se produire.

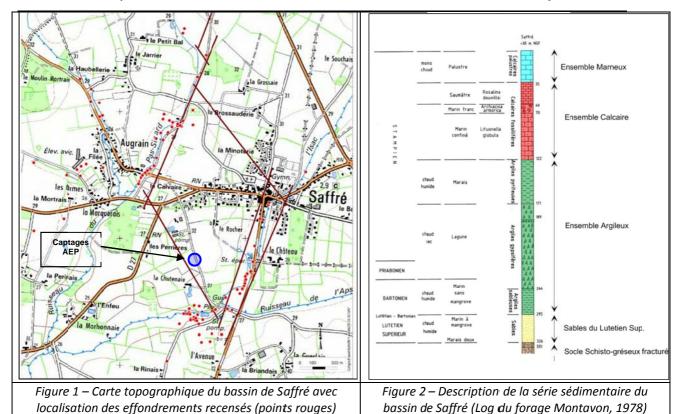
Ce phénomène peut de surcroit être favorisé par des phénomènes de suffosion intervenant à la base de la formation sableuse pliocène, sous l'effet de circulations préférentielles à l'interface avec les calcaires.

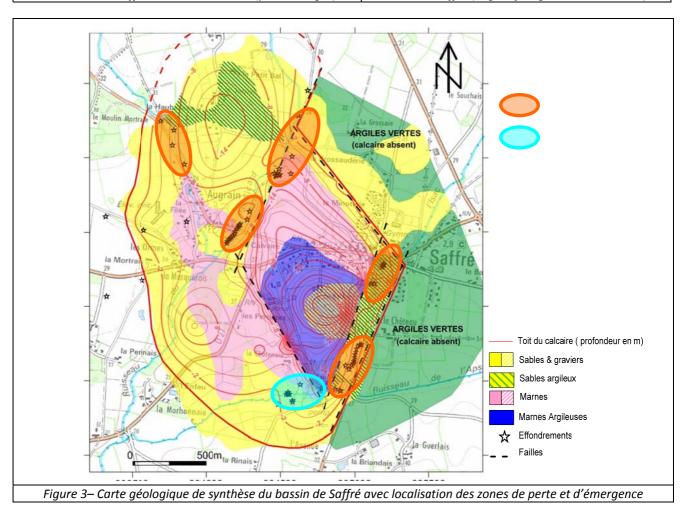
Sur la base de la compréhension de ce mécanisme, une cartographie des zones à risque d'effondrement a pu être établie à l'échelle du bassin en retenant 4 critères : la présence de calcaires à faible profondeur, l'existence de failles, la présence de pertes et l'existence d'une couverture meuble peu épaisse.

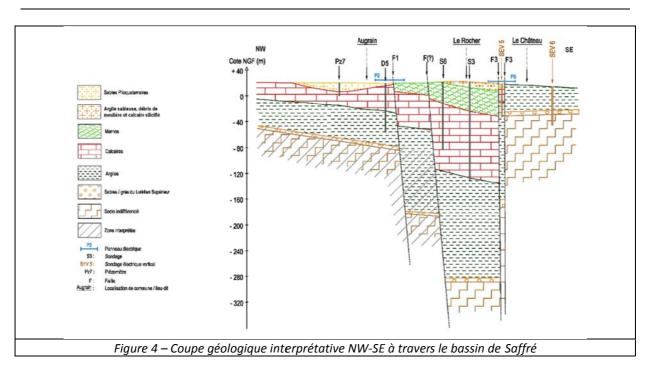
« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

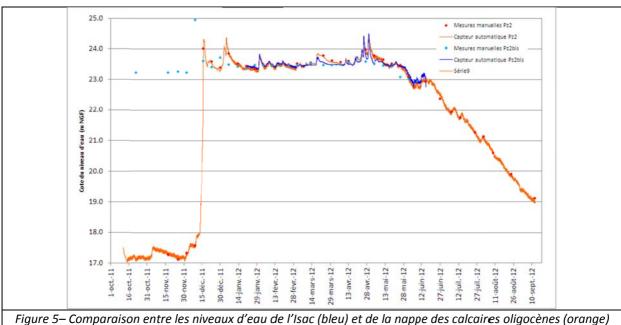
## Références bibliographiques :

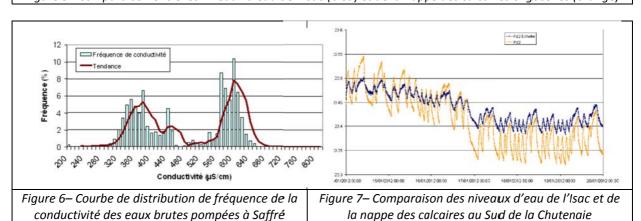
- [1] Boulay C., 2012 Evaluation des zones à risque karstique du bassin de Saffré Prospection géophysique. Rapport Calligée, N11-44084-A, 42 p. + Figures et Annexes, 76 p.
- [2] Mondain P-H., Girardin E., 2013 Evaluation des zones à risque karstique du bassin de Saffré Synthèse hydrogéologique. Rapport Calligée, N11-44084-B, 93p. + Annexes
- [3] Vasseur G., 1881 Recherches géologiques sur les terrains tertiaires de la France occidentale. Thèse, Paris, 432 p.
- [4] Durand S., 1960 Le Tertiaire de Bretagne Etude stratigraphique, sédimentologique et tectonique. Thèse, Mém. Soc. Géol. et Minér. de Bretagne, Tome°XII, 389 p.
- [5] Margerel J-P., 1977 Etude géologique et hydrogéologique du bassin de Saffré (44). Rapport Laboratoire de Géologie Historique, Département Sciences de la Terre, Université de Nantes, 13 p + Figures et annexes.
- [6] Borne V., 1978 Etude d'un sondage profond dans le bassin tertiaire de Saffré (44) (Sédimentologie, Biostratigraphie, Paléoécologie).... Rapport de DEA de Géologie, Université de Nantes, 50 p. + 1 figure horstexte.
- [7] Borne V., Margerel J-P., Ollivier-Pierre M-F., 1991 L'évolution des paléoenvironnements au Paléogène dans l'Ouest de la France. Le bassin de Saffré-Nort-sur-Erdre (Loire-Atlantique, France). Bull. Soc. Géol. France, 1991, t. 162, n° 4, pp. 739-751.
- [8] Georget Y., 2009 Traçage à la fluorescéine résultats et conséquences bassin de Saffré (44) Réédition du traçage effectué en avril 1992, après réalisation de travaux d'étanchéité du lit du ruisseau. Rapport Lithologic, R/YG/93.021, 6 p. + annexe.
- [9] Alix Y., 1999 Résultats de l'essai de traçage sur la rivière de l'Isac Bassin de Saffré. Rapport CG44 99-DEACV-n°200, 9 p.
- [10] Leroux A., 1909 L'époque néolithiques aux Sources de l'Isac. Bull. Soc. Archéol. et Hist. de Nantes et de la Loire Inférieure, Tome 60, pp. 113-122.
- [11] Chéry L., Castrec-Rouelle M., 2005 Les occurrences de Sélénium dans les forages d'alimentation en eau de la Région Parisienne : origine et perspectives d'études. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris, Vol. 42, n° 3, pp. 65-69
- [12] Gourcy L., 2011 Synthèse opérationnelle de l'étude de l'origine du sélénium et compréhension des processus dans les eaux souterraines du bassin Seine-Normandie Rapport final. Rapport BRGM n° RP-60061-FR, 53 p.
- [13] Milanovic P., 2011 Karst grandwater, impacts on infrastructure and construction Conférence invitée. 9<sup>ième</sup> Colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire H2 Karst Université de Besançon 1er au 3 septembre 2011, pp. XVII-XXVII











« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Simulation et prévision des concentrations en nitrates par modélisation globale. Exemples sur trois sites.

# A. Gutierrez, B. Lopez, N. Surdyk, N. Baran, D. Thiéry

BRGM a.gutierrez@brgm.fr

#### I. Contexte

Depuis la fin des années 70, la modernisation de l'agriculture avec l'emploi massif d'engrais a eu pour conséquence l'augmentation des concentrations en nitrate dans la majorité des nappes exploitées pour l'eau potable. Sur le plan national comme sur le plan européen des directives visant à infléchir voire inverser cette tendance ont vu le jour (Directive nitrates en 1991, Directive cadre sur l'eau en 2000). Les outils permettant d'analyser ces tendances, généralement d'ordre statistique, sont incapables de prédire l'évolution future des concentrations et peinent à déterminer l'impact des mesures prises (Lopez et al., 2011). La raison en est que les concentrations dans la nappe résultent de phénomènes à la fois d'ordre agronomique et hydrologique et dépendent fortement de leur historique : la constitution de stocks dans la zone non saturée peut induire une inertie considérable au système aquifère.

La modélisation globale des concentrations en nitrate, en revanche, peut être utilisée avec succès pour simuler les tendances observées et les extrapoler dans le futur. Elle est réalisée au BRGM à l'aide du modèle BICHE, basé sur la simulation globale des écoulements à l'échelle du bassin versant selon un modèle à réservoir, et sur le transport de nitrates que ces écoulements peuvent véhiculer. La définition de scénarios peut alors évaluer l'impact passé ou futur de modifications globales des pratiques agricoles.

# II. Calage du modèle

La condition d'une bonne prédiction réside dans la qualité du calage du modèle. Celle-ci est non seulement dépendante de la qualité des observations, de leur nombre et de la longueur de la chronique, mais aussi de leur variabilité. Ainsi un modèle simulant une chronique « plate », présentera peu d'intérêt pour des scénarios visant à simuler des états différents, car plusieurs jeux de paramètres peuvent correspondre à un tel calage. A l'inverse, une simulation représentant correctement des concentrations faibles et fortes sera plus à même de répondre à des scénarios contrastés. Toutefois le modèle global ne cherche pas à représenter les fluctuations à court terme et leur amplitude mais les tendances interannuelles.

Dans le cadre d'une étude BRGM-Agence de l'eau Loire Bretagne, le modèle BICHE a été utilisé sur trois sites aux contextes géologique et agricultural différents. Le site de Plourhan, en Bretagne est représentatif d'un petit bassin versant dominé par les cultures maraichères sur un substratum constitué de roches de socle. Le captage de Pentvert, à Saosnes dans la Sarthe, est localisé dans un aquifère de calcaire jurassique fissuré très vulnérable et à inertie importante où la concentration en nitrates est proche de 100 mg/l. Enfin, les sources karstiques captées à Châteauroux en Région Centre ont un fonctionnement plus réactif et des teneurs en nitrates plus faibles (proches de 50 mg/l) en dépit d'une activité agricole importante (grandes cultures céréalières). Pour chacun des sites, un changement majeur de pratiques agricoles a été réalisé (boisement, accompagnement pour la gestion de la fertilisation, mise en prairies).

Pour chacun de ces sites, l'analyse des tendances sur les séries observées ne permet pas de répondre à la question du retour au bon état qualitatif des eaux souterraines aux horizons 2015 et 2027. En

revanche, la modélisation globale permet de caractériser chacun des bassins (Tableau 1) et propose des scénarios prédictifs qui montrent que les tendances s'inversent dans le futur pour les trois sites. Seul, le captage de Pentvert ne devrait pas descendre en dessous de la norme actuelle sur les nitrates à l'horizon 2027. L'usage de plusieurs chroniques climatiques comme données d'entrée du modèle identifie également le rôle de la pluviométrie sur les variations de concentration observées dans la nappe. Le modèle montre que la décroissance des concentrations en nitrate annoncée résulte d'actions menées sur les bassins dans les 10 à 20 dernières années selon les sites.

La modélisation globale des concentrations en nitrates montre donc pleinement son intérêt et permet de valoriser des actions et des politiques de modification des pratiques agricoles auprès des exploitants et du grand public.

Site	Temps de réaction	Inertie avant stabilisation de la
		tendance
Plourhan	2 ans	9 ans
Châteauroux	2 ans	5 ans
Pentvert	4 ans	14 ans

Tableau 1 – Inertie des bassins modélisés face à une modification des pratiques agricoles

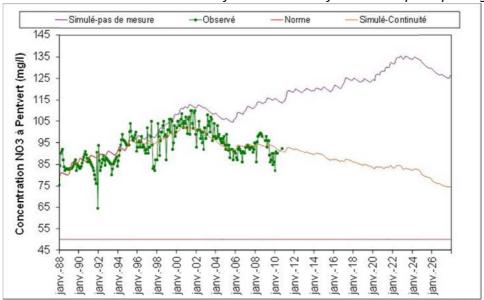


Figure 1 –Simulation prédictive des concentrations en nitrates selon deux scénarios pour le site de Pentvert :

- -1 « continuité » : les pratiques actuelles sont répétées chaque année
- 2 « pas de mesure » : la configuration antérieure aux premières mesures mises en places (1992) est répétée chaque année depuis cette date.

## Références bibliographiques

Lopez B., Baran N., Bourgine B., Ratheau D (2011) Identification of nitrate long term trends in Loire-Brittany river district (France) in connection with hydrogeological contexts, agricultural practices and water table level variations. EGU

Baran N., Gutierrez A., Lopez B., Surdyk N., Gourcy L. (2011) Transfert de nitrates à l'échelle du bassin d'alimentation de captages d'eau souterraine du bassin Loire-Bretagne : modélisation et datation. Rapport BRGM/RP-60280-FR

Thiéry D. (1990) – Modélisation des transferts de nitrate dans un bassin versant : validation du modèle Biche et analyse de sensibilité. Rapport BRGM/RP 52832-FR, 102 p., 42 fig., ann.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# **SESSION 5**

PROTECTION DES AQUIFERES AU REGARD DES GRANDS ENJEUX SOCIETAUX

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Nouveau plan d'action pour une gestion rationnelle des ressources en eaux souterraines du Maroc

# F. Amraoui<sup>1</sup>, J. Moustadraf<sup>2</sup>

1 : Laboratoire Géosciences Appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement (G.A.I.A.). Université Hassan II Casablanca. Faculté des Sciences Ain Chock. Maroc. E.mail : <u>amraoui f@hotmail.com</u>

2 : Université Hassan 1<sup>er</sup>. Faculté poly-disciplinaire de Khouribga. E.mail : moustadrafi@yahoo.fr

#### Résumé

L'eau souterraine constitue une part importante du potentiel en eau au Maroc. Son exploitation a connu au cours des trois dernières décennies un accroissement considérable conduisant localement voire régionalement à des situations conflictuelles et à des pertes économiques notables. Cette surexploitation est liée à une demande croissante sur la ressource en eau, couplée aux conséquences des changements climatiques qui aggravent cette situation avec la réduction et l'irrégularité des apports. D'un autre coté, la qualité de l'eau souterraine connaît une dégradation notable liée aux effets anthropiques.

Pour remédier à cette situation alarmante, de nouvelles mesures doivent être instaurées afin de sauvegarder et de protéger cette ressource vitale. C'est l'objet de cette communication qui essaie de développer un plan d'action concernant trois mesures essentielles, susceptibles de remettre en équilibre les aquifères ou au moins la résorption du déficit, à savoir : le contrat de nappe, le suivi et le contrôle des prélèvements et la recharge artificielle.

**Mots clés** : gestion des nappes, changement climatique, recharge des aquifères, contrat de nappe, contrôle des prélèvements

## **INTRODUCTION**

L'eau souterraine constitue environ le quart du potentiel en eau au Maroc. Celle-ci présente plusieurs avantages : meilleure répartition spatiale, régularité assurée, facilité d'accès et d'exploitation, faible coût de mobilisation. Tous ces avantages l'exposent souvent à une surexploitation.

La démographie galopante, le développement du tourisme, de l'industrie et de l'irrigation font que la pression sur les ressources en eau est en perpétuel croissance. Les conséquences des changements climatiques rajoutent leurs impacts négatifs en réduisant les apports météoriques et en instaurant un régime plus irrégulier.

D'un autre coté, la qualité des ressources en eau souterraine ne cesse de se dégrader, en liaison avec les effets anthropiques : rejets des eaux usées parfois non traitées dans la nature, rejets des effluents industriels, utilisation excessive des engrais et pesticides dans l'agriculture.

Ainsi, une grande partie des systèmes aquifères du pays enregistrent un fort déficit qui s'aggrave en continu et des teneurs alarmantes pour certains indicateurs de qualité de l'eau sont signalées.

Pour remédier à cette situation, un plan d'action inspiré du modèle européen peut être décliné en vue d'atteindre les principaux objectifs suivants : sauvegarder les nappes comme ressources stratégiques et les réserver en priorité pour l'alimentation domestique, améliorer la connaissance des aquifères souterrains ainsi que des volumes d'eau prélevés, impliquer tous les acteurs concernés pour une gestion rationnelle et reconstituer les stocks stratégiques.

Trois points particuliers du plan d'action visant la protection des ressources en eau seront développés ici, il s'agit de : la mise en place des contrats de nappes, la mesure et le suivi des nappes et la recharge artificielle des nappes.

# I - RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES AU MAROC

Le potentiel en eau souterraine mobilisable dans les conditions techniques et économiques actuelles s'élève à près de 4 Milliards de m³ réparti sur 80 nappes dont 48 sont superficielles. Sur les ¾ des

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai − 2 juin 2013

ressources déjà mobilisés, les 2/3 vont à l'irrigation et le 1/3 restant à l'eau potable et industrielle. Les historiques piézométriques à travers le pays montrent le plus souvent des tendances baissières du niveau des nappes, liées à l'effet combiné de la surexploitation et de la sécheresse.

Le bassin de la Moulouya est le plus pourvu en eau souterraine, suivi du sud de l'Atlas, puis du Sebou et du Tensift. Par contre, le bassin du Bou Regreg, les zones montagneuses et le Souss Massa y sont relativement pauvres.

La qualité globale des nappes d'eau souterraines en 2002-03 était bonne au niveau de 22 % des stations, moyenne sur 34 %, mauvaise sur 15 % et très dégradée sur 29 %. Les paramètres responsables de cette dégradation sont la forte minéralisation de ces eaux et la présence de nitrates en teneurs élevées.

## II - CONTRATS DE NAPPE

Compte tenu des perspectives alarmantes quant à la durabilité de la ressource en eau en termes quantitative et qualitative, le Maroc, s'est engagé dans un processus d'économie et d'optimisation de la gestion de ses ressources hydriques, afin de concilier au mieux entre les besoins en eau pour le développement et l'offre qui se caractérise par une grande variabilité dans l'espace et dans le temps. Parmi les mesures adoptées pour cette sauvegarde, et particulièrement en ce qui concerne les ressources en eau souterraines, les contrats de nappe constituent des outils bien adaptés qui permettent de sensibiliser, de faire adhérer et de fixer des objectifs ambitieux et réalistes en concertation avec tous les acteurs de l'eau à l'échelle régionale, permettant une gestion durable des aquifères.

Bien que dans l'ensemble ces contrats comportent des similitudes, ils doivent être adaptés aux problèmes de chaque région en termes de quantité et de qualité. Leur mise en place se fera progressivement en fonction des urgences, et à chaque renouvellement de contrat, ce dernier intégrera de nouvelles mesures pour répondre aux nouveaux enjeux et contraintes.

La réussite de ce processus est tributaire d'une bonne connaissance des ressources et des besoins, d'un bon montage du contrat, d'une bonne approche participative impliquant les principaux exploitants et d'une évaluation continue basée sur des indicateurs bien définis.

## II.1 - Définition et objectifs

Accord technique et financier concerté de tous les acteurs de l'eau portant sur la protection qualitative et quantitative des eaux souterraines et la mise en place d'une politique de gestion durable de l'aquifère. Ses objectifs peuvent être déclinés ainsi :

- ✓ Remise en équilibre de la nappe ou au moins la résorption du déficit à travers des interventions visant de garantir la pérennité de ses ressources ;
- ✓ Mise en place de mécanismes de rationalisation d'exploitation des nappes souterraines en impliquant tous les acteurs et usagers de l'eau ;
- ✓ Renforcement des moyens de contrôle du domaine public hydraulique ;
- ✓ Valorisation des ressources en eau par le développement d'assolements à meilleurs rendements et économes en eau ;
- ✓ Mobilisation de ressources en eau additionnelles ;
- ✓ Lutte contre les pollutions diffuses (nitrates et produits phytosanitaires).

## II.2 – Spécificités et limites

Bien que les objectifs généraux soient les mêmes, les contrats de nappe à travers le pays peuvent être conçus différemment de manière à répondre aux situations spécifiques.

L'une des limites de ces contrats tient au caractère volontaire de la démarche. L'animation du contrat et le respect des engagements peut être difficile à atteindre faute de mesures réglementaires. C'est là l'utilité d'un large consensus sur les actions entre les différents acteurs qui peuvent avoir des intérêts divergents. Il est possible que certains contrats de nappe puissent se transformer en procédure institutionnelle pour donner un statut règlementaire aux décisions prises

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

par le comité de nappe. Ca peut être le cas des nappes largement surexploitées ou affectées de graves pollutions

# II.3- Contenu

Le contenu d'un contrat de nappe passe par l'élaboration chronologique des tâches suivantes :

- √ diagnostic de la situation actuelle et établissement des scénarios pour améliorer la situation ;
- ✓ analyse de la gestion actuelle et identification des contraintes sur le plan technique, législatif et institutionnel;
- √ identification des principaux acteurs et les attentes de chacun ;
- ✓ préparation d'un plan de travail avec estimation des coûts ;
- √ détermination des tâches de chaque intervenant dans l'application des clauses du contrat ;
- ✓ mise en place des mécanismes de suivi avec des objectifs et des indicateurs d'évaluation.

# II.4 - Signataires et comités de suivi et l'évaluation

Le contrat de nappe doit être paraphé par l'ensemble des acteurs de l'eau : les autorités locales et régionales, les élus, les présidents des chambres de commerce et d'agriculture, les directeurs des Agences, des Offices et des Régies des secteurs liés à l'eau, les directeurs ou inspecteurs régionaux représentant les ministères concernés, les associations y compris des foreurs et des usagers de l'eau agricole et les instituts de formation et de recherche.

Une première commission veillera à l'établissement et le suivi du contrat de nappe. Elle sera composée d'un groupe restreint formé des principaux intervenants dans le secteur de l'eau, et sera présidée par un représentant désigné par l'autorité régionale.

Un comité de pilotage veillera quant à lui sur le suivi des orientations générales du contrat de nappe et interviendra lors de processus de résolution des problèmes.

Chaque contrat de nappe s'appuiera, selon les spécificités de la région, sur un certain nombre d'indicateurs qui seront à même de juger de l'efficacité des mesures prises et de leur implémentation sur le terrain. Ces indicateurs sont de trois ordres : institutionnels, réglementaires et organisationnels ; techniques et socio-économiques.

## II.5 - Premières expériences marocaines

Pour les nappes surexploitées, un programme de contrats de nappe a déjà été mis en place ou en cours. On peut citer les nappes du Souss-Massa, de Mnasra et Saïs, du Haouz et de la Bahira, de Berrechid, du Tadla et du Sahel de Doukkala et de la nappe du crétacé inférieur de Dakhla.

Selon les cas, ces contrats visent à atteindre certains des objectifs suivants : économie d'irrigation, valorisation agricole, mise en place de la police de l'eau, limitation de l'extension des périmètres irrigués, sensibilisation, encouragement de la recherche et développement, protection des nappes côtières soumises au risque de l'intrusion marine et l'identification des redevables.

#### III – RECHARGE ARTIFICIELLE DES NAPPES

## III.1 - Plaidoyer

La recharge artificielle des aquifères à partir des eaux météoriques ou des eaux usées traitées est devenue une pratique très répondue qui permet de reconstituer dans la durée les réserves des aquifères, notamment celles touchées par de la surexploitation. Elle s'inscrit dans la gestion intégrée des ressources en eau en combinant l'eau de surface à l'eau souterraine et en tendant vers la réalisation de cycles fermées où l'équilibre entre la recharge et la décharge doit être la règle.

Le Maroc se caractérise par une grande variabilité interannuelle des apports pluviaux et par une fréquence des évènements extrêmes, notamment les inondations constatées ces dernières décades. Il dispose de temps à autre de quantités d'eau importantes qui sont perdues faute de possibilités de stockage superficiel ou souterrain.

Favoriser l'infiltration au niveau des secteurs appropriés, injecter par des puits absorbants de l'eau pluviale ou encore de l'eau usée traitée et stocker l'eau dans des retenues ou des bassins d'orages,

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai − 2 juin 2013

sont des démarches bénéfiques qui réduisent les déperditions et favorisent l'emmagasinement d'une ressource en eau très sollicitée.

Chaque région en fonction de ses spécificités (topographie, lithologie, type d'aquifère, climat..) doit étudier, expérimenter et mettre en œuvre les programmes les plus rentables pour collecter et favoriser la recharge des nappes qui constituent des réserves stratégiques qui peuvent amortir les pénuries en période de sécheresse.

Une collaboration avec les universités et les instituts de recherche est à encourager à ce niveau, puisque d'abord la recharge artificielle constitue un thème important de la recherche dans les pays arides à semi-arides, et ensuite puisque la mise en œuvre comporte d'abord une identification des secteurs favorables, une simulation par modélisation et une expérimentation par pilote avant de dupliquer ou de transférer le procédé à une plus grande échelle.

## III.2 - Expériences internationales de recharge artificielle

La recharge artificielle des nappes est une pratique qui s'est développée au cours du 20<sup>ième</sup> siècle. Il existe deux grands systèmes de recharge suivant la nature de la nappe : par infiltration et par injection.

- ✓ Les projets par infiltration sont les gros et peuvent nécessiter un traitement moins avancé car les eaux de recharge subissent une filtration supplémentaire par le sol ;
- ✓ Les projets par injection requièrent souvent un traitement des eaux de recharge plus avancé et généralement le volume pouvant être injecté est plutôt limité;
- ✓ Sous certaines conditions et avec des traitements plus avancés, les eaux usées épurées peuvent servir d'eau de recharge.

La restauration du niveau piézométrique, la régularisation et le stockage des nappes constituent les objectifs principaux des projets réalisés.

La grande majorité des dispositifs de recharge dans le monde sont implantés sur des formations alluvionnaires très perméables (56 % des cas). Les autres dispositifs sont réalisés sur des formations géologiques de différentes natures lithologiques : poreuses ou fracturées. Les forages, les bassins ou la combinaison des deux sont les dispositifs les plus employés pour la recharge artificielle.

Parmi les principaux projets de recharge par infiltration on peut citer les nappes libres d'Orange County aux USA (250 Mm³/an), Berlin (160 Mm³/an), région de Dan en Israël (30 Mm³/an) et Barcelone (13 Mm³/an). Pour la recharge par injection suite à un traitement tertiaire ou plus, on peut citer les cas de Salalah à Oman (6.5 Mm³/an) et Orange County aux USA (6 Mm³/an).

## III.3 - Expériences marocaines de recharge artificielle

Les premières expériences de recharge artificielle de nappes au Maroc ont débuté dès les années 1950 et depuis, plusieurs dispositifs de recharge ont été mis en place et fonctionnent encore de nos jours. Les principales réalisations sont celles de Charf Al Akab, du Souss et du Haouz.

- ✓ Nappe de Charf Al Akab: Cette nappe a été exploitée depuis 1957 pour l'alimentation en eau potable (AEP) de la ville de Tanger. Vu son faible débit de renouvellement (1.3 Mm³/an), son niveau piézométrique a vite chuté. Sa recharge artificielle a débuté dès 1958 à partir des eaux de surface (oueds Mharhar et El Hachef) par infiltration par fossés. Cette nappe constitue une réserve stratégique pour la région et continuera à jouer dans le futur son rôle en cas de panne des installations destinées à l'AEP de la ville de Tanger à partir des eaux de surface.
- ✓ Nappe du Haouz Mejjate : L'expérience de la recharge artificielle de cette nappe par les eaux de l'oued Nfis a été réalisée durant la période 1981-1984. Deux méthodes ont été testées :
  - Infiltration des eaux provenant de la retenue du barrage Lalla Takerkoust à travers un ensemble de quatre bassins remplissant la fonction de décantation et d'infiltration situées sur la berge de l'oued Nfis. Cette expérimentation a permis d'injecter durant 43 jours un débit continu de 0.3 m³/s (1.25 Mm³);
  - o Infiltration des eaux de crues le long d'une ancienne branche d l'oued Zat.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

✓ Nappe du Souss: La recharge artificielle de cette nappe, surexploitée depuis plusieurs années, a été initiée en 1991 avec la construction du barrage Aoulouz (108 Mm³) Et Imin El Kheng (12 Mm³). Ce dispositif a permis d'injecter environ 110 Mm³/an sur la période 1991-2002. Cependant l'objectif principal de la reconstitution des réserves de la nappe n'a pas été atteint. En effet la zone surexploitée de Sebt El Guerdane n'a pas connu de remontée significative.

## III.4 – Potentiel identifié

La connaissance des ressources en eau souterraines du pays est assez bonne et les bilans comptables entre les entrées (recharge) et les sorties (décharges) ont été établi à différentes dates pour la plupart des aquifères qui revêtent de l'importance.

La recharge artificielle des nappes permet, quand il est possible, de compenser partiellement le déficit constaté qui est la conséquence d'une surexploitation.

Un plan d'action global échelonné sur une décade, couvrant les 9 bassins hydrauliques du royaume et intéressant 24 nappes, prévoit la recharge annuelle d'un volume total de 270 Mm<sup>3</sup>. En termes de volume, la nappe du Haouz arrive en premier lieu (70 Mm<sup>3</sup>/an), suivie de la Chaouia côtière (40 Mm<sup>3</sup>/an), Seyad (30 Mm<sup>3</sup>/an) puis Souss, Tinjdate et Tafilelt (20 Mm<sup>3</sup>/an chacune).

## **IV – CONTROLE ET PRELEVEMENTS**

Le contrôle des prélèvements dans les nappes est un facteur important dans la gestion optimale des ressources en eau. Il permet : d'établir des bilans entrées-sorties correctes pour les aquifères ; de connaître la vrai ampleur des besoins en eau ; d'instaurer les programmes d'économie d'eau ; de recouvrir correctement les redevances ; de sanctionner les excès et de recourir au besoin à des ressources alternatives.

Les différents efforts entrepris jusqu'à là ont montré leurs limites. Il faut passer à une phase où l'application de la loi doit devenir la règle partout et pour tous. Pour ceci, l'approche participative doit jouer le rôle de sensibilisation et d'adhésion et le renforcement de l'autorité administrative le garant de l'exécution des procédures arrêtées.

## IV.1 - Situation actuelle

Malgré la promulgation de la loi sur l'eau en 1995, son application reste partielle et tarde à s'imposer comme instrument législatif contraignant. En effet, à ce jour, une majorité d'ouvrages de production n'est pas recensé, et même quand c'est le cas, on ignore d'importance des prélèvements.

L'administration à travers les agences de bassins et les directions de l'agriculture a procédé à des études d'inventaire des points d'eau exploités à travers plusieurs nappes du pays, et elle a conditionné l'octroi des subventions étatiques (goutte à goutte, bassin..) à la disposition des autorisations de creusement et de pompage.

## IV.2 – Mise en place des compteurs

A première vue, le contrôle des pompages peut être assuré par la mise en place d'un système de comptage pour la mesure des volumes d'eau prélevés. Cette pratique a été testée avec plus ou moins de succès dans différents pays touchées par la surexploitation des ressources en eau.

Les questions qui se posent et auxquelles il faut apporter des réponses au préalable peuvent être résumées ainsi : est-ce que l'idée peut être acceptée par les usagers ? ; faut-il installer des compteurs partout ? ; qui supportera les frais d'acquisition et d'installation des compteurs ? ; qui relèvera les compteurs et à quelle fréquence ? ; qui s'occupera de la maintenance et de la gestion de ce parc ? ; quel est le bénéfice escompté en termes d'économie d'eau et de recouvrement des redevances justes ?.

En fait, comme partout quand on n'a pas assez de certitudes sur l'efficacité d'une démarche, il faut procéder progressivement et en passant par des actions pilotes démonstratives. En effet, les nappes couvrent souvent des centaines, voire des milliers de kilomètres carrés et les problèmes de rareté de

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

la ressource et/ou de la surexploitation peuvent être circonscrits dans des secteurs particuliers. C'est donc préférentiellement dans ces régions fragiles et déprimées qu'on pourrait envisager la mise en place de compteurs et en particuliers chez les grands consommateurs.

Pour arriver à cela, les agences des bassins hydrauliques doivent disposer pour chaque nappe qu'ils contrôlent, des cartes précises avec identification des secteurs surexploitées, correspondant aux zones déprimées des cartes d'iso-variations piézométriques élaborées à quelques années d'intervalle.

## VI.3 – Contrôle indirect des prélèvements

La démarche qui consiste à placer des compteurs sur tous les ouvrages exploités peut montrer ses limites à cause des points évoqués plus haut. Il est donc nécessaire de lui substituer ou de la combiner avec une autre approche. A cet égard, le contrôle à distance à partir des images satellites peut s'avérer très efficace.

En effet, ces dernières années, beaucoup d'applications utilisant la télédétection et le géomatique se sont développées. Elles permettent de restituer des cartes d'occupation du sol à différentes dates. Sur ces cartes figure la composante verte sur laquelle on peut superposer à travers des enquêtes de terrain, le type de culture et le mode d'irrigation. En partant de dotations à l'hectare en fonction des cultures et du mode d'irrigation, on peut arriver à une estimation assez raisonnable des prélèvements correspondants.

Pour que cet outil soit efficace, il faut une bonne collaboration entre les agences des bassins hydrauliques, les directions régionales de l'agriculture (occupation du sol, type de culture et mode d'irrigation) et les services des cadastres (identification des propriétaires).

### **CONCLUSION**

La grande pression sur les eaux souterraines pour accompagner le développement du pays, doit être couplée avec une nouvelle stratégie de gestion, qui vise l'économie, la sauvegarde et la valorisation des ressources.

Le contrat de nappe, le contrôle des prélèvements et la recharge artificielle sont des mesures essentielles, susceptibles de remettre en équilibre les aquifères ou au moins la résorption de leurs déficits.

## Références bibliographiques

Amraoui F., Bouchaou L., 2008. L'eau au Maroc, Potentiel, Réalisations et Contraintes. 4<sup>ème</sup> Symposium Arabo-Allemand pour les études environnementales. Eau et changements climatiques dans la region MENA. Fès. Morocco.

Belghiti M. 2008, Efficience d'utilisation de l'eau au Maroc. Etat des lieux et progrès réalisés. PNUE, Plan Bleu. Département de l'eau 2011. Mise en œuvre de la Stratégie Nationale de l'Eau du Royaume du Maroc (rapport inédit).

Khalil A. Durham B. Thomas J.S. 2003. Orientation pour la gestion intégrée des ressources en eau en zone méditerranéenne. Veolia Water.

Lahlou M. 1998. sécheresse et gestion de l'eau au Maroc. 16 <sup>ème</sup> Congrès Mondial de Science du sol. Montpellier – France.

Laouina A. 2007. L'eau au Maroc. Chaire Unesco-GN, FLSH, Univ. Mohamed V, Rabat.

Ziyad A. 2007. Renouvellement de la politique de l'eau au Maroc. Matee. Rabat

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

# GESTION, PROTECTION, PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU. INTEGRATION, MODELISATION ET APPLICATIONS AUX CAPTAGES EN EAU POTABLE

# T. Constant<sup>1</sup>, A. Lioeddine<sup>2</sup>, S. Charrière<sup>3</sup>, Y. Emsellem<sup>4</sup>

<sup>123</sup> InVivo AgroSolutions, 83 avenue de la Grande Armée 75782 Paris CEDEX 16, France

<sup>4</sup> Watermodel, 33 boulevard Foch 66000 Antibes, France

E-mails: 1 tconstant@invivo-group.com, 2 alioeddine@invivo-group.com, 3 scharriere@invivo-group.com, group.com,

<sup>4</sup> yves.emsellem@watermodel.net

## Résumé

Les eaux souterraines et les eaux de surface, sont indissociables dès qu'il s'agit de bien gérer la ressource en eau, la protéger en quantité et qualité et planifier son utilisation. La dégradation des ressources en eau par les pollutions diffuses, essentiellement par les nitrates et les pesticides est un enjeu de santé publique. Restaurer la qualité des eaux brutes des captages à l'échelle de leurs Aires d'Alimentation (AAC) est, en France une priorité pour assurer une eau potable de qualité.

Le Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau Potable (SIDEP) de la vallée de l'Orvanne alimente plus de 3 000 habitants à partir d'un forage captant la nappe de la craie situé sur la commune de Dormelles (77). Le captage dépasse occasionnellement les seuils de potabilités en nitrates et pesticides, imposant la construction d'une usine de traitement.

Sur financement de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, l'étude hydrogéologique a permis d'identifier une Aire d'Alimentation de Captage de 23 000 ha. Considérer les AAC de grandes surfaces comme homogènes, et se limiter à une protection de la globalité du bassin, conduirait immanquablement à des mesures coûteuses et dont l'efficacité resterait à prouver. La variabilité des conditions pédologiques et géologiques du territoire est une chance à saisir pour investir dans des actions plus efficaces sur des surfaces plus réduites. Plutôt que de saupoudrer les moyens financiers sur la totalité de l'AAC, on peut les économiser en investissant plus massivement dans les secteurs où ils seront bien rentabilisés : les zones contributives.

La notion de <u>Zones Contributives Hydraulique (ZCH)</u> des captages diffère de la notion d'AAC totale. Le transport de la majorité des polluants persistants mobiles étant d'abord contrôlé par la circulation des eaux, le concept de zones de protection est basé sur le cheminement de l'eau depuis la surface du sol de l'AAC jusqu'au captage. La méthode de modélisation intégrée (eaux de surfaces et eaux souterraines) Watermodel© propose d'aménager prioritairement les secteurs de plus <u>forte contribution</u> à l'alimentation en eau du captage. Watermodel© détermine la contribution de tout point de la surface du bassin au flux capté. La méthode vise à délimiter les surfaces de l'AAC qui contribuent à 50%, 70%, 90 et 95% de l'alimentation du captage, la zone à 100% étant la surface totale de l'AAC. Dans l'exemple de Dormelles, la modélisation a montré que 95% de l'alimentation en eau du captage provenait de <u>26%</u> de la surface de l'AAC. Le plan d'action agricole sera donc ciblé sur <u>93 agriculteurs</u> de la zone à 95% de contribution au lieu des 250 exploitants exploitant les 23 000 ha de l'AAC.

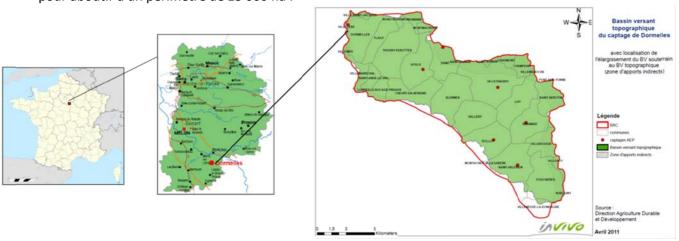
Parallèlement, le modèle Epiclès© permet de modéliser, pour chaque parcelle agricole de l'AAC, les concentrations en nitrates sous-racinaires en fonction des conditions pédologiques, climatiques et des itinéraires techniques agricoles. Le couplage Watermodel©-Epiclès© a permis de modéliser les transferts de nitrates depuis le sol jusqu'au captage, de valider un état des lieux initial, de construire et simuler l'efficacité d'un programme d'action agricole en testant plusieurs scénarii tendanciels d'évolution des pratiques et en contrôlant la diminution à priori des concentrations en nitrates simulées au captage en fonction du temps.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

## I. Le contexte

Le Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau Potable (SIDEP) de la vallée de l'Orvanne alimente plus de 3 000 habitants à partir d'un forage dans la nappe de la Craie sur la commune de Dormelles (Seine-et-Marne) dont les concentrations en nitrates et pesticides dépassent occasionnellement les seuils de potabilité. L'Aire d'Alimentation du Captage a été délimitée suivant la méthodologie BRGM¹ pour aboutir à un périmètre de 23 000 ha :



Depuis 2004 les concentrations en nitrates mesurés au captage de Dormelles baissent mais restent toujours supérieures à 37,5 mg/l (75% du seuil de potabilité et seuil d'action renforcée des Agences de l'Eau) :

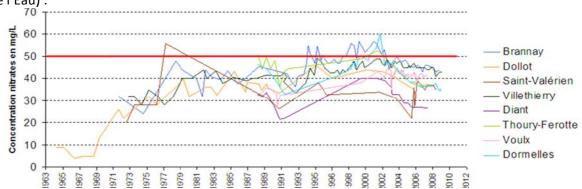


Figure 1 - Concentrations en nitrates dans les captages situés sur le bassin versant de l'Orvanne depuis 1964.

# II. L'ELABORATION DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE

L'approche intégrée eaux de surface - eaux souterraines s'impose pour que le bilan quantitatif à l'échelle de l'AAC soit le plus fiable possible. WaterModel© est donc choisi pour la réalisation de cette modélisation car il possède cette capacité à calculer en mode intégré. Se basant sur la géologie, le système multicouches modélisé sous WaterModel© est composé des horizons suivants :

- Couche 0 : Sol
- Couche 1 : Formations superficielles : alluvions et colluvions.
- Couche 2 : Plateaux tertiaires Oligocène et Eocène
- Couche 3 : Sables, galets, argiles et grès de l'Yprésien et argiles à Silex.
- Couche 4 : Nappe de la Craie

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> BRGM/RP-55874-FR, septembre 2007 par J.F. Vernoux, A. Wuilleumier, N. Dörfliger

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

# recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

## II.1 Maillage du système multicouche

Le territoire choisi est un peu plus large que l'AAC au sens du BRGM pour prendre en compte les conditions aux limites. L'espace est ensuite découpé en mailles de 200 m de côté, raffiné à 100 m le long de l'Orvanne et l'Orval et autour des captages. Au total 46 671 mailles composent le modèle.

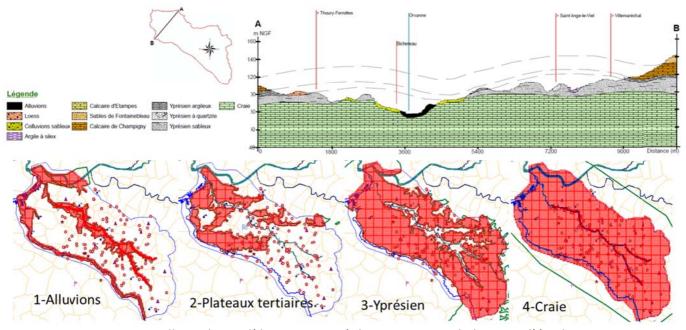


Figure 2 – Maillage du modèle et coupe géologique NE-SO de la zone d'étude.

## II.2 Sources des données d'entrée

Les cartes de transmissivité, perméabilité verticale, porosité de fissure, porosité matricielle et emmagasinement sont déterminées par une étude bibliographique locale et les essais hydrogéologiques disponibles sur le secteur. Les données piézométriques sont issues de la bibliographie et de 2 campagnes de terrain réalisées en hautes eaux et basses eaux en 2010 (58 points d'eau bien répartis dans la zone d'étude avec mesures en hautes eaux et basses eaux). Les données climatologiques sont issues de la base de données Météo France sur les 10 dernières années au pas de temps journalier. La topographie, moteur du ruissellement, est connue grâce au Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 50 m. La rugosité du sol est définie par des tables liées à l'occupation des sols et la RFU définie à partir de mesures in situ et des cartes de sol.

# II.3 Calage du modèle en régime permanent puis transitoire

L'année 2010 a été choisie comme année de référence pour le calage du modèle en régime permanent car nous disposions de données piézométriques fines. De plus, elle avait l'avantage de représenter une année hydrologique proche de la moyenne pluviométrique sur les 10 dernières années.

A la suite d'un calage des paramètres les moins connus sur le secteur (issus seulement de bibliographie par exemple), nous obtenons une carte piézométrique virtuelle similaire à la carte réelle, en haute eaux et basses eaux (corrélation à 0,99 pour les 2 cas).

Le bilan intégré à l'échelle du bassin est alors, en régime moyen 2010, le suivant :

Bilan global 🕶	Bassin	~	m3/s	
	Sol (mm)	Nappes Entrée	Nappes Sortie	Nappes Tota
Précipitations	671.020			
Evapotranspiration potentielle	-790.520			
Evaporation non satisfaite	-242.363			
Evaporation effective	-548.157			
Pluie nette	122.863			
Ruissellement	-38.232			
Infiltration	-113.985	1.887		1.887
Drainage	29.354		-0.486	-0.486
Prises d'eau	1			
Irrigation	0.000		0.000	
Reprise évaporatoire	0.000		0.000	0.000
Pompages			-0.110	-0.110
Prélèvements répartis	1			
Réalimentation		0.000		0.000
Mer	1	0.000	0.000	0.000
Lacs		0.000	0.000	0.000
Fleuves		0.338	-0.763	-0.425
Rivières		0.672	-1.212	-0.540
Ruisseaux		0.143	-0.462	-0.318
Sources		0.000	0.000	0.000
Réserves		-3.041	3.032	-0.009

Figure 3 - Bilan intégré du bassin d'étude (522 km²) en m³/h régime permanent année 2010.

La pluie nette simulée (ou pluie efficace, i.e. : pluviométrie – évapotranspiration) est de 123 mm. Plusieurs simulations en régime transitoire ont également été réalisées pour affiner les distributions des paramètres hydrodynamiques et tester la sensibilité du modèle. Les simulations ont été réalisées sur la période de 1989 à 2010, avec les pluviométries réelles.

Le calage apparaît comme satisfaisant car les tendances pluriannuelles mais également les variations saisonnières sont correctement reproduites et les valeurs simulées sont très proches de celles mesurées pour l'année 2010 :

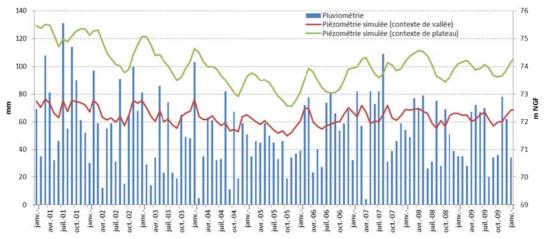


Figure 4- Evolution de la piézométrie simulée (contexte de vallée et de plateau) par rapport à la pluviométrie réelle appliquée dans le modèle entre janvier 2001 et janvier 2010.

L'histogramme suivant représente la répartition de la fréquence des erreurs résiduelles. Les erreurs résiduelles pour la période de hautes eaux sont concentrées dans une zone comprise entre -2,5 et +3 m. Les fréquences les plus importantes sont réparties entre -1 et +1m (26). La valeur moyenne de l'erreur résiduelle est de 0,03 m. Une modélisation parfaite étant atteinte pour une moyenne des erreurs résiduelles de 0, on considère que les résultats obtenus sont très satisfaisants compte tenu de la superficie modélisée.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

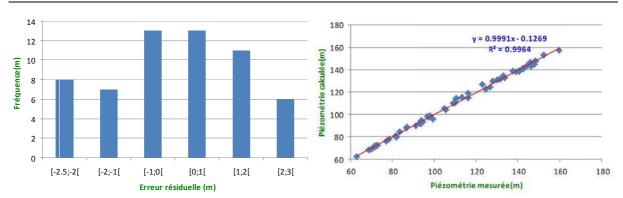


Figure 5 - Histogramme de calibration des erreurs résiduelles du calage piézométrique et graphique de corrélation entre cote observée et cote calculée pour la période de hautes eaux (Avril 2010).

Le graphique suivant montre le calage du débit de la rivière mesuré au niveau de la station hydrométrique située sur la rivière de l'Orvanne (Blennes). Le modèle reproduit assez fidèlement le débit mesuré entre 1989 et 2010, en sous-estimant légèrement les débits modélisés pour les années très pluvieuses (2000-2001 par exemple) et surestimant légèrement les années plutôt sèches (1922-1993 par exemple).

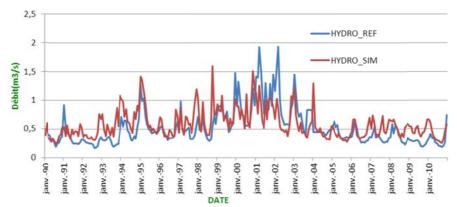


Figure 6 - Débits de l'Orvanne simulés et mesurés sur l'intervalle 1990-2010.

# II.4 Les Zones de Contributions Hydrauliques (ZCH)

La notion de Zones Contributives Hydraulique (ZCH) d'un captage diffère de la notion d'AAC : le concept de ZCH est basé sur le cheminement de l'eau depuis la surface du sol du bassin d'alimentation jusqu'au captage. La démarche consiste à déterminer la contribution au flux capté (en m³/h) en tout point de la surface du bassin par rapport au captage. Voici le résultat produit sous WaterModel© pour Dormelles :

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

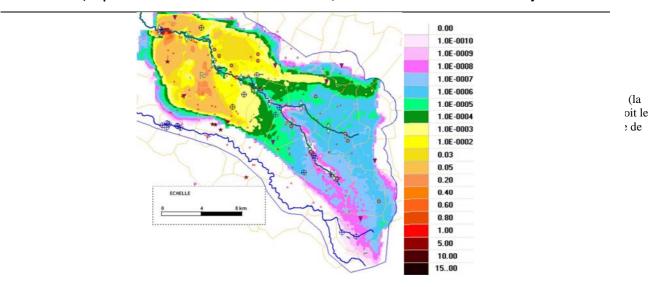


Figure 7 - Contribution au captage de Dormelles (m³/h) en couche 0 (sol) pour un débit de 200m3/h.

Nous cherchons ensuite à délimiter la surface du sol de l'AAC qui contribue à 50%, 70%, 90% et 95% de l'alimentation du captage (étant entendu que la zone à 100% est la surface de l'AAC) à partir de ces résultats. En voici le résultat pour un débit d'exploitation de 200 m³/h.

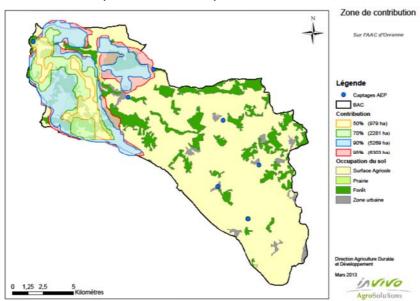


Figure 8 – Contribution hydraulique à l'alimentation du captage de Dormelles ( $m^3/h$ ) à partir du sol (couche 0).

La modélisation montre ainsi que 95% de l'alimentation en eau du captage provient de <u>26%</u> de la surface de l'AAC. Le plan d'action agricole sera donc ciblé sur <u>93 agriculteurs</u> de la zone de contribution à 95% au lieu des 250 exploitants présents sur les 23 000 ha de l'AAC.

C'est une énorme économie de temps et de moyens qui est donc possible grâce à ce constat sous WaterModel©.

- III. COUPLAGE MODELE HYDROGEOLOGIQUE WaterModel® AVEC LE MODELE DE LIXIVIATION DES NITRATES Epiclès®
- III.1 Epiclès©: modélisation des transferts de nitrates

Pour estimer le transfert des nitrates vers l'aquifère, Watermodel© est couplé à Epiclès©.

Epiclès© est un modèle développé par InVivo AgroSolutions permet de calculer, à l'échelle de la parcelle agricole, les concentrations sous-racinaires en nitrates en fonction des itinéraires techniques agricoles, des conditions pédologiques et climatiques.

Le couplage Watermodel@/Epiclès@ autorise ainsi, in fine, la modélisation des transferts de nitrates depuis le sol jusqu'au captage, la validation d'un état des lieux initial de pollution, la construction et l'estimation de l'efficacité d'un programme d'action agricole en testant plusieurs scénarii tendanciels d'évolution des pratiques et en calculant la diminution des concentrations en nitrates simulées au captage en fonction du temps.

A partir d'un historique de pluviométrie et d'une caractérisation du sol des parcelles agricoles, le logiciel Epiclès©, sur la base du modèle de Burns, calcule les masses de nitrates dans la lame d'eau drainante (en sortie de parcelle sous racinaire) ainsi que les volumes d'eau drainés correspondant pour en déduire les concentrations en nitrates lessivées sortant de la couche de sol (sous racinaire). Le calcul est fait chaque année à l'échelle temporelle de la rotation culturale (4 ans en moyenne) en intégrant les pratiques réelles des agriculteurs. Ces pratiques agricoles sont collectées annuellement par les techniciens des coopératives adhérentes à InVivo et stockées dans des bases de données parcellaires à l'aide de l'Outil de traçabilité CISMO©.

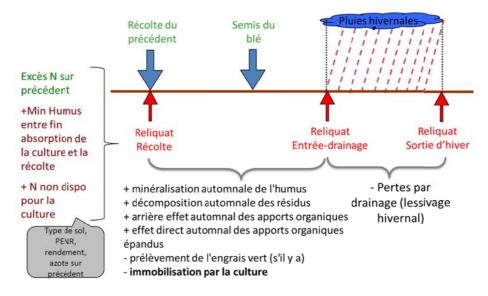


Figure 9- Principe du calcul réalisé par Epiclès© pour estimer les pertes de nitrates par lessivage.

L'estimation du RSH par Epiclès© est validée par une étude comparative –reliquats mesurés vs. reliquats modélisés- menée sur 22 parcelles du BAC de l'Orvanne. L'utilisation de la mesure de l'APM (Azote Potentiellement Minéralisable) par Epiclès© pour calculer la quantité d'azote organique du sol minéralisé permet d'affiner l'estimation du RSH, qui est bien corrélée avec la mesure réalisée au champ: il n'y a en moyenne que 3 kg/ha d'écart entre le RSH estimé (28 kg/ha) et le RSH mesuré (25kg/ha), et la distribution des valeurs est équivalente (écart-types similaires).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

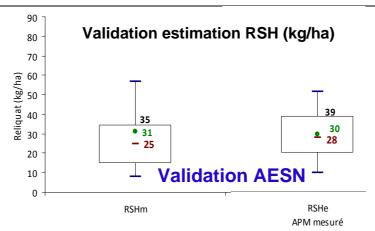


Figure 10 - Diagrammes en boite permettant de comparer les RSH mesurés et les RSH estimés pour 22 parcelles du BAC de l'Orvanne (AESN : Agence de l'Eau Seine Normandie)

## III.2 Simulation de la propagation des nitrates

La carte parcellaire des concentrations sous racinaires moyennes à l'échelle de la rotation, réalisée sous Epiclès© est injectée dans WaterModel© et sa propagation est simulée en tant que pollution miscible et conservative sans tenir compte, dans un premier temps, de phénomènes de dénitrification anaérobie.

Le modèle restitue bien, à l'échelle du bassin, les concentrations en nitrate mesurées au niveau du captage de Dormelles. En effet, les concentrations modélisées par WaterModel© sont de 34 mg/l pour 2010 en régime permanent, contre 37 mg/l mesurés au captage cette année-là. Ceci confirme qu'Epiclès© est un OAD pratique et précis pour la gestion des pollutions par les nitrates, et le couple WaterModel©- Epiclès© se révèle donc un outil intéressant pour la maîtrise des pratiques agricoles et de la qualité des eaux.

## Références bibliographiques

- (1) Cowi I., Emsellem Y., Møller K N., Aranyossi JF., Kane CA., 2001. Projet Sectoriel Eau. Etude hydrogéologique de la nappe profonde du Maastrichtien Modèle hydrogéologique du système Maastrichtien du Sénégal. *Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Hydraulique SGPRE.1200p.*
- (2) Diokel Thiaw A., M
  øller KN., Emsellem Y., Legendre B., Sene N., Kane CK., Tour
  é Arona T., Gueye I., Sarr S., Fall F., Boye Dior A., 2012. PAGIRE Plan d'Action de Gestion Int
  égr
  ée des Ressources en Eau du S
  én
  égal. Minist
  ère de l'Habitat, de la Construction et de l'Hydraulique. 1500 p.
- (3) Dominique P., Emsellem Y., Arlab., 1980. Alimentation en eau des I.C.S et Etude complémentaire du Maestrichtien FED *Projet 3105 070 15 42 / Convention de financement N° 1251/SE- 1980,500 p*
- (4) Emsellem Y., Ncolai M., Lazarova V., 2002. West Coast Basin Aquifers Model Boron Pilot Study, 1990 -2002.
- (5) Emsellem Y., Legendre B., 2011. Projet de Mise en œuvre du Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau du Sénégal. WaterModel© planification intégrée des ressources, 58 p.
- (6) Mégnien Cl., 1970. Atlas des nappes aquifères de la région parisienne Edition. BRGM, France, 120 p.
- (7) Roux JC, 2006. Aquifères et eaux souterraines en France, collection scientifique et technique. *BRGM, France, 479 p.*
- (8) Valentina L., Paille J., Glucina K., Gislette P., 2011. Artificial recharge of groundwater with reclaimed municipal wastewater in West Basin (Los Angeles), *IWA Publishing, 2011*.
- (9) Vernoux, JF., Wuilleumier, A., Dörfliger, N., 2007. Méthodologie de délimitation des Bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. *BRGM/RP-55332, France.293 p.*

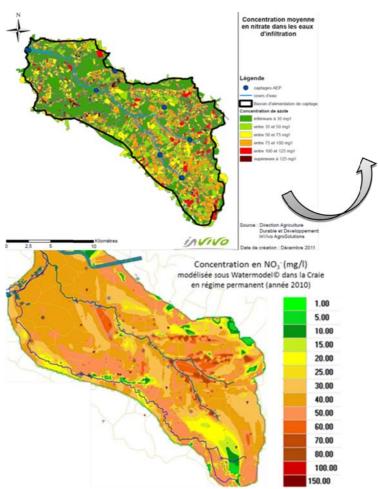


Figure 11 - Carte des concentrations sous-racinaires calculées sous Epiclès© (à droite) et concentrations en nitrates dans la nappe de la Craie simulées sous WaterModel© pour l'année 2010.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Développement urbain et préservation des ressources en eau potable de la Communauté urbaine de Bordeaux : un enjeu majeur du projet métropolitain

## A. Michels

alexia.michels@lyonnaise-des-eaux.fr Lyonnaise des eaux, Direction technique et scientifique – 91 rue Paulin, 33029 Bordeaux Cedex

## I.INTRODUCTION : l'héritage de H. Schoeller

Henri Schoeller, en 1971, faisait le constat suivant [1] :

« Au fur et à mesures que les ans s'écoulent, la population s'accroissant en s'accélérant, augmente de plus en plus ses besoins unitaires en eau, pour elle-même et pour toutes ses activités, agriculture, industrie, etc.

(...)

La pollution des eaux superficielles est très perceptible, attire de suite l'attention sur les dangers et les mesures à prendre pour la combattre. Par contre, la pollution des eaux souterraines est moins apparente, de telle sorte que la tendance générale est de la négliger. Mais elle n'en est pas moins dangereuse, car elle atteint les ressources les plus précieuses par leur qualité et la nature de leurs réserves. ».

Ce constat fait il y a plus de 40 ans reste aujourd'hui une préoccupation majeure pour les responsables de la production et la distribution d'eau potable sur l'agglomération : la Communauté urbaine de Bordeaux (Cub) et son délégataire la Lyonnaise des eaux. En effet, la densification urbaine et le développement d'activités économiques augmentent la vulnérabilité des ressources en eau, en particulier dans les secteurs d'émergences de sources captées pour la production d'eau potable.

Le projet métropolitain de la Cub a pour objectif de hisser l'agglomération bordelaise au rang de métropole européenne, et prévoit d'atteindre 1 million d'habitants à l'horizon 2030. Cet accroissement démographique augmentera non seulement la demande en eau potable, mais également les pressions exercées sur les ressources naturelles au sein du territoire et en particulier les ressources en eau exploitées pour la production d'eau potable.

## **II.QUELLES POLLUTIONS POUR QUEL IMPACT?**

Diverses pollutions peuvent impacter à différents degrés les ressources en eau utilisées pour la production d'eau potable sur le territoire de la Cub. L'arrêté du 11 janvier 2007 fixe des normes de qualité à respecter pour un certain nombre de substances dans l'eau potable dont le chlore, le calcaire, le plomb, les nitrates, les pesticides et les bactéries.

Ces composés sont recherchés régulièrement par l'Agence régionale de la Santé (ARS) dans le cadre des contrôles sanitaires réglementaires et par la Lyonnaise des eaux (contrôle interne).

La difficulté pour le responsable de la production et de la distribution d'eau est de détecter des pollutions mettant en cause des composés ne faisant pas l'objet de normes réglementaires (limites

ou références de qualité) ni de recherche au titre du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine.

Les évènements ayant récemment impacté certains sites de production d'eau potable de la Cub soulignent la difficulté de prévenir ce type de pollution.

# II. 1 La pollution à l'ETBE et au MTBE (2009)

En juin 2009, à la suite de plaintes signalant des odeurs anormales dans l'eau du robinet, une pollution à l'ETBE (additif de l'essence sans plomb) est identifiée, dont la source est située au droit d'une station service implantée à l'amont hydrogéologique du captage de Gamarde.

Cette pollution, dès l'alerte donnée, a occasionné l'arrêt de production du site de Gamarde (nappe des calcaires à astéries de l'Oligocène moyen) alimentant 106 000 habitants, soit 16% des habitants desservis par la Cub; avec la mise en place d'un circuit de distribution de bouteilles d'eau à la population en attendant qu'un nettoyage complet des réseaux et réservoirs ait été réalisé puis une remise en eau avec une ressource non impactée par cette pollution.

Par la suite, de nombreuses études et analyses ont été menées, une filière de traitement par stripping a été identifiée, dimensionnée et installée sur le site.



Fig. 1: Tours de stripping sur l'usine de production d'eau potable de Gamarde

# II. 2 La pollution au perchlorate d'ammonium (2010)

En octobre 2010, suite à une demande de l'ARS, une recherche du perchlorate d'ammonium a été effectuée dans l'eau brute issue de la galerie de Caupian (Miocène). Ce composé a été trouvé à une concentration de 20  $\mu$ g/L. Cette demande de l'ARS faisait suite à la découverte de cette pollution au droit du site Heraklès (ex-SNPE) sur la commune de St Médard en Jalles.

Par la suite, une recherche de ce paramètre a été effectuée sur l'ensemble des points de production d'eau potable de la Cub. Des perchlorates ont été retrouvés non seulement à Caupian mais également sur les champs captant de Thil et Gamarde, ainsi que dans une moindre mesure sur les sites de Bussac et Cantinolle.

Tous ces points de production sont situés à proximité de la Jalle, rivière qui traverse le site Héraklès et qui draine les nappes superficielles présentes au droit de ce site.

Le site de Gamarde, qui venait d'être remis en service grâce à l'ajout d'une filière de traitement par stripping suite à la pollution à l'ETBE, a dû de nouveau être arrêté. Le captage au Miocène du site de

Caupian a également été arrêté. Sur le champ captant du Thil, le forage situé le plus à l'amont hydraulique a été mis en décharge, protégeant ainsi par un effet de drainage de la pollution, les captages de ce champ captant situés plus à l'aval. Enfin, les captages de Bussac et Cantinolle n'ont pas été arrêtés car ils sont plus faiblement impactés, et les eaux issues de ces captages sont mélangées à d'autres ressources exemptes de perchlorates permettant de distribuer une eau à une concentration en perchlorates <1 µg/L aux habitants de la Cub.

Pour comprendre les conditions d'apparition de cette pollution et les voies de transferts vers les captages, de nombreuses études ont été menées (campagnes de prélèvements, jaugeages, traçage, essais de pompage...).



Fig. 2 : Traçage de la Jalle à la fluorescéine en mars 2012 (photo : Marc Vengud, Safège)

De plus, des essais pilotes ont été conduits sur le site de l'usine de Gamarde afin de tester les filières les plus adaptées pour le traitement des perchlorates.





Fig. 3 : Pilotes de qualification des membranes NF/OI et des résines échangeuses d'ions (CIRSEE, 2013)

# II. 3 Des polluants non réglementés

Le point commun entre ces deux évènements est que les composés en cause ne font pas l'objet d'un contrôle sanitaire, et qu'aucune limite ou référence de qualité n'était définie lors de leur identification dans les ressources en eau utilisées pour la production d'eau potable.

Compte tenu de l'absence de niveaux de qualité réglementaires concernant l'ETBE et le perchlorate d'ammonium dans les eaux destinées à l'alimentation humaine aussi bien dans les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), dans les directives européennes que dans la

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai − 2 juin 2013

réglementation française, l'Anses (ex-Afssa) a été saisie d'une demande d'avis sanitaire [2] à deux reprises par le ministère de la Santé.

Le 15 mars 2010, l'Afssa a remis son avis concernant l'ETBE [3]:

La limite au-delà de laquelle la consommation d'eau présentant une concentration en ETBE entraı̂ne un risque pour la santé des consommateurs, est fixée par l'AFSSA à  $60 \mu g/L$ .

Cependant, le seuil de détection organoleptique de ce composé est de 1  $\mu$ g/L. L'ARS a donc imposé aux responsables de la distribution d'eau potable de la Cub de respecter des teneurs inférieures à **0,5**  $\mu$ g/L dans l'eau potable.

Pour les perchlorates, l'avis de l'Anses est paru le 18 juillet 2011 [4], repris le 28 juillet 2011 par le Ministère de la santé (Direction générale de la santé) [5] :

Le ministère chargé de la santé recommande de ne pas préparer de biberons pour les nourrissons de moins de 6 mois avec une eau contenant plus de  $4 \mu g/L$  de perchlorates et de ne pas utiliser l'eau du robinet pour la boisson, la préparation des aliments, y compris la cuisson, pour l'ensemble de la population, dès que la teneur en perchlorates dépasse 15  $\mu g/L$ .

L'ARS a donc demandé aux responsables de la distribution d'eau potable de la Cub de respecter des teneurs en perchlorates inférieures à  $4 \mu g/L$  dans l'eau potable.

# **III.LA CARACTERISATION DU RISQUE POUR LES RESSOURCES**

Les exemples des pollutions à l'ETBE et au perchlorate, montrent que le contrôle sanitaire réglementaire n'est pas suffisant pour prévenir et détecter toutes les pollutions pouvant impacter les captages d'eau potable.

Une collaboration étroite entre les différents services de l'État (DREAL, ARS...) et les organismes responsables de la production et la distribution de l'eau potable est nécessaire dès lors qu'une pollution est portée à la connaissance des services de l'État.

L'ion perchlorate était présent dans les eaux superficielles et souterraines bien avant qu'on ne le détecte (ce composé est sans saveur, inodore et incolore). Il n'avait jamais été recherché car aucune pollution par ce composé n'avait été portée à la connaissance de la Lyonnaise des eaux et de la Cub avant que l'ARS ne demande à la Lyonnaise des eaux de rechercher ce paramètre sur le captage de Caupian en octobre 2010.

Afin d'anticiper l'apparition de nouvelles pollutions, des recherches sont en cours pour améliorer la connaissance et l'évaluation des risques pour les ressources.

Ces recherches portent sur plusieurs volets :

- la compréhension des transferts entre les différentes masses d'eau au sein du bassin d'alimentation des captages ;
- l'identification des activités potentiellement porteuses de risques, et des produits liés à ces activités.

# III. 1 La compréhension des voies de transferts : la notion d'échelle

Les aquifères superficiels sont en interaction constante avec le réseau hydrographique. Les échanges sont complexes. Parfois, en un même point, les échanges peuvent s'inverser au cours du temps, en fonction des conditions hydrométéorologiques, par le jeu d'un vannage ou d'un pompage.

Ces échanges jouent un rôle important dans le transfert de polluants d'un point donné vers un captage. Les rivières agissent souvent comme vecteurs et accélérateurs des transferts.

A l'échelle du bassin versant de la Jalle, la lecture des cartes piézométriques montre que les nappes superficielles sont drainées par les cours d'eau. Le transfert s'effectue donc de la nappe vers la rivière.

Plus localement, des inversions des sens d'écoulement peuvent s'opérer, sous l'influence de pompages ou de drainages de la nappe. Le transfert s'effectue donc de la rivière vers la nappe.

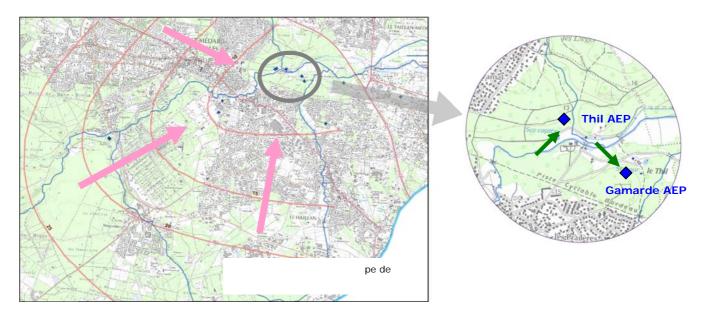


Fig. 4 : Échanges nappe – rivières sur le secteur de Saint-Médard-en-Jalles

La quantification des échanges au moyen du traçage à la fluorescéine réalisé en mars 2012 a montré que le captage de Gamarde était alimenté pour environ 50% par de l'eau issue de la Jalle, et que le captage de Thil était alimenté quant à lui pour environ 13% par de l'eau issue de la Jalle.

Ces échanges conséquents, démontrent la nécessité de maîtriser la qualité de la ressource tant souterraine que superficielle, à l'amont des captages.

# III. 2 L'inventaire des activités porteuses de risques

La connaissance des activités potentiellement porteuses de risques présentes sur le bassin d'alimentation des captages permet d'identifier les éventuelles molécules non recherchées pouvant être présentes dans la ressource.

L'inventaire des activités présentes sur l'aire d'alimentation des captages a été réalisé à partir des bases de données suivantes : ICPE<sup>2</sup>, BASOL<sup>3</sup> ainsi que BASIAS<sup>4</sup>.

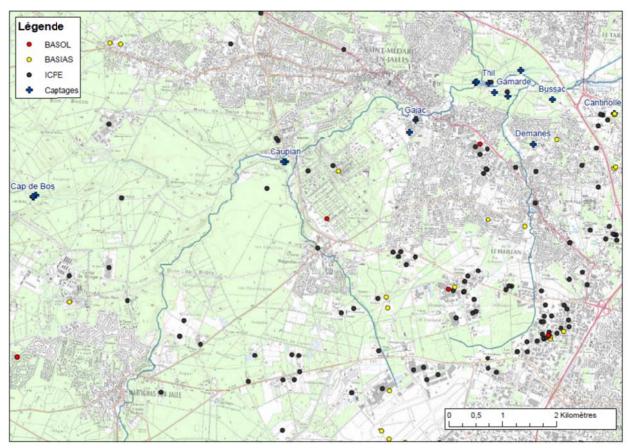


Fig. 5 : Inventaire des activités potentiellement porteuses de risques pour la qualité des ressources en eau

Les risques avérés ne concernent que les sites recensés dans la base de données BASOL, pour lesquels des pollutions des sols et des eaux ont été mises en évidence. Sur les bassins d'alimentation des captages de Saint-Médard-en-Jalles, seuls 5 sites sont recensés.

Le tableau suivant dresse l'inventaire de ces sites et des paramètres à surveiller.

<sup>2</sup> ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> BASOL : sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. http://basol.environnement.gouv.fr

<sup>4</sup> BASIAS : Inventaire historique des sites industriels et activités de services. http://basias.brgm.fr

# « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai − 2 juin 2013

Nom	Adresse	Commune	Description	Paramètres à surveiller	
Décharge ABCCD	Lieu-dit Monfaucon	Martignas-Sur-Jalle	Ancienne décharge de déchets industriels commerciaux, pneumatiques, cendres et mâchefers, déchets encombrants des ménages, déblais, gravats.etc.	pH, conductivité, potentiel Redox, DCO, NH4, NO3, Chrome, Plomb, Arsenic, Fer total, Hydrocarbures	
Décharge ONYX			fer, mercure, nitrates, MES, DCO, COT, arsenic, Plomb, PO4, NH4,		
ELECTROCHROME	9 rue Bernard Palissy	Mérignac	Atelier de traitement de surface de pièces métalliques : anodisation, zingage, cadmiage, nickelage, chromage, étamage	Cd, Cr total, Cu, HCTX, CN-, Ni, Pb, Zn, fluorures	
REDA	10 rue Bernard Palissy	Mérignac	Atelier de traitement de surface des pièces métalliques par le procédé de chromage dur.	aluminium, chrome total et hydrocarbures totaux	
SME		Saint-Médard-en- Jalles	Usine de poudres et compositions pyrotechniques	COHV et perchlorates	
SAFRAN - HERAKLES (ex SNECMA PROPULSION SOLIDE)	Lieu-dit Les 5 chemins	Le Haillan	Usine de production de pièces composites à matrice céramique utilisées dans les sytèmes de propulsion d'avions civils et militaires, de missiles, de fusées et de satellite	COHV, COV, O2, pH, potentiel redox, Temp, Cond, acétone, phénols, crésols, Methyl- ethyl-cetone	
LECLERC Station service	34, avenue Descartes	Saint-Médard-en- Jalles	Station service	BTEX, ETBE/MTBE, HCT et HC C6-C10	

La plupart des paramètres à surveiller sont listés dans l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine. Seuls les paramètres acétones, crésols, méthyl-éthyl-cétones, ETBE/MTBE et perchlorates ne font pas partie des paramètres suivis dans le cadre du contrôle sanitaire habituel sur les eaux brutes et les eaux destinées à la consommation humaine.

Une étude est en cours afin d'essayer d'établir une relation entre l'activité des ICPE et les composés potentiellement rejetés dans l'environnement, afin de déceler la présence éventuelle de ces composés dans les ressources.

Enfin, une recherche élargie des polluants émergents pouvant être présents dans les ressources en eau utilisées pour la production d'eau potable est en cours. Il s'agit de réaliser un screening de différentes classes de micropolluants organiques dans les ressources qualifiées de vulnérables, au moyen de prélèvements ponctuels. Ces prélèvements sont réalisés dans des conditions climatiques et hydrologiques différentes (basses eaux, hautes eaux et situation moyenne) afin d'intégrer un maximum de variabilité.

Les techniques d'extraction et d'analyses permettent de descendre à des seuils de détection de l'ordre du ng.L<sup>-1</sup>.

Un peu plus de 300 substances sont recherchées, réparties en 7 catégories :

- pesticides;
- substances pharmaceutiques :
  - o Médicaments d'usage courant;
  - o Antibiotiques, anticancéreux, antiviraux ;
  - o Hormones;
- alkylphénols;
- hydrocarbures aromatiques polycycliques;
- composés organiques volatils ;
- phtalates;
- ETBE / MTBE

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai − 2 juin 2013

## **IV.CONCLUSION**

La question majeure qui est posée est comment gérer et protéger nos ressources en eaux sans pour autant freiner le développement des activités humaines à l'échelle d'un territoire ?

Il n'existe pas de recette miracle. La protection des captages en milieu urbain doit passer par une approche rigoureuse et cohérente des différents paramètres en cause à l'échelle de l'aire d'alimentation de ces captages et influençant la migration plus ou moins rapide et complète des pollutions depuis les sols vers les eaux souterraines.

En premier lieu, la cartographie des risques de pollution des eaux souterraines est une étape nécessaire et incontournable. Mais elle ne suffit pas à elle seule à anticiper les risques. Il est également indispensable de bien comprendre les mécanismes et les cinétiques de transfert des polluants potentiels entre les différents milieux (air, sols, eaux) et entre les différentes masses d'eaux (superficielles et souterraines).

En parallèle, une collaboration étroite et réactive entre les différents services de l'État (DREAL, ARS, DDTM, ...), les industriels et les organismes responsables de la production et la distribution de l'eau potable est primordiale, afin d'impliquer tous les acteurs du territoire dans la démarche de préservation de la qualité des ressources en eau.

## Références bibliographiques :

- [1] Schoeller H.J., 1971 Groundwater pollution Actes du Colloque de Moscou, août 1971; IAHS IAHS Publ. No. 103, 1975.
- [2] Mansotte F., Dejean G., Renault C., 2012 : Retour d'expérience sur une pollution accidentelle par l'ETBE ; Techniques Sciences et Méthodes, 2012, n°10 : 43 47.
- [3] AFSSA, 2010 : Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'éthyl-tert-butyl-éther (ETBE) dans les eaux destinées à la consommation humaine Saisine n°2009 SA-0235, 15 mars 2010.
- [4] ANSES, 2011 : Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire et de l'alimentation, de l'environnement et du travail, relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'ions perchlorate dans les eaux destinées à la consommation humaine  $Saisine n^22011 SA 0024$ , 18 juillet 2011.
- [5] DGS, 2011 : Gestion des risques sanitaires liés à la présence de perchlorates dans les eaux destinées à la consommation humaine Note pour les directeurs généraux des agences régionales de la santé d'Aquitaine et de Midi-Pyrénées, 29 juillet 2011.

# Diagnostic des forages d'eau : quoi de neuf après dix ans d'obligation réglementaire ?

B. Marsaud (1), E. Gravelier (1), JL.Gibert (2)

(1) Antea Group, (2) Régie Municipale des Eaux de la Ville de DAX <a href="mailto:bruno.marsaud@anteagroup.com">bruno.marsaud@anteagroup.com</a>, <a href="mailto:emille.gravelier@anteagroup.com">emilie.gravelier@anteagroup.com</a>, <a href="mailto:jlgibert@dax.fr">jlgibert@dax.fr</a>

L'arrêté du 11 septembre 2003 <sup>(5)</sup> a imposé pour les forages AEP et les forages traversant plusieurs aquifères un contrôle décennal dans l'objectif premier de vérifier l'absence de communication entres aquifères. Certaines collectivités ou industriels, sensibles à la préservation de leurs ouvrages réalisaient déjà ce type de diagnostic (collectivités avec de nombreux ouvrages, établissements thermaux). Pour les autres, une vague importante de diagnostic s'est propagée véritablement à partir de 2005 sous l'effet de l'arrêté pré-cité, la première période de diagnostic décennal s'achevant à la fin de l'année 2013. Il apparait opportun aujourd'hui de faire un point les effets de cette obligation réglementaire pour améliorer les diagnostics de la décennie à venir, autour de trois axes principaux : les problèmes observés sur les forages diagnostiqués, l'évolution des méthodes mises en œuvre dans les programmes de diagnostic, et la valorisation des informations collectées pour la gestion des ouvrages ou d'un parc d'ouvrages.

# I. Les problèmes rencontrés (tentative statistique)

Sans constituer une analyse statistique approfondie et véritablement représentative, à partir de l'ensemble des diagnostics réalisés ou collectés depuis 2003 par Antea Group en Aquitaine (nota : entre 50 et 100, collecte et analyse en cours a la date du résumé), les différents problèmes rencontrés sur les forages et les préconisations de travaux sont présentés dans une approche semistatistique. Il ressort principalement : des effets normaux de vieillissement d'ouvrage (corrosion, dépôts, comblement) pouvant nécessiter des opérations d'entretien (brossage, curage), et plus rarement des défauts importants (collapse, perforation, venues de sables, ...) nécessitant des travaux lourd (rechemisage, surforage, remplacement).

## II. L'évolution des méthodes

Initialement, le diagnostic des forages s'effectuait principalement à partir d'une inspection vidéo et de mesures dites « de base » (conductivité, température, micromoulinet). La volonté de connaître l'état des cimentations a imposé le développement des mesures CBL/VDL, puis plus récemment, des mesures très sophistiquées issues du domaine pétrolier et de la géothermie profonde (SME, ABI, BHTV, Casing Thikness). A partir d'exemple concrets, l'ensemble de ces mesures seront passées en revue, notamment vs leur applicabilité, leur efficacité et leur intérêt vs les enjeux.

# III. La valorisation des diagnostics

La valorisation des diagnostics reste encore le point faible. Les maîtres d'œuvre ne sont pas toujours compétents et se fient aux recommandations des BE ou des diagraphistes, celles-ci étant trop souvent émises uniquement dans le contexte de l'ouvrage et à court termes. La Ville de Dax possède un parc de 16 ouvrages (AEP, thermaux et géothermique non exploité) et en réalise des diagnostics réguliers depuis près de 20 ans. Elle souhaitait pouvoir engager les travaux préconisés dans les diagnostics dans une démarche globale (programmation, priorisation, amortissement, importance de l'ouvrage...) permettant d'établir un schéma directeur. En collaboration avec Antea Group, elle a

<sup>(5)</sup> Arrêté du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 1.1.1.0 de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié

# « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

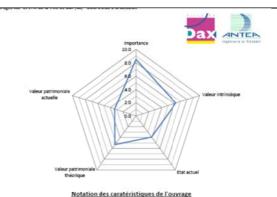
engagé en 2010 la conception d'un outil d'aide à la décision <sup>(6)</sup> (en cours d'automatisation) permettant d'atteindre ces objectifs par une approche à la fois technique et financière. Cet outil d'aide à la décision sera présenté, ainsi que sa déclinaison dans le cas d'ouvrages uniques (cf. images infra).

"Valeur Neuf" (VN)  FIH 190 400 € 5 F2H 412 180 € 2 F3H 190 400 € 5 F4H 190 400 € 5 F1S 54 320 € 9 F2S 388 404 € 4 F3S 416 800 € 1 F4S 63 840 € 8 F5S 404 120 € 3 F6S 29 120 € 11 PS 44 800 € 10  Balgnots IV 87 270 € 6 Fontaine Chaude 212 800 € 4 PRace de la Course 9 850 € 5 Stade II 645 569 € 1 Roth 404 992 € 2  GDX 1 3 169 600 € 1  PTIN 44 4.1 F3H 5.0 F1S 5.0 F6S 4.9 F1S 5.0 F6S 4.9 F1S 5.5 F5S 4.0 F6S 4.9 F3S 5.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 F3S 8.5  Boulogne II 2.9 Balgnots IV 4.6 F5Draine Chaude 3.5 F5Draine Chaude 3.5 F5S 5.0 Boulogne II 2.9 Balgnots IV 4.6 F5Draine Chaude 3.5	Topical Comme	Valeur des ouvrages					
F2H	"Valeur intrinsèque" (VI = VN x Dc)		"Valeur Actuelle" (VA = VI x Du)		Coût travaux "Ctrx"	Ctrx/VA	Décision travaux
F3H	130 900 €	6	106 356 €	6	9 260 €	9%	travaux
F4H 190 400 € 5 F15 54 320 € 9 F25 388 640 € 4 F35 436 800 € 1 F45 63 840 € 8 F55 404 320 € 3 F65 29 120 € 11 PNS 44 800 € 10  Boulogne II 337 792 € 3 Bullgorts IV 87 270 € 6 Fostaine Chaude 12 1200 € 4 Place de la Course 98 560 € 5 Stade II 645 566 € 1 F54 40 40 € 10  Priorité    Importance (note)   F1H 4.0 F2H 4.1 F3H 4.1 F3H 4.1 F4H 5.0 F15 1.5 F2S 4.3 F3S 3.7 F45 2.5 F5S 4.0 F65 4.9 P3S 8.5    Boulogne II 2.9   Balgnots IV 4.6 F50 4.6 F60 4.9 P160 61 E0 Course 98 8.5	283 360 €	3	141 680 €	5	65 360 €	46%	travaux
F15	130 900 €	6	81 813 €	7	7740€	9%	travaux
F2S	166 600 €	5	145 775 €	3	38 000 €	26%	travaux
F3S 436 800 € 1 F4S 63 840 € 8 F5S 404 320 € 3 F6S 29 120 € 11 P3S 44 800 € 10  Badlogne II 337.792 € 3 Balgnots IV 87.270 € 6 Fontaine Chaude 212 800 € 4 Place de la Course 9 850 € 5 Stade II 645 569 € 1 Roth 404 992 € 2  GDX 1 3169 600 € 1  Priorité  Importance (note)  F1H 4.0 F2H 4.1 F3H 4.1 F3H 4.1 F4H 5.0 F1S 1.5 F2S 4.3 F3S 3.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Balgnots IV 4.6 F50raine Chaude 915 8.5	291 480 €	2	13 580 €	4	N0 126 740 €	ND 87%	Diagnostic forage neuf
F4S	273 000 €	4	153 563 €	2	124 000 €	81%	forage neuf
FSS 404 320 € 3 F6S 29 120 € 11 P34 44 800 € 10  Boulogne II 337 792 € 3 Bulgoots IV 87 270 € 6 Fondaine Chaude 212 800 € 4 Place de la Course 98 500 € 5 Stade II 645 598 € 1 Roth 404 992 € 2  GDX 1 3 169 600 € 1  Priorité  Importance (note)  F1H 4.0 F2H 4.1 F3H 4.1 F3H 4.1 F4H 5.0 F4H 5.0 F65 4.9 P35 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 F50raine Chaude 3.5 F5 F0 4.0 F65 4.9 P35 8.5	19 950 €	11	16 209 €	10	0€	0%	5.0
Post   Post	353 780 €	1	309 558 €	1	13 540 €	4%	travaux
Boulogne II   337 792 C   3	20 020 €	10	20 020 €	8	0€	0%	5.0
Bulgnots IV	28 000 €	8	17 500 €	9	75 000 €	429%	Irremplaçable, travaux
Balgnots IV   87.270 €   6     Fonziline Chaude   212.800 €   4     Fonziline Chaude   98.500 €   5     Stade II	295 568 €	3	295 568 €	2	12 380 €	4%	travaux
Fontaine Chaude   212 800 €   4     Place de la Course   98 550 €   5     Stade II   645 568 €   1     Roth   404 922 €   2     GDX 1   3 169 600 €   1      Priorité   Importance (note)     F1H	87 270 €	.5	87 270 €	5	2 832 €	3%	travaux
Stade II	212 800 €	4	199 500 €	3	2 000 €	1%	travaux
Roth	86 240 €	6	86 240 €	6	0€	0%	5.0
Priorite	645 568 €	1	645 568 €	1	0.0	0%	\$.0.
Priorité   Importance (note)	303 744 €	2	151 872 €	4	ND	ND	Diagnostic
Importance (note)	2 377 200 €	1	1188600€	1	ND ND	ND	Diagnostic
F1H 4.0 F2H 4.1 F3H 4.1 F3H 4.1 F3H 5.0 F1S 1.5 F2S 4.3 F3S 3.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 Foortaine Chaude 3.5 Place de la Course 8.5	Importance (rang)	Importa (poids			mortissement Ta"	Priorité (	note) Priorité (rang)
F2H 4.1 F3H 4.1 F3H 4.1 F4H 5.0 F1S 1.5 F2S 4.3 F3S 3.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 Fooraine Chaude Place de la Course Place de la Course 8.5	8	8,48%	· .		100%	4.0	8
F3H 4.1 F4H 5.0 F1S 1.5 F2S 4.3 F3S 3.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Bailgnots IV 4.6 Fontaine Chaude 3.5 Place de la Course 8.5	5	8.88%		100%		4.1	6
F4H 5.0 F1S 1.5 F2S 4.3 F3S 3.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 Fordaine chaude 3.5 Place de la Course 8.5	6	8.73%		100%		4.1	7
F1S 1.5 F2S 4.3 F3S 3.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 Fortaine Chaude 3.5 Place de la Course 8.5	2	10.81%		100%		5.0	
F2S 4.3 F3S 3.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 Forlaine Chaude 3.5 Place de la Course 8.5				The state of the s			3
F3S 3.7 F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 Fontaine Chaude 3.5 Place de la Course 8.5	11	3.22%		100%		1.5	11
F4S 2.5 F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 Forlaine Chaude 3.5 Place de la Course 8.5	4	9.32%		100%		4.3	5
F5S 4.0 F6S 4.9 P3S 8.5  Boulogne II 2.9 Baignots IV 4.6 Fontaine Chaude 3.5 Place de la Course 8.5	9	7.92%		100%		3.7	10
F65   4.9   P35   8.5	10	5.36%		65%		3.8	9
P35 8.5  Boulogne II 2.9  Baignots IV 4.6  Fontaine Chaude 3.5  Place de la Course 8.5	7	8.49%		39%		10.2	1
P35 8.5  Boulogne II 2.9  Baignots IV 4.6  Fontaine Chaude 3.5  Place de la Course 8.5	3	10.56%		100%		4.9	4
Baignots IV         4.6           Fontaine Chaude         3.5           Place de la Course         8.5	1	18.23%		1	100%	8.5	2
Baignots IV         4.6           Fontaine Chaude         3.5           Place de la Course         8.5		74.7					
Fontaine Chaude 3.5 Place de la Course 8.5	4	13.29%		100%		2.9	5
Place de la Course 8.5	2	20.93%		100%		4.6	3
	3	15.76%		100%		3.5	4
		38.66%		100%		8.5	2
Stade II 2.5	1	11.37%		25%		10.0	1
Roth 0.0				70%		0.0	6
GDX 1 0.0	1	0.00%			1.0.10		

<sup>(6)</sup> VILLE DE DAX, REGIE MUNICIPALE DES EAUX, « Synthèse sur l'état des forages AEP et ETM de la Ville de Dax (40), Outil d'aide à la décision. », Rapport ANTEA GROUP, Mars 2010, A57948/A.



Notation de l'ouvrage, en 2009	Note (/10 ou %)
Importance au sain du parc d'ouvrage	8.5
Valeur intrinsèque value par repport à un ouvrage identique conçu dans les règles de l'art	63%
Etat actuel voleur par rapport ou même ouvrage en état neuf	39%
Valeur patrimoniale théorique comple tenue de se conception et de son importance	5.3
Valeur patrimoniale actuelle compte tenue de sa conception et de son état actuel	3.3



ections	
Travaux conseillés	
c bétonnage de l'annulaire, brossage, aménagement d'une tête étanche	
ace annulaire bétonné, nettoyage et brossage du Ø550mm, aménagement de la tête de puits	

Date	Rapport	Chambre de Pompage	Colonne de captage	Comblement de l'ouvrage	Travaux conseillés				
Oct. 1995	ANTEA n* A03223	Bon état	Bon état	7m / initial	Court terme : réhabilitation avec bétonnage de l'annulaire, brossage, aménagement d'une tête étanche				
Nov 1994 à Mas 1995	ANTEA n* A03223	Trava	ux de réhabilitation : po	ose d'un tubage Ø 1	580mm à 5,50m du sommet, espace annulaire bétonné, nettoyage et brossag	ge du Ø550mm, aménag	ement de la tête de puits		
Mars 1995	ANTEA n° A03223	Bon état	Etat moyen å mauvais	0,7m / initial	Court à moyen terme : améliorer l'étanchéité de la tête de puits, de l'extradi	los du cuvelage et des er	ovrions du forage		
Sept. 2006	ANTEA n°A43781	Travaux : Réfection des abords							
Déc. 2007 ANTEA Bon état Mauvais état			Mauvais état	1m / initial	Court terme : brossage des crépines, non sans risque, et nettoyage de la buse béton avec plongeur  Long terme : rempiacement ou réhabilitation lourde				
				Valeurs d	e l'ouvrage et coûts à prévoir (horizon 10 ans)				
			d'entretien estimés à : habilitation estimés à : Coûts totaux :	15 000 € 60 000 € 75 000 €	Pric	orité Technique : 1/11	Priorité comptable : 2/11		

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

# Faisabilité de la reconquête du bon état à l'échelle d'une masse d'eau affectée par les pollutions diffuses d'origine agricole : évaluation des délais nécessaires, coûts des mesures et acceptabilité économique Expérimentation sur les alluvions de la plaine de l'Ain

L. Cadilhac<sup>(1)</sup>, C. Hérivaux, L. Gourcy<sup>(2)</sup>

(1) Agence de l'eau RMC, (2) BRGM

laurent.cadilhac@eaurmc.fr, c.herivaux@brgm.frl, gourcy@brgm.fr

#### I. INTRODUCTION

La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) demande aux Etats-membres de retrouver des eaux et des milieux aquatiques en bon état pour l'échéance 2015. Pour les milieux qui ne pourraient être parvenus à ce bon état en 2015, le texte européen donne la possibilité d'accorder des délais supplémentaires (2021, 2027) sous réserves de raisons justifiées.

Sur le bassin Rhône-Méditerranée (RMed), comme dans de nombreuses régions de France, les bilans réalisés pour la mise en œuvre du Schéma directeur d'aménagement de gestion des eaux (Comité de bassin RMed 2004 et 2009) ont montré que de nombreuses masses d'eau souterraine étaient dégradées par des pollutions diffuses d'origine agricole (nitrates, pesticides) et ne pourraient pas atteindre le bon état dès 2015.

Pour pouvoir restaurer la qualité des eaux à l'échelle de chaque masse d'eau, la DCE demande de définir et de mettre en place des programmes d'action.

La préparation des programmes d'action pour traiter la question des pollutions d'origine diffuse dans les eaux souterraines se heurte à plusieurs difficultés :

- le choix des actions les plus pertinentes à mettre en œuvre ;
- l'étendue et la localisation des zones sur lesquelles faire porter en priorité ces actions pour qu'elles soient les plus efficaces pour reconquérir globalement la qualité de la masse d'eau ;
- le délai nécessaire pour obtenir le bénéfice des actions engagées ;
- l'acceptabilité économique des mesures agro-environnementale (MAE) préconisées pour lutter contre les pollutions

Il nous paraissait donc intéressant sur une masse d'eau représentative des problèmes fréquemment rencontrés sur le bassin RMed de développer une approche intégrée visant à évaluer la faisabilité et l'efficacité environnementale de différentes mesures de lutte contre la pollution par les nitrates pour garantir le retour au bon état de la masse d'eau et apprécier les délais nécessaires.

Cette communication présente les résultats d'une action de recherche conduite entre 2008 et 2012 dans le cadre du partenariat liant le BRGM et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### Le projet visait à :

- 1. mieux connaître les temps de transfert de l'eau et solutés associés et les temps de réponses d'un aquifère de type alluvionnaire bien représentatif des aquifères du district RMed soumis à de fortes pressions de pollutions diffuses ;
- 2. identifier les mesures les plus efficaces pour restaurer la qualité des eaux et en vérifier l'acceptabilité socio-économique ;
- 3. être en mesure d'évaluer les délais nécessaires au retour au bon état ;
- 4. disposer d'une méthodologie ou d'un ensemble de méthodologies transposables à d'autres systèmes similaires (alluviaux/fluvio-glaciaires).

La méthodologie développée mobilise le couplage d'approches hydrogéologiques, agronomiques et économiques (Fig. 1), à l'échelle d'une masse d'eau souterraine : la masse d'eau des alluvions de la plaine de l'Ain, représentative des masses d'eau de type alluvions anciennes du bassin RMed particulièrement concernées par les pollutions diffuses d'origine agricole sous culture de maïs irrigué.

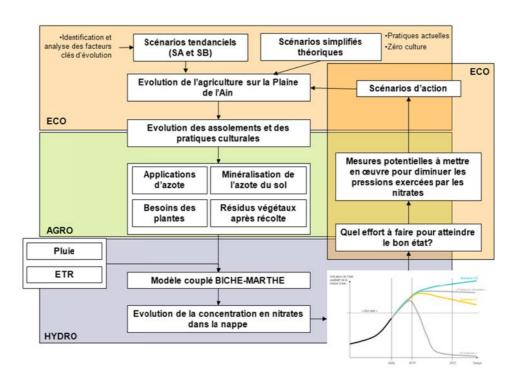


Figure 1 – Vue d'ensemble de la démarche

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le choix du site d'étude s'est porté sur la masse d'eau des alluvions de la plaine de l'Ain pour sa partie sud. Cette masse d'eau d'une surface de 250 km² environ est largement affectée par les pollutions diffuses (nitrates<sup>7</sup>, pesticides) et identifiée comme risquant de ne pas atteindre le bon état en 2015.<sup>8</sup>

Elle présente l'avantage d'être bien connue ayant donné lieu à de nombreuses études (Horizons, 2009) et à une modélisation maillée (Burgéap, 2005 et 2006) avec un organisme impliqué sur sa gestion dans le cadre d'un SAGE, le Syndicat de la basse vallée de l'Ain.

La masse d'eau s'étend de part et d'autre de la rivière Ain à l'amont de sa confluence avec le Rhône à une trentaine de kilomètres à l'est de Lyon (Fig. 2)

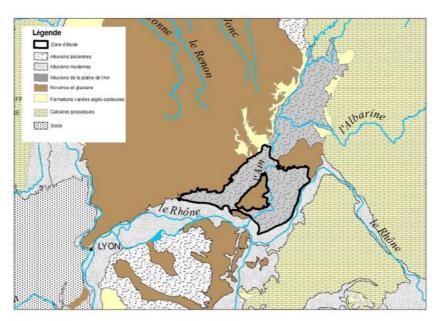


Figure 2 – Localisation de la zone d'étude

#### II. 1 Caractéristiques hydrogéologiques et nature des sols

La masse d'eau regroupe des alluvions anciennes fluvio-glaciaires disposées sous forme de terrasses étagées qui encadrent des alluvions fluviatiles sur lesquelles s'écoule la rivière Ain. Il faut noter aussi la présence de buttes morainiques qui émergent des épandages alluvionnaires.

Les **alluvions fluvio-glaciaires** qui résultent des alternances des périodes glaciaires et interglaciaires quaternaires occupent la majeure partie de la plaine. Ces alluvions correspondent à un matériau composé de galets, graviers dans une matrice sableuse à sablo-argileuse. Les perméabilités varient suivant le degré d'altération des matériaux mais sont importantes en général, avec une moyenne autour de  $11x10^{-3}$  m/s.

L'épaisseur de ces terrasses fluvio-glaciaires varie entre 2 et 40 m.

Les **alluvions modernes** de l'Ain forment des bandes étroites de part et d'autre des rives de l'Ain, elles correspondent à des sables, graviers, galets avec aussi des argiles et limons en surface. Leur perméabilité est plus faible que celle des alluvions anciennes (de l'ordre de 1 à 2x10<sup>-3</sup> m/s en moyenne) avec des épaisseurs qui varient entre 4 et 15 m.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Un certain nombre de communes situées sur la plaine sont classées zone vulnérable pour les nitrates depuis 1994

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Selon la règles définie pour l'application de la DCE en France, une masse d'eau souterraine est en bon état dès lors que la valeur seuil de 50 mg/l n'est pas dépassée sur plus de 20% de la superficie de la masse d'eau

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Le substratum des dépôts quaternaires est constitué soit par des matériaux morainiques très altérés et boues glaciaires (argiles), soit par des dépôts tertiaires argilo-sableux miocènes ou pliocènes.

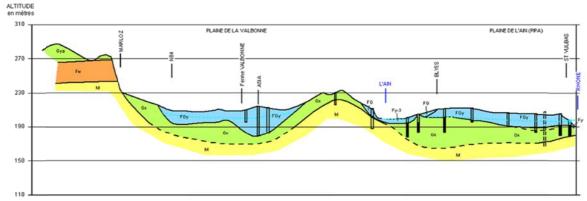


Figure 3 - Plaine de l'Ain - Coupe nord-ouest /sud-est

Sur ces formations on note la présence de sols limono-argilo-sableux plus ou moins caillouteux et peu profonds rendant la nappe très vulnérable.

### II. 2 L'occupation des sols.

L'agriculture domine très largement avec plus de 62 % de la surface (Fig. 3). En 2008, 14 000 ha sont cultivés sur la partie sud de la nappe. Les céréales et les oléo-protéagineux occupent 83 % de la SAU, le maïs étant la principale culture de la plaine avec 8500 ha dont 7900 ha irrigués. 223 exploitations sont présentes sur la plaine (au moins en partie).

Bien que la plaine soit globalement peu urbanisée, la proximité de Lyon créé une pression démographique grandissante. De 1979 à 2006, on note une disparition d'environ 1150 ha agricoles (-0,3% par an) au profit principalement de l'artificialisation du territoire (données RGA et Corine Land Cover). Les zones urbanisées représentent près de 10 % de la surface et les zones industrielles 6% - dont une centrale électrique nucléaire. A cela il faut ajouter la part dévolue aux forêts et milieux semi-naturels (17%) et les surfaces en eau (2%).

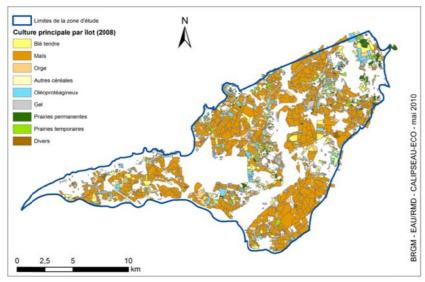


Figure 3 – Cultures principales par îlot

#### II. 3 L'utilisation de la ressource

La nappe est largement exploitée (17 Mm3 prélevés par an en 2010), principalement pour l'irrigation agricole (54 % des volumes prélevés) et l'industrie (37 %). L'usage eau potable est aujourd'hui résiduel (8 % des volumes). Il ne reste en effet que 4 captages, la plupart des captages historiques ayant été abandonnés pour cause de dépassement des normes sanitaires.

### III. COMPLEMENTS DE CONNAISSANCE SUR L'ETAT CHIMIQUE ET LE RENOUVELLEMENT DES EAUX

La première phase du projet (2008 et 2009), visait à compléter la connaissance de l'état chimique et dynamique de l'aquifère par des prélèvements d'eau et des mesures physico-chimiques effectuées en période d'irrigation du maïs (juillet).

La compilation des données et informations existantes a permis la sélection des points de prélèvements et la sélection des outils géochimiques pour la détermination du fonctionnement de la nappe de la plaine de l'Ain.

La campagne de prélèvement a permis le prélèvement d'eau souterraine à 37 points pour analyses chimiques et datation des eaux.

Sur une partie des échantillons des analyses complémentaires de  $\delta^2$ H,  $\delta^{18}$ O et  $^3$ H ont également été réalisées.

L'échantillonnage de 72 points d'eau souterraine a permis de définir l'extension de la contamination en nitrates, atrazine et métolachlore. Les analyses de ces deux pesticides par la méthode de screening type « ELISA » ont été complétées par la détermination, plus classique, par chromatographie de 18 molécules sur 20 points d'eau.

Une nouvelle campagne de prélèvement pour analyse des eaux en juillet 2009 a permis de relever de faibles variabilités entre juillet 2008 et juillet 2009 des concentrations en éléments chimiques majeurs et traces.

Vis-à-vis des nitrates, l'impact anthropique se fait sentir principalement sur le secteur central et rive gauche de l'Ain (Fig. 4) avec une concentration moyenne en nitrate des eaux de la plaine alluviale sur le secteur Blyes-Loyettes-St. Vulbas de 53 mg.l<sup>-1</sup>.

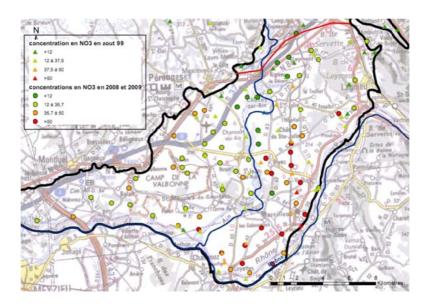


Figure 4 – Distribution spatiale des concentrations en nitrates (mg. $\Gamma^1$ ) (données 07/2008, 07/2009, et 08/1999)

#### **Datation des eaux**

Des analyses de CFC et SF6 ont été réalisées sur tous les points d'eau souterraine prélevées en 2008 et 2009 sauf lorsque les conditions de prélèvement n'étaient pas favorables à ce type de prélèvement et qu'une contamination de l'échantillon était donc très probable (Loyettes/Trompette, St. Vulbas/Collonges).

Les concentrations en CFC-11, CFC-12 et CFC-113 des points d'eau analysés et non contaminés en 2008 et 2009 (32 points d'eau) sont similaires pour presque tous les points.

Les temps moyen de résidence des eaux sont le plus souvent inférieurs à 12 ans et leur répartition spatiale ne semble pas suivre un schéma spécifique suivant les lignes de flux par exemple, confirmant l'hétérogénéité de l'aquifère à cette échelle de travail (Fig.5).

Vingt-huit pourcent des points d'eau présentent un temps moyen de résidence inférieur ou égale à 4 ans. Les temps de circulation des eaux dans la plaine sont donc localement rapides.

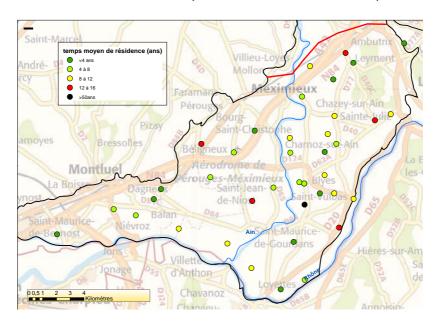


Figure 5 – Carte des temps moyen de résidence estimés à l'aide du modèle exponentiel sur les prélèvements d'eaux souterraines effectués en 2008 et 2009

La préparation des données, la description des opérations 2008 et 2009 de l'étude et l'interprétation complète des données chimiques et isotopiques et des résultats des mesures de pesticides par tests ELISA se trouvent dans les rapports précédents de l'étude (Gourcy et al., 2008 et Gourcy et al., 2010).

### IV. COMPREHENSION ET MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME HYDROGEOLOGIQUE

Pour modéliser les concentrations en nitrates dans la plaine de l'Ain et simuler l'évolution future de la qualité de la nappe, un modèle de transport a été développé couplant un modèle de transfert de nitrates dans la zone non-saturée depuis la surface jusqu'à la nappe (BICHE) et un modèle hydrodynamique de nappe (MARTHE).

Le modèle hydrodynamique de la plaine de l'Ain a été repris à partir du modèle Modflow existant développé par le Burgéap pour le compte du Conseil général de l'Ain (Burgéap, 2005 et 2006), complété et retranscrit sous le logiciel MARTHE (Thiéry, 1995).

Le modèle déterministe de transfert BICHE (Thiéry et Seguin 1985) a été utilisé pour estimer les flux de nitrates sortant du système sol-plante vers les eaux souterraines et simuler le fonctionnement du système sol-eau-plante-atmosphère au pas de temps décadaire, en prenant en compte la croissance et le développement des cultures ainsi que les bilans en eau et en azote.

Le modèle de transfert se base sur les paramètres précipitations et ETP qui proviennent du jeu de données utilisé pour la modélisation hydrodynamique et sur les paramètres relatifs à l'apport en fertilisants, les besoins en azote des plantes, la minéralisation des sols et les résidus végétaux. Ces paramètres sont décrits en détails dans Gourcy et al. (2009). Les résultats de BICHE étant ponctuels (1D) dans l'espace, neuf secteurs homogènes du point de vue mode de transfert des nitrates et pressions agricoles ont été définis sur la base du croisement de critères géologiques, hydrogéologiques, agronomiques et pédologiques afin de pouvoir extrapoler les résultats sur l'ensemble de la plaine. Pour chacun des 9 secteurs, les chroniques de concentrations en nitrates disponibles sur la base de données ADES (<a href="www.eaufrance.ades.fr">www.eaufrance.ades.fr</a>) et celles de l'Association Syndicale d'Irrigation de l'Ain ont été utilisées pour calibrer le modèle. Les résultats sont globalement satisfaisants, avec une bonne correspondance entre les concentrations de nitrates minimales, maximales et moyennes simulées et les chroniques de mesures.

#### Résultats

Après calage préalable des deux modèles MARTHE et BICHE, ces derniers ont été couplés pour simuler dans un premier temps la concentration observée de 1975 à 2009 dans la plaine de l'Ain. La simulation a été menée sur plus de 30 ans, échelle de temps qui permet un équilibrage des concentrations en nitrates dans les différents réservoirs du modèle simulant les transferts à travers le sol. Le modèle reproduit bien les tendances de la distribution observée en 1999 et 2008 en nitrates (Fig. 6): alors que la moitié nord de la plaine est peu concentrée en nitrates (< 20 mg.l<sup>-1</sup>), la concentration dans la moitié sud est plus élevée. L'approche couplée montre toutefois des limites : les tendances saisonnières et interannuelles assez mal restituées et les ordres de grandeur simulés restent entachés de l'imprécision inhérente à ce type de modèle.

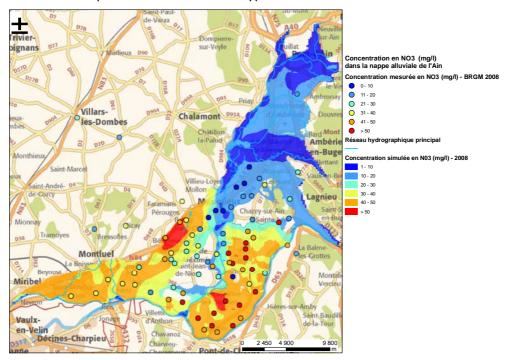


Figure 6 – Résultat de la modélisation: comparaison des concentrations en NO3 simulées et mesurées en 2008

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### V. EVOLUTION DE LA QUALITE DE LA NAPPE EN L'ABSENCE DE PROGRAMME D'ACTION

Les résultats globalement satisfaisants obtenus lors du calage permettent l'utilisation du modèle couplé pour simuler des scénarios d'évolution de l'agriculture sur la plaine à l'horizon 2027 et leurs impacts sur la qualité de la nappe. Hérivaux (2012) discute ces résultats en termes d'efficacité et de coût de ces scénarios.

Au total quatre scénarios ont ainsi été testés :

Deux scénarios simplifiés théoriques (Scénario 0 ou « zéro culture » : arrêt total des apports de nitrates d'origine agricole et scénario C ou « continuité » : poursuite à l'identique des pratiques actuelles) ont permis d'évaluer l'inertie de la nappe et la réversibilité de la contamination en nitrates .

- si les applications en fertilisants s'arrêtent, la concentration en nitrates diminue après 1 à 3 ans dans la nappe, avec un taux de décroissance plus ou moins élevé selon les secteurs. Un retour à une concentration initiale ou stable peut nécessiter sur certains secteurs plus d'une dizaine d'années;
- si les pratiques actuelles restent inchangées, la concentration en nitrate atteint un palier ou augmente légèrement dans certains secteurs, atteignant sur certains secteurs des valeurs supérieures à 50 mg.l<sup>-1</sup>.

Deux scénarios d'évolution contrastée de l'agriculture ont été construits sur la base d'une démarche prospective (Hérivaux and Surdyk, 2010; Hérivaux, 2012), mobilisant les points de vue et savoirs des acteurs locaux (Chambre d'Agriculture de l'Ain, Direction Départementale des Territoires de l'Ain, Arvalis, Chambre Régionale d'Agriculture Rhône-Alpes, AGRIDEV, SBVA, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse) par la mise en œuvre de la méthode des scénarios.

- Le premier scénario (scénario A) décrit le développement d'une « agriculture compétitive et environnement agro-efficace », avec des préoccupations environnementales subordonnées à un objectif prioritaire de productivité. Ce scénario a des conséquences importantes sur la qualité de la nappe, avec une augmentation progressive de la teneur en nitrates (Fig. 5 et Fig. 6). Sous Saint-Vulbas, entre Ain et Rhône, le modèle indique une augmentation des concentrations en nitrates avec, sur l'ensemble du secteur, des concentrations supérieures au seuil de 50 mg.l<sup>-1</sup> dès 2021;
- Le second scénario (scénario B) décrit la mise en place progressive d'une agriculture haute performance environnementale soumise au respect de normes éco-conditionnelles très strictes. Ce scénario conduit à une décroissance lente mais soutenue de la teneur en nitrates dans la nappe (Fig. 7 et Fig. 8), avec une concentration des eaux souterraines qui descend globalement en dessous de 40 mg.l<sup>-1</sup> dès 2021.

Alors que le scénario A appelle à mettre en œuvre des programmes d'actions pour réduire les pressions exercées par les nitrates, si l'agriculture évoluait selon le scénario B, aucune action ne serait nécessaire pour respecter les exigences de la DCE. Lors de l'atelier, le scénario A ayant été évalué par les participants de l'atelier comme le scénario le plus probable, celui-ci a été considéré comme le scénario de référence pour la définition des programmes d'action.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

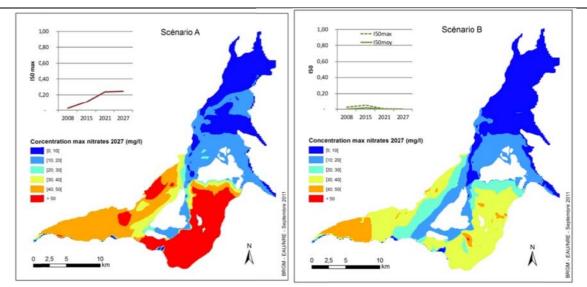


Figure 7. Concentrations en nitrates simulées en 2027 pour les scénarios A et B

### (ensemble de la nappe)

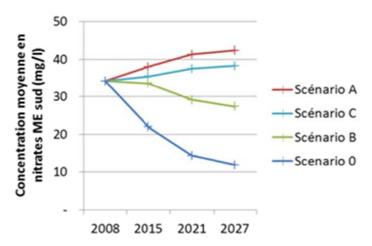


Figure 8 Evolution des concentrations moyennes en nitrates pour les scénarios 0, A, B et C

(partie sud de la nappe)

### VI. QUELLES ACTIONS METTRE EN PLACE POUR L'ATTEINTE DU BON ETAT ? OU EST-IL LE PLUS EFFICACE D'AGIR ? QUELLE ACCEPTABILITE ECONOMIQUE DES ACTIONS PROPOSEES ?

Pour finir, la dernière étape de l'analyse visait à construire, simuler et évaluer des programmes d'actions potentiels visant à améliorer l'état de la nappe alluviale de l'Ain. Cinq scénarios d'actions ont été testés et comparés les uns aux autres sur la base d'une analyse coût-efficacité. Les coûts ont été évalués comme les surcoûts directs pour les exploitants agricoles résultant de la mise en place des actions (pour la méthode d'estimation des coûts voir Hérivaux, 2012). L'efficacité a été évaluée sur la base des résultats de modélisation BICHE-MARTHE.

Cinq actions ont été retenues comme particulièrement pertinentes pour diminuer les pressions exercées par les nitrates sur la nappe alluviale de l'Ain (Tabl. 1): d'une part l'augmentation des

superficies en prairies, avec ou sans valorisation de fourrage (P1 et P2) et d'autre part la mise en œuvre de rotations<sup>9</sup>, visant à diminuer la fréquence du retour du maïs sur une même parcelle. Trois types de rotations différentes correspondant à plusieurs fréquences de retour du maïs sont simulées (R1, R2 et R3).

Action	Description
P1	Reconversion de 5% des terres arables en prairies de fauche (avec fertilisation et vente du foin)
P2	Reconversion de 5% des terres arables en gel sans production.
R1	Diminution de la fréquence de retour du maïs : trois années sur quatre maximum (M/M/M/B et M/M/M/S)
R2	Diminution de la fréquence de retour du maïs : deux années sur trois maximum (M/M/B et M/M/S)
R3	Diminution de la fréquence de retour du maïs : deux années sur cinq maximum (M/M/O/T/B)

Tableau 1 - Les cinq actions retenues

Parmi les cinq scénarios d'actions testées, le scénario R1 qui consiste à limiter la fréquence de retour du maïs dans la rotation à trois années sur quatre maximum, est le plus coût-efficace et permet d'atteindre le bon état de la nappe. Le surcoût lié à sa mise en œuvre est évalué à 150 000 euros par an, soit 17 euros par hectare de SCOP en moyenne. Le scénario R2, avec une fréquence de retour du maïs de deux années sur trois maximum est également à prendre en considération. Le surcoût lié à sa mise en œuvre est évalué à 339 000 euros par an, soit 38 euros par hectare de SCOP en moyenne. L'analyse spatiale plus fine des résultats de modélisation montrent que les ratios coût-efficacité des actions sont meilleurs sur les secteurs situés en rive gauche de l'Ain (secteurs 2 et 3). Le coût de mise en œuvre des actions pourrait être globalement réduit de 33% si celles-ci sont mises en place uniquement sur ces secteurs, mais avec un surcoût moyen unitaire supérieur (23 et 52 euros par hectare de SCOP respectivement pour les scénarios R1 et R2). Ce coût est également très fortement dépendant du cours des céréales et oléo-protéagineux : les variations des prix observés sur la période 1999-2007 engendreraient une variation des coûts de mise en œuvre de R1 et R2 de -50% à +160% autour de la moyenne. Aucun dispositif, de type mesure agri environnementale (MAE) par exemple, n'est prévu aujourd'hui pour compenser le surcoût lié à la mise en œuvre de ce type de rotationnelle. Si celui-ci devait être mis en place, il faudrait alors prévoir une compensation au moins égale au surcoût moyen engendré par la mise en œuvre de cette action afin que celle-ci soit acceptable d'un point de vue économique par les acteurs agricoles.

#### VII. CONCLUSIONS

Une étude hydrogéologique complète, intégrant les paramètres dynamiques et qualitatifs de l'état de la masse d'eau et nécessitant un grand nombre de données agricoles et des chroniques de suivi de la qualité et hauteurs des eaux a permis de construire un modèle de transfert des nitrates des sols vers la nappe tenant compte d'une certaine variabilité spatiale des pratiques agricoles et des caractéristiques hydrogéologiques. Le modèle, une fois calibré par l'utilisation des chroniques

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Ces mesures ont été définies dans le cadre du projet de recherche et ne doivent pas être confondues avec les dispositifs MAE existants. Elles se distinguent de la MAE rotationnelle 2010 sur de nombreux points (exige au moins 4 cultures différentes, la culture majoritaire couvrant moins de 50% de la surface engagée, part des 3 cultures majoritaires inférieure à 90%...). Ainsi par exemple, R1 et R2 impliquent la présence du maïs sur plus de 50% de l'assolement et ne font pas intervenir 4 cultures différentes.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

d'évolution des nitrates dans les eaux souterraines, de la connaissance de la variabilité spatiale des concentrations et des paramètres dynamiques, peut être utilisé pour simuler divers scénarios d'évolution de la qualité de la ressource. L'estimation de l'efficacité en termes de diminution des concentrations en nitrates suite à des changements de pratiques agricoles localisées à des « secteurs homogènes » de quelques dizaines de km2 est réalisable tout en prenant compte de l'incertitude du modèle.

Cette étude apporte un éclairage méthodologique innovant sur la conduite d'une évaluation économique pour définir un programme d'actions visant à améliorer la qualité d'une nappe d'eau souterraine dégradée par les nitrates d'origine agricole. Il contribue plus particulièrement au trois points suivants :

- la définition de scénarios contrastés d'évolution des pressions polluantes exercées par l'agriculture, par l'utilisation de données agro-économiques spatialisées et la mise en place d'une démarche participative ;
- l'évaluation du risque de non atteinte du bon état, par le développement d'un couplage entre des approches économiques, agronomiques et hydrogéologiques ainsi que par l'articulation de méthodes participatives et de modèles ;
- l'analyse coût-efficacité de programmes d'actions, par la mise en œuvre d'une analyse économique basée sur une évaluation des surcoûts engendrés par la mise en place des actions pour les agriculteurs s'appuyant sur une modélisation de l'état de la nappe.

Le scénario d'évolution de l'agriculture qui apparaît comme le plus probable entraîne une dégradation de la qualité de la nappe alluviale de l'Ain. Aucun signal/ dispositif ne semble aujourd'hui suffisamment incitatif/ acceptable d'un point de vue économique pour infléchir l'évolution de la qualité de la nappe dans cette zone agricole très productive. Introduire une diversification des assolements par un plafonnement de la fréquence de retour du maïs à deux années sur trois maximum, permettrait, selon les résultats du modèle couplé, d'atteindre les objectifs de la DCE. Une mise en œuvre de cette action ciblée sur les deux secteurs en rive gauche de l'Ain serait suffisante et permettrait de réduire le coût de mise en œuvre de 34%. Si un instrument de type MAE devait être mis en place pour inciter la mise en œuvre de cette pratique, le niveau de compensation proposé devrait au moins être égal à 52 euros par hectare et par an.

On peut cependant s'interroger sur la viabilité des instruments de type MAE, qui du fait de leur durée de 5 ans, ne permettent pas toujours de faire évoluer les pratiques sur le long terme. Faut-il continuer à indemniser ou réfléchir à changer le système ?

Le scénario B montre qu'une combinaison de facteurs de changement pourrait permettre une évolution des systèmes de production permettant de garantir sur le long terme une bonne qualité chimique des eaux souterraines.

38% des masses d'eau souterraines sont affectées par les pollutions diffuses d'origine agricole, soit plus de 50% de la superficie du territoire français. La problématique rencontrée sur la plaine de l'Ain touche ainsi de nombreux autres territoires avec des systèmes de production agricoles et des caractéristiques hydrogéologiques variés. La démarche scientifique proposée dans ces travaux peut être reproduite dans d'autres contextes agro-hydrogéologiques. La réalisation d'autres études de cas, représentatives de la diversité des situations agro-hydrogéologiques rencontrées en France permettrait ainsi de disposer d'études de référence éventuellement extrapolables à d'autres sites similaires de manière à aider à la préparation des seconds plans de gestion à mettre en œuvre en 2016.

Les résultats du projet CALIPSEAU-ECO constituent un premier socle de propositions à approfondir par le SAGE pour la reconquête de la qualité des eaux de la plaine de l'Ain.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### Références bibliographiques

Hérivaux C. (2012) – Analyse coût-efficacité spatialisée de programmes d'actions visant à restaurer le bon état de la nappe de l'Ain. Rapport final. Rapport BRGM/RP-60624-FR. 84p., 46 ill, 2 ann.

Gourcy L., Buscarlet E., Baran N., Surdyk N., Thiéry D., Levillon F. (2011) — Caractérisation de l'inertie des systèmes aquifères vis-à-vis des pollutions diffuses d'origine agricole : application à la plaine de l'Ain. BRGM/RP-59754-FR. 86p., 47 ill., 4 ann.

Gourcy L., Buscarlet E., Thiéry D., Surdyk N., Baran N. (2010) – Caractérisation de l'inertie des systèmes aquifères vis-à-vis des apports diffus d'origine agricole – Application à l'aquifère de la plaine de l'Ain. Rapport final de phase 2, BRGM/RP-57945-FR, 65p. 46 ill. 9 ann.

Hérivaux C., Surdyk N. (2010) - Acceptabilité socio-économique de mesures visant à restaurer le bon état de la nappe de l'Ain. Etape 1 : construction de scénarios d'évolution de l'agriculture. BRGM/RP-57957-FR . 94 p., 3 ann.

Gourcy L., Surdyk N., Thiery D., Winckel A., Cary L., Amaraoui N. (2008) - Caractérisation de l'inertie des systèmes aquifères vis-à-vis des apports diffus d'origine agricole — Rapport de phase 1. Rapport BRGM/RP-56694-FR

Comité de bassin RMC (2004) - Bassin du Rhône et des cours d'eau côtiers méditerranéens. Caractérisation du district et registre des zones protégées. Etat des lieux. Accessible sur <a href="http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/qestion/dce/etat-des-lieux.php">http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/qestion/dce/etat-des-lieux.php</a>

Comité de bassin RMC (2009) Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux du bassin Rhône-Méditerranée 2010-2015.

BURGEAP, Conseil Général de l'Ain (2005 et 2006) - Modélisation de la nappe alluviale de la basse plaine de l'Ain et de ses milieux. annexes - 3 rapports phases 1, 2 et 3.

Horizons (1999) – Etude hydrogéologique sur le périmètre du SAGE de la Basse Vallée de l'Ain. SIVU BVBVA. Chazey/Ain.

Thiéry D. (1995) - Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38149 DR/HYT 95, 171 p.

Thiéry D., Seguin J.J. (1985) - Modélisation globale des transferts de nitrate dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Description du modèle BICHE – Trois exemples d'application. Rapport BRGM 85 SGN 663 EAU. 182 p.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

## Modélisation spatialisée des transferts d'azote par couplage SWAT (IRSTEA) et MARTHE (BRGM). Exemple du bassin de la Boutonne

### M. Chatelier, O. Leccia, F. Vernier, F. Bichot

BRGM –Poitou-Charentes/IRSTEA - Bordeaux m.chatelier@brgm.fr, odile.leccia@irstea.fr, francoise.vernier@irstea.fr, f.bichot@brgm.fr

### I. Problématiques

Avec une superficie de 10 550 km², le bassin versant de la Charente couvre une grande part de la zone nord du Bassin Aquitain. La Charente prend sa source sur le socle du Massif Central et s'écoule jusqu'au littoral en remontant d'abord vers le Nord et le Seuil du Poitou.

De l'amont, avec le socle d'âge primaire, jusqu'à l'aval avec la morphologie et les dépôts du Quaternaire, elle traverse aussi l'histoire des temps géologiques. La géologie contribue à morceler ce bassin versant en grands ensembles hydrogéologiques relativement homogènes: le socle cristallophyllien à l'amont où le réseau hydrographique est dense traduisant l'absence de nappes importantes, le karst de la Rochefoucauld avec les sources de la Touvre comme exutoire principal et correspondant principalement au bassin de la Tardoire, la nappe captive de l'Infra-Toarcien sous l'aquifère karstique du Dogger entre Charroux et Mansle, la nappe superficielle de milieux fissurés du Jurassique supérieur (bassins de l'Aume-Couture, de l'Antenne, de la Boutonne, de la Gères-Devise), les aquifères calcaires et gréseux du Crétacé supérieur à l'aval (bassins du Né, de la Seugne, de l'Arnoult).

De plus, ce bassin versant est caractérisé par des relations étroites entre les différentes nappes et les rivières, avec des échanges s'effectuant dans les 2 sens.

L'état qualitatif du bassin versant est globalement dégradé et préoccupant pour les usagers de l'hydro-système, non seulement pour les prélèvements pour l'alimentation en eau potable mais aussi pour les activités économiques du littoral (ostréiculture, tourisme...), et pour les milieux aquatiques superficiels. L'occupation du sol y est diversifiée avec des zones bocagères à l'amont ((avec une présence plus importante de prairies liées à l'activité d'élevage), une activité céréalière sur une grande partie du bassin versant, le vignoble dans sa partie médiane.

Les photographies réalisées en 2009 (fig.1) [1] de l'état des nappes les plus superficielles en hautes et basses eaux pour le paramètre nitrates montrent une situation assez contrastée entre les zones amont (socle) et globalement orientales, avec des teneurs faibles à modérées, et les plateaux et plaines calcaires où les aquifères de fissures ou de karsts sont très dégradés. Parmi les zones qui présentent des teneurs supérieures à 50 mg/l, seuil de potabilité, on peut citer : le Civraisien entre Clain et Charente, le haut bassin de la Boutonne et le secteur moyen autour de St-Jean-d'Angély, un secteur dans le Sud-Angoumois et surtout les bassins versants de la Gères et de la Devise. Ces teneurs sont variables dans l'année, avec des valeurs plus élevées (souvent de 10 à 20 %) en hautes eaux (lessivage des terres, absence de couverture végétale...) par rapport aux basses eaux.

6327 analyses sur 161 points extraites de la base de données ADES ont permis d'analyser l'évolution de cette qualité des eaux sur 10 à 20 ans. D'une manière générale on ne note pas d'évolution

significative, notamment dans les secteurs très dégradés où les teneurs mesurées actuellement sont à peu près celle mesurées il y a 20 ans (fig.2). Quelques chroniques montrent cependant une augmentation mais avec en général une certaine stabilité depuis 2000. Ces augmentations sont surtout sensibles dans les secteurs à teneurs faibles à modérées (les teneurs passent par exemple de 10 à 20 mg/l).

La Directive Cadre européenne sur l'Eau impose un retour au bon état des nappes et des rivières. Aussi, l'Agence de l'eau souhaite mettre en place sur ce bassin des outils permettant de mieux orienter les politiques publiques en répondant à des questions comme : quelles zones à prioriser ?, dans combien de temps peut-on espérer des résultats ? Quelles seraient les pratiques agricoles les plus efficaces à mettre en place pour réduire la pollution diffuse ?

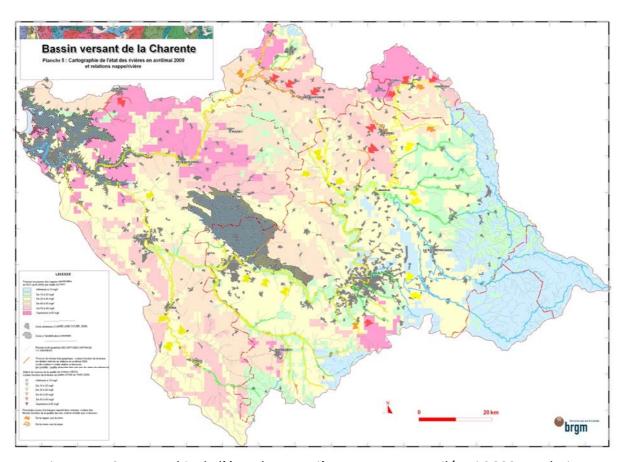


Figure 1 – Cartographie de l'état des premières nappes en avril/mai 2009 et relation nappe/rivière : les zones en rouge vif présentent des teneurs supérieures à 60 mg/l (Sud-Angoumois, Nord Charente, Nord Boutonne, région de St-Jean-d'Angély, bassins de la Gères-Devise)

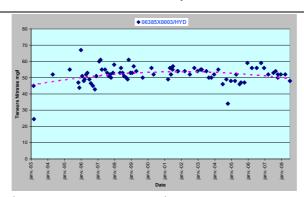


Figure 2 – Evolution des teneurs en nitrates depuis 20 ans : source sortant du Dogger à Charroux

### II. Les modèles hydrodynamiques des nappes du bassin de la Charente (BRGM)

Sur le bassin versant de la Charente, le BRGM a mis en place depuis plusieurs années, avec l'aide des deux agences de l'eau Adour-Garonne et Loire-Bretagne, de la Région et de la DREAL Poitou-Charentes, deux modèles hydrodynamiques qui couvrent la totalité du bassin. Au Nord, celui des nappes du Jurassique [2] s'étend depuis Châtellerault jusqu'à une limite Angoulême-Rochefort, en englobant les bassins versants du Marais Poitevin (fig.3). Au Sud, celui des nappes du Crétacé [3] prend le relai, couvrant la partie méridionale des deux départements des Charentes (fig.4).

Ces deux modèles hydrodynamiques, construits à l'aide du logiciel MARTHE, présentent tous les deux huit couches, alternant aquifères (Infra-Toarcien, Dogger, Jurassique supérieur et Cénomanien (Nord Vienne) pour le modèle des nappes du Jurassique, Cénomanien, Turonien, Coniacien, Campanien-Maastrichtien pour celui du Crétacé) et semi-perméables. Le pas de temps est mensuel et la maille kilométrique. Le calage a été réalisé sur la période 2000/2007 pour le modèle des nappes du Jurassique et 2000/2008 pour le modèle du Crétacé. La surface du modèle correspond à la topographie construite à partir du modèle numérique de terrain d'IGN.

Le code de calcul MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements), développé par le BRGM, utilise la méthode des volumes finis, et permet le calcul des écoulements de fluides et de transferts de masse et d'énergie en milieux poreux bidimensionnels (plan ou coupe verticale) et tridimensionnel [4]. Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone saturée et/ou non saturée, écoulements multiphasiques, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction entre cours d'eau et nappes, etc.) en régime permanent ou transitoire. Il permet aussi de simuler des drains souterrains.

Dans le modèle l'essentiel du réseau hydrographique a été introduit en utilisant les fonctionnalités de MARTHE pour la gestion des relations nappe/rivière. La recharge des nappes et le ruissellement sont calculés à partir des bilans hydro-climatiques en utilisant l'outil GARDENIA [5] intégré à MARTHE.

Ces 2 modèles ont été utilisés pour le calcul de l'impact des prélèvements sur les nappes et les cours d'eau, dans l'optique de l'évaluation des « volumes prélevables », dans la simulation de l'impact de projets de retenues de substitution, dans le calcul des apports d'azote sur le littoral, dans l'estimation des impacts du réchauffement climatique et d'une remontée du niveau de la mer....

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

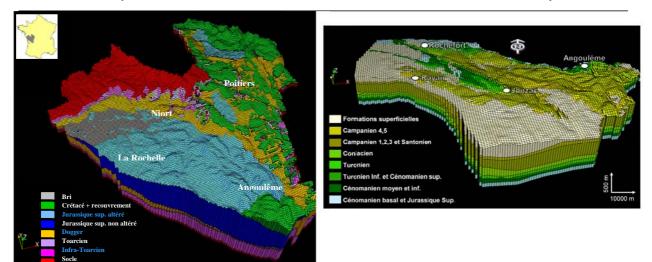


Figure 3 – Bloc-diagramme du modèle des nappes du Jurassique

Figure 4 – Bloc-diagramme du modèle des nappes du Crétacé

#### III. Le modèle d'IRSTEA sous SWAT

Dans le bassin Charente, IRSTEA travaille sur les pratiques culturales ainsi que sur le transfert des nitrates et des phytosanitaires à l'aide du logiciel SWAT depuis plusieurs années (notamment dans le cadre du programme RESPIREAU [6] La base de données sur les pratiques culturales de SWAT a été adaptée au contexte agro-pédo-physico-climatique local.

Développé à l'USDA - Agricultural Research Service SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle de bassin versant à base physique semi-distribué à pas de temps continu qui estime les flux d'eau, de nutriments, de pesticides, de bactéries et de sédiments dans la zone racinaire, dans la nappe ou dans les cours d'eau [7]. Il permet ainsi de de prédire les impacts environnementaux des pratiques d'occupation du sol [8], comme les scénarii de pratiques agricoles. Il est codé en FORTRAN.

SWAT, modèle semi-distribué, autorise la discrétisation d'un territoire en zones géométriques dépendantes de la topographie : les sous-bassins. Les connexions entre les sous-bassins se font par les exutoires. L'unité de base du calcul est la HRU (Unité de Réponse Hydrologique) définie par le croisement d'un type de sol, d'une occupation du sol, de classe de pentes et d'un sous bassin versant (fig.5). Chaque HRU présente un comportement agro-hydrologique homogène. Les sorties calculées par HRU sont ensuite globalisées à l'échelle du sous-bassin et enrichies des résultats spécifiques au sous-basssin, comme ceux simulant le transport et du devenir dans les rivières. Le pas de temps de calcul est journalier.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

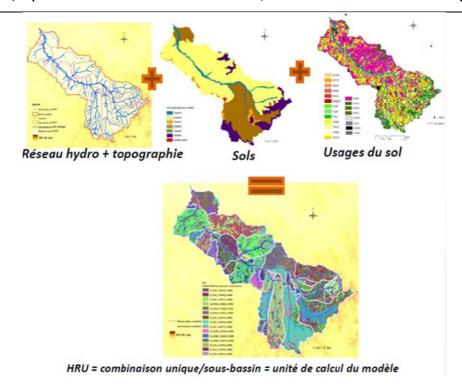


Figure 5 – Principe de discrétisation de la maille de calcul HRU

SWAT simule les processus bio-physico-chimiques (flux d'eau, croissance de la plante, cycle de l'azote...) et utilise les informations suivantes afin de relier les entrées et les sorties du modèle : conditions climatiques, propriétés physico-chimiques du sol, topographie, base de données agronomique et pratiques de gestion du sol. SWAT reproduit le cycle de l'eau de façon simplifiée à l'échelle du bassin versant en prenant en compte quatre compartiments qui communiquent entre eux : la surface, les horizons de sols et la zone racinaire, l'aquifère de surface et l'aquifère profond. Ce qui percole de la zone non saturée est supposée recharger l'aquifère de surface. L'eau qui atteint l'aquifère profond est alors perdue par le système. De façon simplifiée, SWAT modélise le cycle hydrologique suivant deux phases :

- l'étape 'terrienne' du cycle hydrologique simule le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration et l'exportation d'eau vers les rivières,
- l'étape du transport de soluté au sein du réseau hydrographique (flux de surface) : flux d'eau, de sédiments, de nutriments et de matière organique.

Le cycle de l'azote est modélisé à l'aide de 5 réservoirs :

		1
•	l'azote « frais »	
•	l'azote stable	
•	l'azote actif	
•	les nitrates	
-		
•	l'ammonium	

L'azote « frais » provient des résidus de plantes et de la biomasse bactérienne, tandis que l'azote « actif » est une substance humique issue de la fertilisation. La quantité d'azote organique « stable » augmente par la transformation de l'azote frais et actif et diminue par conversion en azote actif. Les nitrates sont obtenus par minéralisation de l'azote frais et actif, par nitrification de l'ammonium et

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

par la fertilisation inorganique. Leur quantité est diminuée par dénitrification et consommation de la plante. L'ammonium est produit par la fertilisation inorganique également et éliminé par nitrification et volatilisation.

D'autres phénomènes peuvent être pris en compte :

- la lixiviation et le flux de nitrates entrant dans la nappe,
- le transport de nitrates (ruissellement, écoulement latéral et percolation),
- la transformation de l'azote gazeux en acide nitrique dans la pluie,
- la fixation de l'azote par les bactéries directement dans les plantes, sans passer par le sol,
- l'évaporation de l'eau dans le sol.

Par ailleurs, les quantités initiales de nitrates dans chaque horizon du sol doivent être renseignées par l'utilisateur ou estimées directement par SWAT.

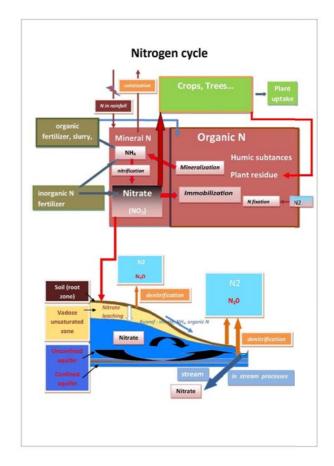


Figure 6 – Simulation des transferts et du devenir de l'azote avec SWAT (Bordenave et al, 2010)

### IV. Le « couplage » MARTHE/SWAT : exemple du bassin de la Boutonne

La collaboration IRSTEA/BRGM apporte une complémentarité de compétences entre les domaines superficiel et agronomique d'un côté et le domaine souterrain de l'autre (fig.7). SWAT présente l'avantage de fonctionner à l'échelle du bassin versant et de sous bassins versants, échelle permettant d'utiliser des paramètres descriptifs macroscopiques plus en accord avec l'échelle des modèles hydrodynamiques maillés (maille du kilomètre carré) utilisés en Poitou-Charentes. Il est à noter en effet que plusieurs pistes ont été examinées en préalable à ce travail [9] de rapprochement de ces deux logiciels, notamment l'utilisation des logiciels de modélisation STICS et AGRIFLUX. Mais l'analyse a fait ressortir que ces derniers étaient plus appropriés à un travail à l'échelle de la parcelle que de bassin versant aussi étendu que celui de la Charente.

Dans un premier temps, la faisabilité du couplage entre le code de calcul MARTHE et celui de SWAT est appréhendée au travers d'un couplage externe, c'est-à-dire sans développement numérique permettant l'utilisation couplée et simultanée des deux codes. Dans cette démarche, les étapes d'une simulation sont les suivantes :

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

- 1. Simulation et calage de SWAT (IRSTEA),
- 2. Traitement des sorties de SWAT pour les transformer en entrées MARTHE (IRSTEA/BRGM),
- 3. Calage des chroniques dans MARTHE (BRGM).

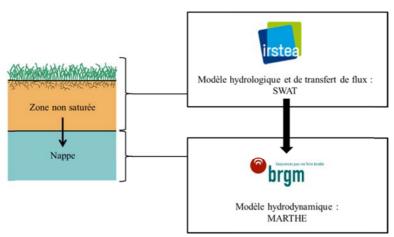


Figure 7 – Principe du « couplage externe » SWAT-MARTHE

Concrètement, les paramètres d'intrants dans le logiciel MARTHE sont intégrés par maille et donc spatialisés; les sorties de SWAT par HRU telles que le NO3L (azote lixivié) ne le sont pas; elles peuvent seulement l'être en étant agrégées au niveau du sous-bassin. Une spatialisation préalable des HRU est donc nécessaire.

Ensuite une maille MARTHE contient une ou plusieurs HRU; la quantité d'intrants dans une maille est déduite des quantités d'intrants par HRU pondérées par la superficie de chaque HRU dans la maille. Ce traitement permet d'obtenir une chronique d'intrants, sous forme de flux massique au pas de temps journalier ou mensuel, pour chaque maille du modèle hydrodynamique MARTHE.

Afin de mettre au point les procédures de passage des données de sortie de SWAT dans MARTHE un travail a été réalisé en 2012 sur le bassin versant de la Boutonne. Ce dernier présente l'avantage 1) d'être complètement intégré dans le modèle des nappes du Jurassique, 2) d'être relativement simple d'un point de vue hydrogéologique avec dans sa partie médiane et aval un grand aquifère superficiel (le Jurassique supérieur) en relation étroite avec les rivières, 3) de disposer de données plus précises sur les pratiques culturales.

Deux jeux de données, se localisant exclusivement sur le bassin de la Boutonne, ont été fournis par IRSTEA. Ces données issues du modèle sous SWAT ont été utilisées ici pour tester la méthode de couplage avec MARTHE.

Communiqué à titre d'essai pour mettre au point les procédures de transfert de données de SWAT à MARTHE, le premier jeu correspondait à un scenario agricole où la fertilisation azotée se présentait sous forme d'azote élémentaire. La quantité d'intrants nitrates en entrée de nappe ne dépassant pas 15 kg/ha, la restitution des chroniques sous MARTHE a montré des valeurs beaucoup plus faibles que celles mesurées sur le terrain.

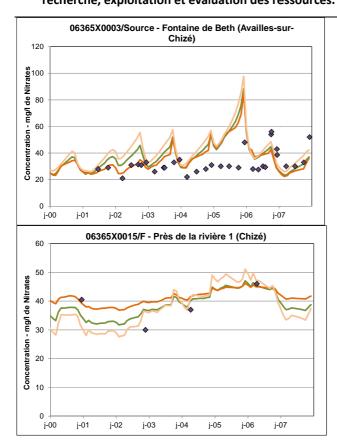


Figure 8 – Exemples de sorties du modèle MARTHE obtenues pour 2 points d'eau du bassin de la Boutonne : les courbes correspondent à sortie MARTHE avec différentes paramétrisations, les points correspondent aux données mesurées

Dans le second jeu, plus réaliste, la fertilisation azotée se présentait sous la forme d'un engrais minéral type ammonitrate. La masse de nitrates entrant dans la nappe peut atteindre plus de 90 kg/ha dans certains secteurs, ce qui correspond à des concentrations de plus de 60 mg/l de NO3 rejoignant la nappe. Il en découle des chroniques plus en adéquation avec les observations de terrain (fig.8). La carte de la figure 9 présente la distribution des nitrates dans la nappe du Jurassique supérieur pour le mois d'avril 2006 obtenue avec le second jeu de données.

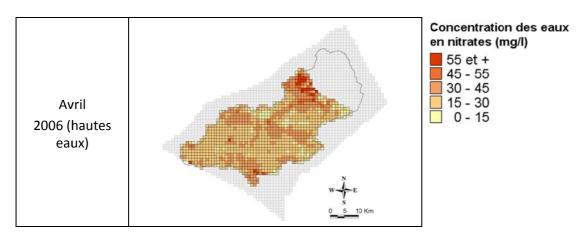


Figure 9 – Exemple de cartographie obtenue sous MARTHE avec le second jeu de données transmis par IRSTEA (issues de SWAT)

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### V. Conclusion

Les essais de modélisation réalisés sur le bassin de la Boutonne en utilisant les données de sortie de SWAT en entrée de MARTHE se sont révélés très prometteurs. Ces essais ont permis de mettre au point des procédures de transfert de données.

Malgré l'introduction de jeux de données dans MARTHE qui n'ont pas été réellement affinés, les sorties reproduisent assez bien les observations de terrain, du moins avec le second jeu de données issues de SWAT transmis au BRGM par IRSTEA.

L'objectif est de poursuivre ce partenariat qui permet de bénéficier des outils et compétences du BRGM en matière d'hydrogéologie et d'IRSTEA en matière d'évaluation agro-environnementale basée sur des scénarios de changement des pratiques agricoles. En 2013 le travail se poursuit en précisant les calages des différents paramètres introduits dans les modèles. En 2014 devrait être lancé un programme ambitieux tendant à modéliser l'ensemble du bassin de la Charente avec SWAT d'une part et MARTHE d'autre part.

Ainsi, on devrait pouvoir disposer à terme d'un modèle du bassin versant de la Charente permettant notamment de simuler l'impact sur les eaux souterraines comme de surface de politiques publiques telles que la modification des pratiques agricoles et/ou la diminution des intrants. Les enjeux sont très importants vis-à-vis notamment de l'alimentation en eau potable et vis-à-vis des activités littorales, en particulier l'ostréiculture.

#### Références bibliographiques

- [1] BICHOT F., MARCHAIS E., CHATELIER M. (2010). Bassin versant de la Charente : recherche d'une méthodologie pour prévoir l'évolution des teneurs en nitrates et phytosanitaires en fonction des pratiques anthropiques. Phase 1 : Etat des lieux par rapport aux nitrates. BRGM/RP-59154-FR. 194 p., 8 ill.
- [2] DOUEZ O., BICHOT F. et PETIT L. (2011). Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. *BRGM/RP-59288-FR*, 411 p., 286 ill., 2 ann., 4 planches hors texte.
- [3] DOUEZ O. et BICHOT F. (2012). Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Crétacé du Sud Charentes. BRGM/RP-61056-FR, 201 p., 202 ill., 3 ann.
- [4] THIERY D. (2006). Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0. Rapport final. *BRGM/RP 54652-FR, 83 p.,* 48 f
- [5] THIERY D. (2003). Logiciel GARDENIA, version 6.0 Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR
- [6] DELDREVE V. et *al.* (2011). Rapport final du projet RESPIREAU sur la « représentation systémique discutée des interdépendances entre activités humaines et ressources en eau sur le littoral, application aux Pertuis charentais et à la baie du Robert en Martinique ». *Programme RESPIREAU, Liteau III, 259 p.*
- [7] BIOTEAU T., BORDENAVE P., LAURENT F., RUELLAND D. (2002) Evaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : intérêts d'une approche par modélisation SWAT. *Ingénieries n°32, p 3-12*
- [8] NEITSCH S. L., ARNOLD J. G., KINIRY J. R., WILLIAMS J. R. (2005). Soil and Water Assessment Tool Theorical Documentation.
- [9] DOUEZ O., CHATELIER M., CUSSEY S. (2012) Faisabilité d'une modélisation du transfert azoté du sol vers les nappes et les rivières. BRGM/RP-61823-FR, 88 p., 45 ill., 3 annexes

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### **POSTERS**

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Problématique des ressources en eau des régions à climat saharien : Cas de Merzouga (Sud-Est du Maroc)

M. Hilali 1, A. Mahboub (1), M. Boualoul 1, H. Sahbi(1) et T. Bahaj (2)

(1) Equipe d'Hydrogéophysique et Cartographie Numérique ; Laboratoire de Géo-Ingénierie et Environnement. Université Moulay Ismail-Meknès, Maroc.

(2) Département de Géologie, faculté des Sciences Rabat, Maroc. E-mail : hilali2@hotmail.com

#### I. PRESENTATION DE LA REGION DE MERZOUGA

La région de Merzouga est située dans la partie Sud-Est du Maroc, à 50 kilomètres d'<u>Erfoud</u> (figure 1). Elle jouxte, le plus grand <u>erg</u> du Maroc qui est l'<u>erg Chebbi</u> situé à la terminaison orientale de la chaîne de montagnes de l'Anti-Atlas. Par sa position géographique caractérisée par une topographie basse au pied des dunes et à l'embouchure du bassin versant de l'oued El Beida, le centre de Merzouga est vulnérable aux inondations générées par cet oued.

Merzouga fait partie de la commune rurale de Taouz ; la population totale s'élève selon les résultats officiels du Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2004 à 5337 habitants [1].

Les terres cultivables ne manquent pas dans cette région pourtant très peu habitée. La superficie agricole utile de la commune s'élève à 4000 ha, dont 1178 Ha irrigués [2]. Un système de culture intensif : palmier et cultures basses (céréales, fourrages, légumineuses et maraîchage). La structure foncière est caractérisée par le morcellement et, donc, la micro-exploitation

La région fait également face à l'ensablement malgré les efforts déployés par les pouvoirs publics en matière de lutte contre ce phénomène.

D'autres activités moins importantes viennent se greffer à l'agriculture et tentent de se forger une place dans le schéma économique local. Il s'agit du tourisme, du commerce et de l'artisanat.

#### II. CLIMATOLOGIE

La pluviométrie, généralement faible, est marquée par une forte irrégularité interannuelle, ce qui souligne l'appartenance au climat saharien. On a observé que l'année 2008-2009 a été la plus humide avec 204 mm, alors que les deux années hydrologique 1983-84/2000-01 étaient les plus sèches avec seulement successivement 1,1 mm et 2 mm (figure 2).

Les températures hivernales descendent généralement au-dessous de 0 °C (-2 °C à -7 °C). Les températures estivales dépassent rarement 45 °C (le mois le plus froid étant le mois de janvier et le mois le plus chaud étant le mois de juillet).

Les vents sont très fréquents, fort, violents surtout en saison estivale et ils sont généralement caractérisé par le chergui : la vitesse de ces vents peut attendre 120 km/heure, engendrant des tempêtes de sable, ce qui accentue le phénomène de l'ensablement et la désertification dans la zone [3].

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

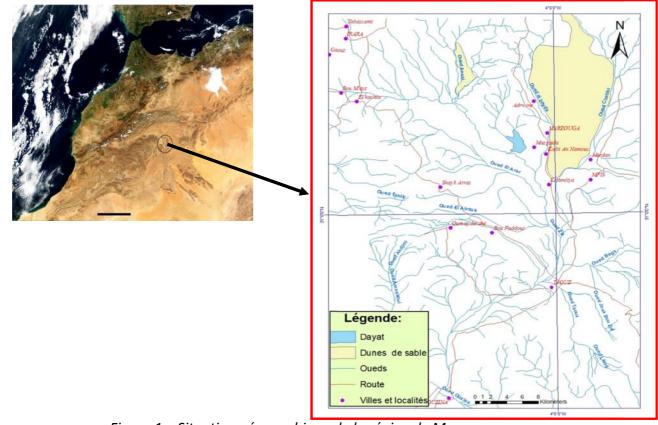


Figure 1 – Situation géographique de la région de Merzouga

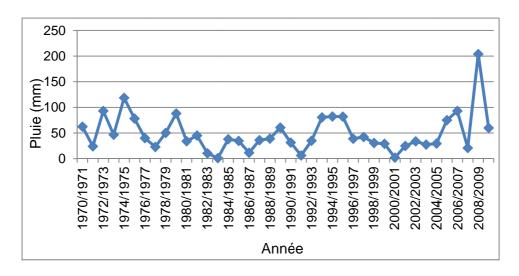


Figure 2 – Pluies moyennes interannuelles enregistrées à Taouz

### III. RESSOURCES EN EAU DE SURFACE

### III.1 Contexte hydrologique

Au lit étroit et bien individualisé du Ziz au Tafilalet, fait place un chevelu de lits plus ou moins fonctionnels et mal fixés, où les diffluences sont nombreuses (figure 3). Dans la partie amont en particulier, il s'agit d'un véritable delta intérieur dont les branches les plus vivantes sont celles qui se jettent dans les dayas de Merzouga [4].

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

La zone de Merzouga est parcourue par l'oued Ziz. A cet oued s'ajoutent principalement les oueds El Bagaâ, Hassi Labyed. Bien que les crues du Ziz et de son affluent l'oued Amerbouh ne fassent l'objet d'aucun épandage artificiel, les caractères du réseau hydrographique montrent que ces eaux donnent lieu à une infiltration appréciable.

La région de Merzouga renferme un lac nommé Serij ou daya Tamazguidat. Ce lac se trouve entre l'oued Ziz à son exutoire et l'Ouest du centre de Merzouga.

Le lac Serij situé à coté du site touristique Merzouga, en plus du climat saharien et la présence des dunes de sable offre à ce lac un paysage particulier, notamment pendant les saisons hiver-printemps. Le tableau 1 récapitule les caractéristiques du bassin de l'oued Ziz dans la région de Merzouga.

Oued	Oued Ziz et ses affluents Mta, Ouzina,Beida Taouz, Ejdid, Begaa, Mareh et Chebi		
Potentiel Pluviométrique (Mm³/an)	611		
Longueur des écoulements (Km)	365		
Facteur de compacité	10,42		
Altitude moyenne (m)	1247		
Pente moyenne	5,48		

Tableau 1 – Principales caractéristiques du bassin versant de l'oued Ziz

#### III.2 Problématique des ressources en eau de surface

Par sa position géographique caractérisée par une topographie basse au pied des dunes et à l'embouchure du bassin versant de l'oued El Beida, le centre de Merzouga est vulnérable aux inondations générées par cet oued. L'oued El Beida draine un bassin versant de 106km2. Il prend naissance à l'amont des dunes de Merzouga et les longe coté Ouest sur une distance de 28 km jusqu'au centre de Merzouga où il débouche sur une large Merja. Le long de son parcours sur ses deux rives ont été bâtis plusieurs auberges. Du coté Est des dunes, le bassin de l'oued Beida est limité par l'oued Tisserdmine qui draine un bassin de 1160 km2.

Les inondations qu'a connues la région de Merzouga le 26/05/2006 étaient la conséquence d'un événement pluvieux caractérisé par une pluviométrie intense concentrée principalement sur les bassins des oueds El Beida et Tisserdmine, avec 112 mm en trois heures (figure 4). Cette lame d'eau représentait le double de la pluie moyenne annuelle à Taouz. Ces pluies ont généré de fortes crues dont les débits de pointes étaient de 260 à 300 m3/s par section sur l'oued El Beida et 700 m3/s à 800 m3/s par section sur l'oued Tisserdmine.

La daya Merzouga associé à une digue construite en maçonnerie constitue alors une retenue de moins de deux millions de m3 en année très humide, c'est le cas notamment au cours de l'année

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

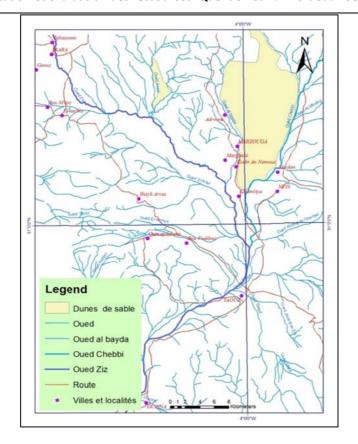


Figure 3 – Réseau hydrographique de la région de Merzouga

2008-2009. Par contre ce lac est complètement asséché au cours 1980-1986. L'eau du lac est utilisée pour l'irrigation de la région de Merzouga – Khemlia.

La fonction hydrogéologique de la daya n'a pas pu être bien définie. Il est possible qu'elle entraîne une certaine infiltration mais l'évaporation doit être la principale issue de leurs eaux, comme en témoignent les dépôts salins visibles sur les rives et la salinité de l'eau relativement élevée (près d'un gramme par litre) pour des eaux de crues du Ziz.

### IV. RESULTATS DES PROSPECTIONS DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

### IV.1 Apport des travaux de forages d'eau

La région de Merzouga a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche d'eau souterraine et ce par biais de nombreux forages. Le but était de chercher des ouvrages de bonne productivité essentiellement pour l'alimentation en eau potable rurale et pour des fins d'irrigation et aussi un but très important est celui de connaître la lithologie du réservoir aquifère. Au moment de l'exécution des travaux de forages, certains ouvrages ont fait l'objet des essais de pompage, afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques (transmissivités et coefficients d'emmagasinement) et le débit qui sera exploité.



Figure 4 – Photo montrant Impact des inondations sur l'infrastructure

Près de 33 forages d'eau ont été réalisés dans la zone d'étude, ils se concentrent essentiellement dans la partie Nord de Merzouga en particulier dans la zone d'Irara et dans la partie sud aux environs de Taouz. La profondeur totale varie de 6m à 127 m.

Les premiers forages réalisés remontent aux années 1960. Le nombre total réalisé jusqu'aux années 80 était de près de 10. L'évolution la plus rapide est constatée depuis les années 80. Au cours de cette période marquée par une sécheresse généralisée dans le Sud du Maroc, les gens se sont mis à creuser davantage les forages, et le nombre est devenu actuellement plus élevé et se situe autour d'une trentaine de forages. Le niveau d'eau par rapport au sol observé dans les forages d'eau est compris entre 2 m et 70 m (figure 5).

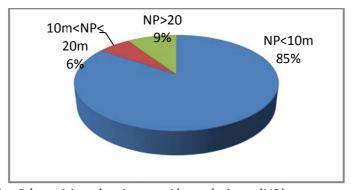


Figure 5 – Répartition du niveau piézométrique (NP) par rapport au sol

On constate que près de 85% de l'ensemble des forages d'eau réalisés dans la région de Merzouga montrent un niveau d'eau par rapport au sol inférieur à 10 m et se concentrent dans la zone d'Irara, alors que 6% ont un niveau d'eau compris entre 10 m et 20 m et 9% des forages ont un niveau d'eau supérieur à 20 m, qui se concentrent dans la partie sud aux environ de Taouz.

La salinité des eaux mesurée dans les forages d'eau inventoriés dans la région de Merzouga varie de quelques grammes par litres à près de 10 g/l voir parfois plus de 10 g/l.

#### IV.2 Khettaras: des ressources en eau incontestables dans la région de Merzouga

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Près de 7 (sept) khettaras sont inventoriées dans la région de Merzouga [5]; elles se concentrent essentiellement au niveau de la zone d'Erg Chebbi. Ces Khettaras permettent de livrer des eaux en continu à des fins agricoles et à l'alimentation en eau domestique Le débit total est de près de 15 l/s. La superficie totale irriguée est d'environ 36 ha.

#### V. HYDROGEOLOGIE ET RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

La région de Merzouga révèle des réservoirs aquifères potentiels dont l'importance est à vocation locale. Au Nord-Ouest de la zone d'étude, la nappe quaternaire du Tafilalet dont sa partie la plus méridionale, constitue une ressource en eau dont l'utilisation est à usage agricole et alimentation en eau potable des populations rurales.

D'autres nappes se situent dans la région de Merzouga, en particulier la nappe alluviale de l'oued Ziz entre Merzouga et Khemlia et la nappe de Erg Chebbi.

### V.1 Nappe quaternaire du Tafilalet

La nappe quaternaire du Tafilalet est renfermée dans un réservoir aquifère constitué essentiellement par des conglomérats comportant quelques niveaux lenticulaires d'alluvions graveleuses, des sables et limons [6] et [7]. La profondeur de l'eau n'excède pas les 10 m. La perméabilité moyenne est d'environ 1 10-3 m/s, mais peut varier amplement en fonction de l'hétérogénéité lithologique du Quaternaire. La transmissivité varie de 1 à 2 10-3 m2/s.

La piézométrie de la nappe quaternaire de Tafilalet est caractérisée par des variations importantes en rapport avec l'état de recharge et de décharge des nappes, en particulier lors des périodes de sécheresse.

### V.2 Nappe de l'Erg Chebbi

L'Erg Chebbi contient une nappe phréatique « suspendue » par rapport aux nappes des vallées voisines du Ziz [6] qui se manifeste par de nombreux puits (une vingtaine) disséminés sur toute sa périphérie (plus quelques uns dans l'erg même), ainsi que par une frange continue de végétation et de palmiers.

L'eau des puits inventoriés n'est pas profonde (1 à 5 m) et elle est remarquablement douce (350 mg/l de résidu sec). La nappe de l'Erg est alimentée essentiellement par les pluies (10 à 160 mm/an à Taouz avec une moyenne de 65 mm/an). Le coefficient d'infiltration peut être assez élevé lors des pluies intenses qui constituent une part notable du total des précipitations.

Un apport secondaire, intéressant la partie méridionale de l'Erg provient peut être d'infiltration de la daya de Merzouga qui, en année humide, baigne pendant plusieurs mois le pied de l'Erg.

#### V.3 Nappe de la basse vallée du Ziz

La basse vallée du Ziz présente des caractères qui annoncent un régime saharien. La proximité de l'Erg Chebbi et la daya de Merzouga en sont les traits les plus caractéristiques.

La basse vallée du Ziz est presque complètement indépendante de la plaine du Tafilalt sur le plan hydrogéologique [4] et [6]. On signale le débit négligeable qui doit s'écouler par le foum creusé dans les schistes viséens au SE de la plaine où confluent le Ziz et l'Amerbouh. De ce point au confluent du Ziz avec le Rhériss à Hassi-Remlia, la largeur de la plaine alluviale varie entre 1 et 5 km et un seul resserrement de la vallée existe à 7 km en aval de Taouz. Par contre la vallée est plus large dans la région de Merzouga - Khemlia (4 à 5 km).

La profondeur de l'eau y varie de 8 à 12 m. Bien que les crues du Ziz ne fassent l'objet d'aucun épandage artificiel, les caractères du réseau hydrographique montrent que ces eaux donnent lieu à une infiltration appréciable.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Il est en tout cas remarquable que la concentration de l'eau de la nappe soit partout, dans la vallée, nettement inférieure à celle des eaux du Tafilalt (1 à 4 g/l de résidu sec), ce qui implique une alimentation locale de la nappe par les eaux du Ziz et souligne combien la pratique de l'épandage en palmeraie est déterminante pour la concentration des eaux souterraines.

La zone de Talrhemt a fait l'objet d'études et de travaux de reconnaissance pour l'alimentation de la mine de Mfis ; le sous-écoulement est peu puissant (1 à 5 m d'alluvions aquifères) et de faible largeur. Son débit est évalué entre 5 et 10 l/s, tandis que le résidu sec de l'eau varie de 0,5 à 4 g/l, l'eau se chargeant surtout en sulfates en amont de l'Erg-Chebbi ; en aval par contre l'eau s'adoucit par des apports de la nappe de l'Erg à Khemlia, avant la confluence avec le Ziz. Erg-Chebbi.

### VI. CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES EN EAU DE LA REGION DE MERZOUGA

A l'issue de ces données, une carte de synthèse est élaborée et regroupe tous les éléments de l'hydrogéologie et des ressources en eau de la région de Merzouga (voir figure 6). Il s'agit d'une carte des systèmes aquifères ainsi définis de Merzouga. Cette carte nous a permis donc de situer toutes les nappes aquifères y compris le réseau hydrographique, les forages d'eau et les khettaras.

La carte des systèmes aquifères de Merzouga ainsi élaborée servira d'un guide destiné pour les décideurs, les chercheurs et le public pour mieux connaître les ressources en eau dont dispose la région de Merzouga.

### VII. RECAPITULATIF DES CONTRAINTES DE DEVELOPPEMENT DE LA REGION DE MERZOUGA

La collecte et l'analyse des données a permis de ressortir les contraintes au développement de la région de Merzouga. Ces contraintes se traduisent d'une manière générale par :

- un environnement naturel fragile et sujet à de multiples risques de dégradation (cas de la zone de la daya, centre Merzouga, localité de Hassi Labyed);
- des conditions de vie des populations très difficiles ;
- et un patrimoine local dégradé et non valorisé.

Le développement de la région de Merzouga ne peut se faire si des réponses efficaces ne sont pas trouvées pour lever ou réduire l'impact de ces contraintes. Ainsi, les orientations stratégiques pour le développement se focaliseront sur des axes concernant essentiellement l'environnement naturel, les conditions socio-économiques et le patrimoine local.

Dans le cadre de cette étude, les contraintes de développement dégagées sont celles relatives à l'eau et l'environnement; il s'agit notamment des inondations, les décharges sauvages et la désertification.

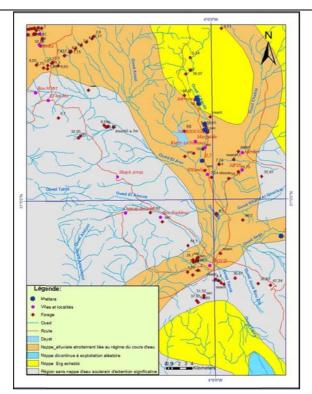


Figure 6 – Carte des systèmes aquifères de la région de Merzouga

### Références bibliographiques :

- [1] DRH-GRZ, 2007 Débat national sur l'eau : l'avenir de l'eau, l'affaire de tous.
- [2] ORMVA du Tafilalet, 2006 Monographie des CMV de la zone d'action de l'ORMVA du Tafilalet.
- [3] DRH-GRZ, 1989 Hydrogéologie des bassins de Guir, Rhéris et Ziz, Note de synthèse.
- [4] DRPE, 1986 Etude hydrogéologique des inféro-flux sud-atlasiques du Ziz et du Guir : nappes du Tafilalet ; synthèse complémentaire. Tome 1.
- [5] ORMVA du Tafilalet, 2005 Projet de développement des communautés rurales à travers la réhabilitation des khettaras dans les régions semi-arides de l'Est sud-atlasique au Royaume du Maroc. Rapport annexe (projet IICA).
- [6] Margat J., 1962 Mémoire explicatif de la carte hydrogéologique au 1/50000 de la plaine du Tafilalet. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 150 bis*.
- [7] Ruhard J.P., 1977 Le bassin quaternaire du Tafilalet. Tome des ressources en eau du Maroc, Tome 3. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

### Mode de recharge du système aquifère des sources de l'Oasis de Figuig, Haut Atlas oriental (Maroc)

M. Amar, M. Boualoul (1), M. Hilali (2) et A. Jilali (3)

- (1) Département de géologie faculté des sciences, Université de Moulay Ismail Meknès ; e-mail: mounir.amar@gmail.com; boualoul@yahoo.fr
- (2) Département de géologie Faculté des sciences et techniques d'Errachidia, Université Moulay Ismail ; e-mail : hilali2@hotmail.com
- (3) Département de géologie faculté des sciences, Université de Mohamed Premier; e-mail : hakim065@hotmail.fr

#### I. INTRODUCTION

L'Oasis de Figuig est situé à l'extrémité SE du Haut Atlas oriental marocain. L'Oasis de Figuig est caractérisé par un climat aride, un hiver froid (2°C), un été chaud (45°C) et des faibles précipitations de l'ordre de 140 mm/an. Dans ces conditions extrêmes, et depuis des siècles, des ressources en eau de base jaillissent et maintiennent en vie la palmeraie de l'Oasis avec un débit total quasi constant de 180 l/s (A.B.H.M 2004). Ces ressources en eau d'origine certainement profonde font partie d'un système aquifère étendu d'âge essentiellement jurassique.

Le Haut Atlas oriental s'étend sur une surface d'environ 9 000 km² dont seulement un tiers est occupé, en affleurement, par les formations du Jurassique inférieur, et le reste par le substratum paléozoïque de la plaine de Tamlelt couvert par le Quaternaire. Il est caractérisé par une hétérogénéité morphologique, géologique et structurale qui conditionnent la circulation des eaux de surface et souterraines. Pour les eaux de surface, on distingue deux principaux bassins hydrologiques : le bassin hydrologique de Zousfana et le bassin hydrologique d'Ain Chaïr. Quant aux eaux souterraines, le système hydrogéologique du Haut Atlas oriental est constitué par des réservoirs qui sont en interconnexion par des failles.

#### II. Analyse pluviométrique

Les stations climatiques les plus proches qui permettent plus ou moins d'encadrer la zone d'étude sont : la station de Figuig placée à une altitude de 871 m NGM (X= 894.000 m; Y= 175.600 m) et la station de Bouarfa située à 85 km au NW de Figuig à une altitude de 1200 m NGM (X=822.600 m; Y=221.000 m).

Dans la station climatique de Figuig la moyenne des précipitations annuelles est de 122 mm. Au tour de cette moyenne la courbe de tendance à long terme montre deux oscillations d'une période de durée approximative d'environ de 30 ans. La première s'étend de 1945 à 1975, elle correspond à une période plus humide durant laquelle s'est enregistrée la plus haute valeur de précipitation en 1965 (277 mm). La deuxième oscillation qui s'étend de 1976 à 2006, caractérise une période sèche avec de faibles précipitations, la plus basse valeur est enregistrée en 1984 (40 mm) (Figure 1).

La moyenne des précipitations annuelles dans la station climatique de Bouarfa est de 167 mm. La courbe de tendance à long terme montre aussi deux oscillations d'une période de même durée approximative que celle enregistrée dans la station climatique de Figuig (30 ans). La première oscillation s'étend de 1936 à 1966, caractérisant une période plus humide durant laquelle est enregistré un maximum de précipitations de 393 mm en 1941.

La deuxième oscillation s'étend de 1978 à 2008, c'est une période sèche caractérisée par peu de précipitations, le minimum des hauteurs des précipitations est enregistré en 1983 avec 41 mm. A la différence de la station climatique de Figuig, la station climatique de Bouarfa a connu une période stationnaire entre les deux oscillations, d'une durée de 18 ans (Figure 2). Les courbes de tendance des deux stations montrent une période de durée approximative d'environ de 30 ans.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

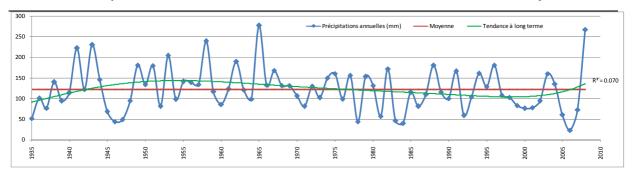


Figure 1 : Station climatique de Figuig

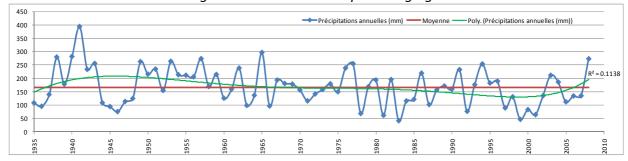


Figure 2 : Station climatique de Bouarfa

#### II.2 Analyse hydrologique

Le réseau hydrographique du Haut Atlas oriental est temporaire et il montre une ramification très développée.

Le réseau hydrographique régénéré à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) du bassin d'Ain Chaïr montre un sens d'écoulement rotationnel. Celui du bassin de Zousfana est moins développé, que le premier, et il montre un sens d'écoulement plus ou moins rectiligne (Figure 3).

Sachant que le bassin versant est l'unité de gestion du territoire pertinente d'un point de vue hydrologique, écologique et géomorphologique (Chorley 1969 ; in Chaponniere 2005).

On a régénéré, à l'aide d'un logiciel de SIG et en faisant appel au modèle numérique de terrain (MNT), les bassins versants qui se chevauchent avec la zone du Haut Atlas oriental avec le réseau hydrographique. Par ailleurs, on a calculé les paramètres physiographiques de ces bassins (Tableau 1).

Dans le Haut Atlas oriental se distingue deux principaux bassins hydrologiques qui se convergent topographiquement l'un vers l'exutoire d'Ain Chaïr (altitude : 950 m) et l'autre vers l'exutoire de Zousfana (altitude : 814 m). Oued Zousfana traverse la frontière algéro-marocaine par le col de Jbel Sidi Youssef et Jbel Taghla. Entre ces deux monts se situe le point le plus bas du Haut Atlas oriental (814 m). Le bassin hydrologique de Zousfana est de forme ovale orienté NNE-SSW avec une base un peu plus large, et il s'étend sur une superficie de 3006 km². Le bassin d'Ain Chaïr sur l'Oued El Jdid (sud Ain Chaïr) est de forme rectangulaire et il s'étend sur toute la plaine de Tamlelt sur une surface de 5596 km² (Figure 3), son exutoire mis en évidence par la méthode de SIG corrobore avec la remarque fait par Du Dresnay en 1966 : « le seul exutoire du Tamlelt actuellement visible est formé par la source de Ain Chaïr ».

Entre les deux bassins hydrologiques on enregistre une différence d'altitude moyenne d'environ 30 m, le bassin d'Ain Chaïr est le plus élevé. La longueur du plus long talweg de ce dernier est de 184 km, soit deux fois celle du bassin l'Oued Zousfana. Concernant la pente moyenne, le bassin d'Ain Chaïr montre une pente plus douce, 1% (Tableau 1).

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Bassin versant	Surface (m²)	Périmètre (m)	Longueur du plus long thalweg (m)	Altitude moyenne (m)	Pente moyenne (%)
Ain Châir	5596562837	478138	184750	1288.25	1.089
Oued Zousfana	3006928974	329878	93348	1257.26	2.472

Tableau 1 : Caractéristiques des bassins versants

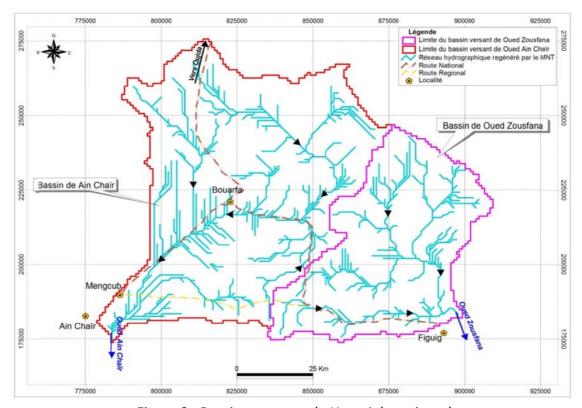


Figure 3: Bassins versants du Haut Atlas oriental

#### III. Analyse géomorphologique et géologique

Le Haut Atlas oriental prend la direction E-O, et il est échancré d'une vaste dépression aplanie à substratum paléozoïque, le seul de son genre le long des chaînons atlasiques. Cette dépression se trouve plus bas, non seulement du chaînon Est et Ouest, mais également des Hauts Plateaux constituant son avant pays et qui sont à une altitude qui s'échelonne entre 1300-1500 m. L'altitude moyenne de cette dépression est de l'ordre de 1100 m, elle constitue l'ossature autour de laquelle les reliefs du Haut Atlas sont déformés d'une manière étonnante.

La chaîne du Haut Atlas oriental à l'E de Tamlelt est marquée par deux principaux affleurements qui encadrent la dépression de Tisserfine. Cette dépression est orientée W-E, elle est en forme d'un entonnoir qui s'ouvre vers l'Est et s'ennoie sous l'Affleurement de J.Haitama.

Au Sud de J.Haïmeur, la palmeraie de Figuig est située à une altitude qui, en présence d'un spectaculaire escarpement, varie entre 814 m et 905 m. Ces valeurs d'altitude sont les plus basses à l'échelle du Haut Atlas Oriental.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

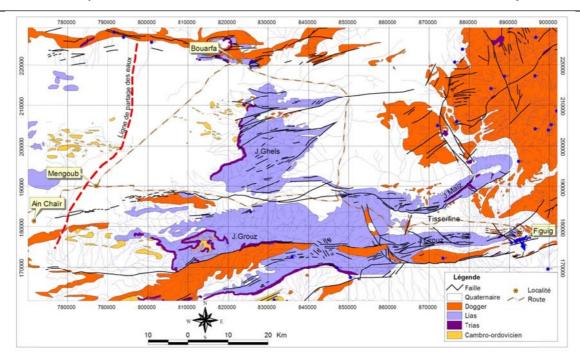


Figure 4 : Géologie du Haut Atlas oriental

Le bassin mésozoïque du Haut Atlas oriental est formé essentiellement de dépôts jurassiques. Ces dépôts se décollent au niveau des argiles du Permo-trias, elles moulent et s'adaptent au socle du Paléozoïque. Ce décollement est la conséquence d'un serrage crustal responsable du rétrécissement du bassin du Jurassique. Ce serrage a réactivé les failles du substratum qui affectent le contenu du bassin jurassique. De ce fait la déformation se traduit dans la couverture du Jurassique par la formation des plis associés aux failles héritées depuis l'orogenèse hercynienne voir même panafricaine (exemple du J.Grouz et J.Maïz).

Sur le plan structural de toute la chaine du Haut Atlas oriental se distinguent les plissements de direction E-W. L'Antar, le Grouz, le Maïz, les crêtes qui bordent au sud l'Oasis de Figuig, ont tous le même caractère commun. Ce sont des plis déversés vers le Sud, à presque couchés (Gautier 1916).

La plaine de Tamlelt est subdivisée par Houari (2003) en deux principaux domaines séparés par le fossé de Tamlelt: Le domaine Nord limité par l'Accident Nord Atlasique (ANA) au nord et affecté durant la phase bretonne par deux phases de déformation N-S repris orthogonalement par une troisième phase de déformation ENE-WSW, et le domaine centro-méridional limité au sud par l'Accident Sud Atlasique (ASA) et affecté essentiellement par la déformation ENE-WSW pendant la phase tardi-hercynienne. Ce domaine est structuré en cinq unités séparées par des accidents transcurrents E-W. Ces accidents se regroupent parfois en faisceau de failles délimitant des couloirs de cisaillements subéquatoriaux. Ces accidents affectent évidemment la couverture mésozoïque durant la tectonique atlasique. Cependant, leur relations nettes avec les marqueurs de déformation hercynienne permet de les considérer comme des accidents au moins hercyniens qui ont rejoué ultérieurement.

Des stations clés ont permis de réaliser des mesures structurales, dresser des logs stratigraphiques et faire des coupes géologiques.

#### IV. Analyse hydrogéologique

Les sources (30 sources) de l'Oasis de Figuig, ont été soigneusement aménagées par des citoyens en khettaras. Les khettaras de Figuig sont des galeries souterraines qui ont été développées dans les calcaires du Jurassique.

L'évolution des débits de ces khettaras montre une stabilité le long des siècles, en exemple on présente dans la Figure 5 l'évolution de débit de la source de Maghni Ouled Sliman (bras droite (BD) et bras gauche (BG)). Quant à la source de Zadert on observe une légère baisse due principalement à l'augmentation de pompage sur le plateau du Jorf de l'Oasis de Figuig.

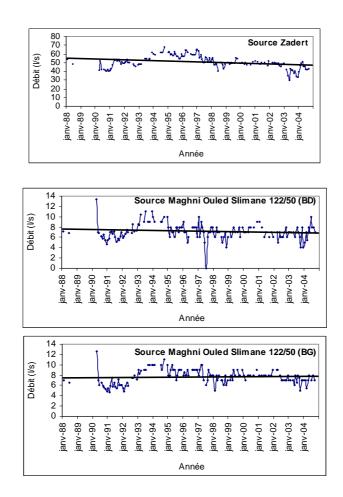


Figure 5 : Evolution des débits des plus importantes sources de Figuig (ABHM 2004)
L'étude hydrogéologique du Haut Atlas oriental permet de distinguer quatre type de réservoirs potentiels, réservoirs à la base du Cambrien, réservoirs schisto-gréseux et gréso-quartzitiques de l'Ordovicien, réservoirs calcareux du Jurassique et les réservoirs alluvionnaires du Quaternaire. Les réservoirs jurassiques sont les plus importants dans la région.

La carte piézométrique la plus récente a été établie en décembre 2004 par l'A.B.H.M.; elle montre, dans l'ensemble, un écoulement de l'Ouest vers l'Est et du NNW vers le SSE. La comparaison des niveaux piézométriques de quelques forages profonds à l'échelle du Haut Atlas oriental montre la dominance des sens d'écoulement N-S, NW-SE et W-E (Amar & al 2012).

#### V. Conclusion

La recharge dans toutes les nappes du Quaternaire se fait essentiellement par infiltration directe et par l'alimentation latérale dans la palmeraie de Figuig et El Arja. Quant à l'aquifère du Dogger, qui est compartimenté, l'infiltration efficace pourrait-être le seul mode de sa recharge.

La recharge de l'aquifère liasique s'effectue par infiltration directe à travers les joints, les fractures, les accidents affectant sa partie dénoyée et toutes ses structures karstiques (gouffres dolines et avens) affectant les affleurements de J.Ghels, J.Grouz et J.Maïz (1503 m²). Comme il s'alimente

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

latéralement grâce à l'escarpement et aux couloirs d'accidents de la plaine de Tamlelt favorisant son interconnexion aux aquifères du quaternaire et du paléozoïque de cette plaine.

L'aquifère paléozoïque est d'une structure géométrique indéterminée dont on ignore les limites, il peut se charger partiellement par infiltration dans la plaine de Tamlelt, sachant que le réseau hydrographique montre plusieurs zones d'infiltration principalement dans la partie sud de la plaine de Tamlelt, ce qui favorise la recharge de la nappe du Quaternaire et de la nappe multicouche du Paléozoïque.

#### Références bibliographiques :

- [1] Amar.M, Manar.A et Boualoul.M (2012) Apport de la cartographie aéromagnétique à l'identification structurale du système aquifère des sources de l'oasis de Figuig, Maroc; Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 2012, n° 34, p. 29-40.
- [2] Du Dresnay.R. 1966; La géomorphologie du Haut Atlas oriental (Maroc), Compte Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences; 158 p.
- [3] Gautier.E.F.1916; Le Chot Tigri, Annales de géographie, Volume 25, Numéro 135, 181 189.
- [4] Houari.M.R.2003 ; Etude de la boutonnière paléozoïque de Tamlelt (Haut Atlas oriental) : sa place dans la chaîne hercynienne du Maroc. Thèse. Fac.Sc. Univ. Mohammed Premier Oujda.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Hydrogéochimie et qualité des eaux dans les Bassins subdésertiques Marocains Ziz et Rhéris

I. Kacimi<sup>a</sup>, T. Bahaj<sup>a</sup>, M. Hilali<sup>b</sup> et N.Kassou<sup>a</sup>

a.Université Mohammed V Agdal, Faculté des Sciences

b.Université Moulay Ismail Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia iliaskacimi@yahoo.fr

Le but de ce travail est de caractériser la géochimie des eaux de deux bassins Ziz et Rhéris, déterminer l'extension de leurs différents aquifères et les liens possiblesentre cesderniers et enfin évaluer la qualité des eaux au niveau des deux grands bassins hydrologiques de la région de Tafilalet.

#### I. GEOGRAPHIE DES BASSINS DU ZIZ ET RHERIS :

Les bassins du Ziz et du Rhéris(Figure 1) sont dominés par les hauts reliefs de l'Atlas, leur étendue est de près de 27 500 km². Le climat est en majorité aride à saharien. La distribution spatiale de la pluviométrie dans ce bassin est surtout liée à l'altitude, à l'exposition et à certaines caractéristiques physiographiques des bassins versants [1]. La pluviométrie moyenne annuelle atteint 250 mm aux sommets des montagnes, 100 à 150 mm/an dans les zones centrales des bassins notamment dans le bassin d'Errachidia et ne dépasse pasles 50 mm/an dans les zones les plus au sud.Le réseau hydrographique est riche en vallées importantes mais à faible développement de cours d'eau pérennes. Les oueds Ziz et Rhérisse présentent comme les plus importants cours d'eau des deux bassins, ils présentent un régime hydrologique à tendance saharienne.

La zone est caractérisée par une faible densité de la population (près de 10 habitants/km²), ceci est dû au caractère semi-désertique de la région d'étude où les populations sont groupées dans les vallées et les oasis. La végétation est très rare à l'exception des palmeraies localisées autour des points d'eau et celles qui longent des cours d'eau principaux, sous forme d'oasis étroites (à l'exception de la palmeraie du Tafilalet).

Le secteur agricole constitue la principale source de revenu et fait travailler la majeure partie de la population active, occupant ainsi le premier rang en ce qui concerne le développement de l'économie locale.

L'agriculture est dominée par la micropropriété. Les cultures céréalières, maraîchères et fourragères sont un appoint précieux dans une région où l'arboriculture est prédominante (principalement le palmier-dattier accompagné d'oliviers et d'arbres fruitiers).

Les oasis constituent un milieu spécifique dont l'équilibre esttoujours fragileà cause desgrandes variations des volumes des ressources en eau de la zone d'étude. Ces oasis sont irriguées par les eaux des sources, des khettaras, des oueds, auxquelles s'ajoutent les lâchers de barrage pour le cas de la vallée du Ziz et du Tafilalet.

#### II. GEOLOGIE DES BASSINS DU ZIZ ET RHERIS :

La zone d'étude s'étend depuis le Haut-Atlas au Nord jusqu'à l'Anti-Atlas au Sud. Sa partie centrale contient le sillon pré-africain, l'avant fosse située entre le Haut-Atlas et l'Anti-Atlas et renferme le bassin crétacé d'Errachidia. Les formations qui affleurent largement sont d'âge Crétacé; elles surmontent par endroit les terrains jurassiques oùelles sont discordantes sur le socle paléozoïque.

Dans le massif anti-atlasique, prédominent les formations précambriennes, qui ont été couvertes postérieurement de couches sédimentaires légèrement plissées au cours des phases hercyniennes.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Le bouclier précambrien a joué le rôle de massif rigide sur lequel se sont déposées successivement les couches infracambriennes et primaires.

Le Primaire, à base de schistes, quartzites et roches intrusives, apparaît localement en zones réduites à la faveur d'anticlinaux faillés ou sous forme de boutonnières.

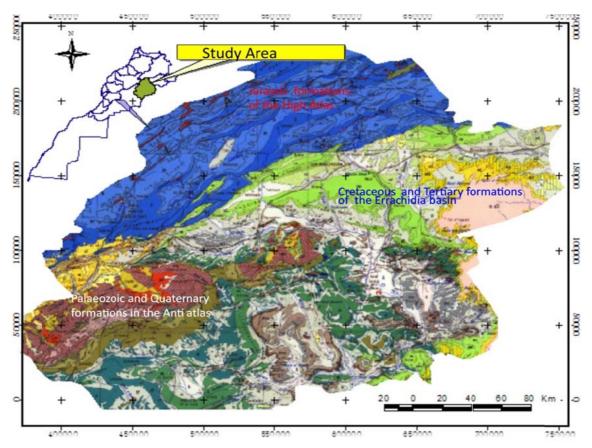


Figure 1 : Cadre géographique et géologique de la région d'étude

Il affleure plus au Sud à Erfoud, dans le bassin du Tafilalet. Ces formations, qui représentent toute la série du Cambrien au Carbonifère, sont essentiellement détritiques et correspondent à des grès roses, des grès quartzitiques, des conglomérats très consolidés et des schistes.

Dans la Haut-Atlas calcaire (bassins du Ziz et du Rhéris), le Trias comprenant des basaltes doléritiques, des marnes et argiles à niveaux salifères joue un rôle important comme substratum imperméable de la série jurassique et est à l'origine de la plupart des eaux salifères de la région.

Le Jurassique constitue la quasi-totalité du Haut-Atlas et affleure sur la bordure nord du bassin d'Errachidia. Le Lias inférieur calcaréodolomitique est perméable en grande partie et constitue le niveau présentant la plus grande continuité ; il donne à la chaîne atlasique (Haut-Atlas), l'originalité de ses formes structurales en arêtes redressées de calcaires dolomitiques massifs [2] et [3].

L'affleurement du Toarcien est formé principalement de marnes vertes avec des interlitsmarnocalcaires. L'Aalénien calcaro-dolomitique à la base, devient de plus en plus marneux vers le haut. Le Bajocien est essentiellement marneux et argileux avec des intercalations calcaires.Le Bathonien

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai − 2 juin 2013

commence par de gros bancs de calcaire dolomitique appelé « calcaire corniche » (Bajocien-Bathonien).

Au cours du Crétacé, la transgression domine l'actuel sillon sud atlasique et arrive au Tafilalet. La sédimentation présente des variations importantes d'épaisseur et de faciès. Le Crétacé offre une série à trois termes à savoir les grès et marnes rouges du Crétacé inférieur, les marnes du Cénomanien et les calcaires du Turonien et s'achève par des formations continentales rouges du Crétacé supérieur.

Le Quaternaire présente une grande hétérogénéité lithologique; les dépôts sont constitués principalement de conglomérats, graviers, galets, limons, d'éléments fluvio-lacustres et gréseux, parfois marneux. Leur épaisseur ne dépasse pas 50 m. Le substratum des dépôts quaternaires varie énormément dans l'espace; il est constitué par :

- des formations primaires dans les régions de Tinjdad, de Tafilalt, de Todgha, de Ferkla...;
- des niveaux crétacés dans les régions de Goulmima et de la vallée du Ziz ;
- des horizons jurassiques dans les régions du Rich (Haut Atlas du bassin du Ziz).

#### III. LES EAUX SOUTERRAINES

Les eaux souterraines dans la province d'Errachidia jouent un rôle primordial dans la satisfaction des besoins en eau. Ces ressources sont constituées d'une part de nappes phréatiques situées le long des vallées et caractérisées par leur faible étendue et leur dépendance directe des aléas climatiques et d'autre part, de nappes profondes qui sont subdivisées du nord au sud en trois unités hydrogéologiques bien individualisées: Le haut Atlas, le bassin crétacé deBoudnib- Errachidia- Tinghir et l'Anti-Atlas (figure 2). [4]

#### a. Les nappes phréatiques

Cette unité recèle une douzaine de nappes. La persistance du déficit pluviométrique cumulé depuis les cinq dernières années, conjugué avec l'exploitation intensive desressources en eau les plus accessibles, a été à l'origine d'une baisse généralisée du niveau piézométrique de la plupart des nappes phréatiques de la province. Cette baissevarie de 4 à 5 m et peut atteindre 8 à 10 m dans les nappes d'Errachidia et Tinjdad [5].

#### b. Les nappes profondes

- Le Haut Atlas : renferme un ensemble d'unités hydrogéologiques communicantes entre elles (Lias et Dogger). Ces aquifères donnent naissance à plusieurs sources dont les plus importantes sont celles de Zaouiade Sidi Hamza, Tahamdount, Aghbalou N'kerdous et Toudgha.
- Le bassin crétacé d'Errachidiaqui s'étend entre le Haut et l'Anti Atlas et comprend des aquifères qui sont de haut en bas :
  - Nappe du Sénonien qui présente un artésianisme entre Bouânane et Boudnib, exploitée par des puits et des forages;
  - Nappe des calcaires turoniens qui donne naissance aux sources de Tifounassine, Meski et Tarda.
  - Nappe de l'Infracénomanienlocalement artésienne, elle est drainée par un complexe de Khettaras au sud de la zone de GoulmimaTinjdad. Cette nappe est peu exploitée en raison de sa salinité dans la zone avale et de sa profondeur.
  - Les nappes de l'Anti Atlas : Ces nappes sont surexploitées à partir des khettaras, des puits et des forages.

#### c. Les sources

Selon l'origine hydrogéologique, on distingue deux groupes de sources :

- Les sources émanant des formations calcaires du Turonien qui totalisent un volume annuel d'environ 14 Mm³/an.
- Les sources d'origine jurassique qui fournissent un écoulement annuel de l'ordre de 38 Mm³/an. Ces sources accusent d'importantes fluctuations saisonnières et inter-annuelles.
   De fortes baisses des réserves renouvelables ont été enregistrées à cause despériodes de sécheresse successives et prolongées [6].

#### d. Les Khettaras

Le nombre total des Khettaras est de 570 dont seulement 300 sont actuellement en exploitation. La superficie dominée par les khetaras est d'environ 16.000 ha avec une longueur totale du réseau atteignant 2900 Km. Le débit moyen exploité est de l'ordre de 700 l/s sur l'ensemble des khettaras.

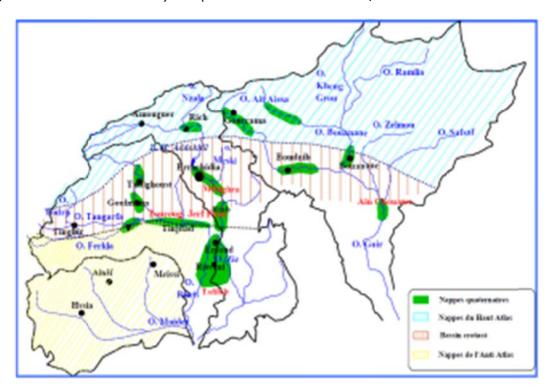


Figure 2 : principale unités hydrogéologique dans la région d'étude

#### IV. HYDROGEOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES DES BASSINS DU ZIZ ET RHERIS

La distribution de l'eau prélevée était aussi stratégique que possible. Différents paramètres physiques ont été mesurés lors de l'échantillonnage: pH, conductivité électrique, potentiel redox, température et alcalinité. L'analyse des éléments majeurs a été réalisée par chromatographie ionique et ICP-AES, les éléments lourds et en traces ont été analysés par ICP-AES. Pour définir les processus d'interaction eau-roches, certains résultats d'analyse ont servi pour des calculs géochimiques à l'aide de programmes informatiques spécialisés.

#### e. Familles d'eau

Les sources d'eau dans la zone d'étude ont différentes origines et évoluent dans différentes lithologies (figure 3). Les eaux des aquifères du Paléozoïque et du Jurassique (*triangles dans le diagramme de Piper*) ont un faciès bicarbonaté-calcique, ils deviennent plus riches en sulfate comme

ils se rapprochent des formations de l'Anti-Atlas, où les formations géologiques montrent une activité hydrothermale intense. Dans certaines zones, la minéralisation en barytine, galène et gypse sont aisément observables sur la surface, les sources Tismoumine et Tasblbat émergent à travers cette minéralisation. (*Cercles verts ci-dessous*). Ces eaux sont en équilibre par rapport à la calcite, aragonite et anhydrite. Les eaux de l'Infracénomanien, du Sénonaien ainsi que les aquifères quaternaires montrent un faciès mixte (*losange jaune*), à l'exception de l'Ain El Ati (*couleur rouge*). Ils sont plus riches en sulfates en raison de la lithologie du réservoir fait de marnes et d'argile. Pour les premières nappes, le réservoir quaternaire est constitué par un mélange de détritus et localement par le calcaire. Ces eaux sont en équilibre par rapport au gypse et la dolomite. Ain El Ati est un puits artésien, il coule à la surface avec un débit moyen de 15 l / s, il est caractérisé par une salinité très élevée (supérieure à 21 g / l). Les deux sources Ain El Ati et Tasblbat, montrent à leur immédiate émergence une importante néoformationminérale, essentiellement ferromagnésienne et sulfatée.

L'aquifère quaternaire contient des eaux en équilibre par rapport à la calcite, la dolomite, l'aragonite, le gypse et l'anhydrite. Ces eaux constituent les aquifères peu profonds et ils sont pour la plupart exploitées par les habitants pour boire et pour irriguer. En fait, avant la construction du barrage Hassan Addakhil, cet aquifère peu profond était la seule ressource en eau dans la région, il a été distribué par le système khettara, et utilisé en saison sèche pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau.

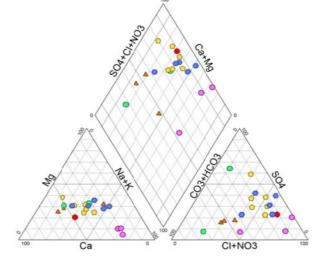


Figure 3 Diagramme de Piper montrant les différentes familles d'eau de la région d'étude

La dernière famille d'eau concerne les sources thermales de la région, elle appartient au grand système de failles de Tizi'n'First, leur température est comprise entre 40 ° C à Hammat Moulay Ali Cherif, et 30 ° C dans le Hammat Moulay Hachem et l' Agbalou N'Iarbaa. Ces eaux sont de type sodium-potassium et chlorures et elles sont aussi à l'équilibre par rapport à la calcite, la dolomite et l'aragonite.

Dans cette région, la TDS de l'eau est plus élevée que les normes recommandées pour les eaux potables établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) puisqu'elle dépasse les 4 g/l sur toute la zone d'étude (Fig.4 a et b). La lithologie des aquifères, le temps de résidence des eaux dans

le sous-sol et probablement le mélange des eaux avec les eaux thermales, peuvent être responsables de cette forte salinité.

En fait, la dissolution du  $SiO_2$  est un processus très lent, or, dans la zone d'étude, la teneur du  $SiO_2$  est comprise entre 2 et 16 g / l, ce qui pourrait indiquer un long séjour des eaux et / ou un mélange important avec des eaux thermales (Fig. 5.). Une étude complémentaire est entreprise pour prospecter l'origine de ces eaux ainsi que leurs datations.

#### a. Les métaux lourds et les oligo-éléments

Toutes les eaux analysées montrent de faibles concentrations en fer, aluminium et magnésium à l'exception de l'eau thermale de Moulay Ali Cherif, l'Ain El Ati et l'Ain Tasblbat. En effet pour ces deux dernières localités, le fer atteint des concentrations très élevées. Le potentiel d'oxydo-réduction de ces deux sources est supérieur à0,3 V, et le pH est inférieur à 6,6. Le fer pourrait éventuellement provenir de l'oxydation des minerais de fer en profondeur. Les sulfates au niveau de ces échantillons se présentent avec des concentrations très élevées atteignant pour Ain El Ati les 9,7 g / l.

Les analyses de certains oligo-éléments ont été effectuées. Leurs répartition dépend de leur emplacement, les plus chargés en métaux lourds sont les eaux collectées dans les zones montrant des traces de l'activité hydrothermale, sauf pour le plomb dont les eaux ne montrent aucune minéralisation diffuse (figure 6).

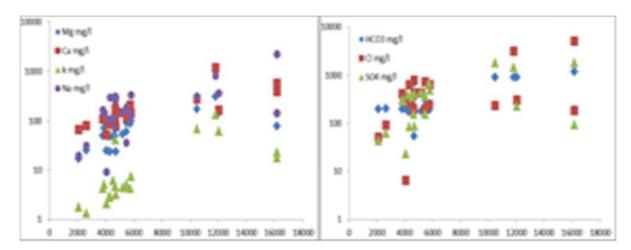


Figure 4 TDS versus les éléments majeurs anions et cations dans la région d'étude

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

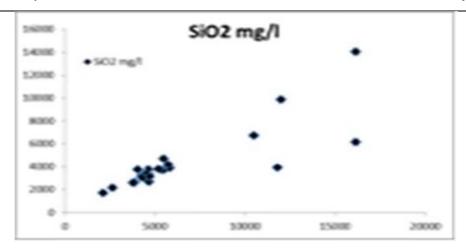


Figure 5 TDS versus SiO₂ dans la région d'étude

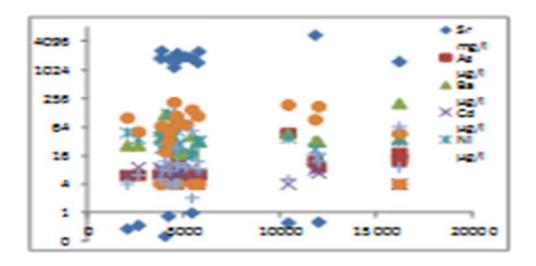


Figure 6 TDS versus certains métaux lourds et éléments en trace dans la région d'étude

#### 5. QUALITÉ DE L'EAU

La qualité inorganique de l'eau étudiée est généralement mauvaise à très mauvaise, la forte salinité naturelle de cette eau en est le principal responsable. Certains cations et anions majeurs dépassent la valeur quotidienne recommandée par l'OMS pour les eaux potables. Sauf pour les eaux thermales et l'Ain El Ati et la source Tasblbat, elles pourraient être très toxiques. La présence d'éléments lourds et en traces (Pb, Zn, Ba et As) dans cette eau contribue à leur mauvaise qualité. Aussi sa forte salinité peut contribuer à la salinisation des sols, où l'agriculture est l'unique source de revenus pour près d'un million d'habitants. Aucune contamination anthropique n'a été constatée dans la région à l'exception de deux échantillons d'eau prélevés dans l'aquifère quaternaire qui montraient des concentrations élevées en nitrates.

#### 6. CONCLUSION

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Les autorités marocaines doivent faire attention à la qualité de l'eau utilisée pour la boisson et à des fins agricoles. Elles doivent élaborer des programmes destinés à aider la population à utiliser les technologies à faible coût afin de réduire la salinité des eaux et optimiser leur exploitation. C'est le cas de Ain El Ati appartenant à l'aquifère infra cénomanien qui contient d'importants volumes d'eau non exploités en raison de leur mauvaise qualité, et qui sont inexploitées en raison de l'absence de plans de dessalement de ces eaux.

#### Références bibliographiques

- [1] DRH GRZ, 2009 : Etude de synthèse hydrogéologique du Haut Atlas faisant partie des bassins du Guir, Rhéris et Ziz (provinces Errachidia, Ouarzazate et Figuig)
- [2] DRH GRZ, 2006: Etude de synthèse hydrogéologique du bassin Crétacé d'Errachidia
- [3] MICHARD A. 1976. Eléments de géologie marocaine. Notes & Mém. Serv. Géo Mar. n°252, 408p.
- [4] Daba et Jalab, 2011 : Bassin crétacé d'Errachidia : hydrogéologie de l'aquifère turonien et élaboration d'un atlas des sources. Projet de fin d'étude, Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia.
- [5] DRH GRZ, 2007: Elaboration du bilan hydrologique des bassins de Guir, Rhéris, Ziz et Maïder
- [6] Abddelfadel F., Rachid, L., et Takhis R., 2011 : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe quaternaire de la région Maâdid-Erfoud (bassin de Tafilalet, Sud d'Errachidia). Projet de fin d'étude, Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Hydrogéochimie et qualité des eaux souterraines de la zone côtière de la plaine du Gharb (NW-MAROC)

#### N. Kassou, T.Bahaj et I.Kacimi.

Université Mohammed V Agdal Rabat, Faculté des Sciences Rabat-Agdal, Maroc.

#### Résumé:

Le présent travail s'intéresse à l'étude des caractéristiques hydrogéochimiques des eaux souterraines de la bordure côtière de la plaine du Gharb-Mamora. Cette nappe à grand potentiel hydraulique alimente plusieurs agglomérations en eau potable. La plaine du Gharb est alluvionnaire, elle a évolué durant le Quaternaire comme un bassin subsident recevant des sédiments de différentes origines dans leur majorité meubles. Les eaux souterraines circulent dans des réservoirs à matériel carbonaté détritique essentiellement sableux et argilo limoneux. La nappe circule de l'est à l'ouest (vers l'océan Atlantique). Le faciès chimique des eaux de la nappe étudiée est bicarbonato-chloruro-calcique. Les différents éléments dissous évoluent avec la TDS, d'autres éléments tels les nitrates montrent des teneurs élevées ne montrant pas de relation avec la TDS et donc ils sont issus de l'activité anthropique.

#### I- Introduction

La zone côtière de la plaine du Gharb est une étroite bande d'une vingtaine de kilomètres de large et 80 km de long. Elle s'étend parallèlement au littoral entre Rabat au sud et Larache au nord. Le secteur étudié est classé dans un contexte bioclimatique sub-humide (Kacimi, 1992) : la pluviosité annuelle varie entre 350 mm (année sèche) et 750 mm (année pluvieuse) et la température moyenne maximale annuelle est de 24°C.

La zone a connu un accroissement de la population, une intensification importante des cultures et une croissance dans la diversification des activités industrielles. De ce fait, devant les besoins croissants en eau, les eaux souterraines constituent la principale ressource en eau. Cependant les travaux antérieurs ont mis en évidence à l'échelle régionale (bassin de Sebou) une détérioration graduelle de la qualité de l'eau due principalement à l'activité socio-économique dans la région (Bahaj, 2002).

Le présent travail vise à déterminer les caractéristiques géochimiques des eaux souterraines des champs captants de la zone d'étude qui alimentent en eau potable les villes de Kénitra, Rabat et en partie Casablanca, à mettre en évidence l'impact de l'activité humaine sur ces eaux souterraines et à discuter le chimisme des eaux sur la base de la lithologie des aquifères.

Le suivi des analyses hydrochimiques effectuées par l'ONEP a montré qu'il y a une évolution de la concentration en éléments dissous au cours des vingt dernières années (Malaki et al, 2001). C'est pour cette raison qu'un échantillonnage représentatif de toute la nappe de la zone côtière a été fait afin d'étudier la qualité chimique régionale des eaux et la spéciation géochimique des différents éléments.

#### II- Cadre géologique

Le secteur est situé à la jonction de deux domaines structuraux du Maroc nord-occidental: le domaine Rifain méso-cénozoïque appartenant à l'orogenèse alpine au nord et à l'est et le domaine mésétien (Zizi, 1996) qui correspond à la zone septentrionale du massif central hercynien au sud (figure 1a). L'étude de la série du Néogène et du Quaternaire dans la bordure atlantique est basée sur l'analyse des colonnes stratigraphiques déduites des forages implantés dans le secteur (figure 1b). La série sédimentaire débute à la base par le dépôt d'une puissante séquence marneuse de plusieurs centaines de mètres d'âge Miocène et Pliocène inférieur, surmontée progressivement par des sables à matrice carbonatée (figure 1b). La smectite et l'illite sont les minéraux argileux les plus abondants. La séquence allant du Pliocène moyen au Quaternaire est représentée

par des calcaires bioclastiques, des sables à matrice carbonatée et par des lentilles de cailloutis. Dans cette série, on note une augmentation de la granulométrie en allant de la base vers le sommet. Les minéraux argileux les plus dominants sont la kaolinite et la chlorite. Des cordons littoraux plus ou moins consolidés parallèles au rivage tapissent la surface de cette zone (Cirac, 1985).

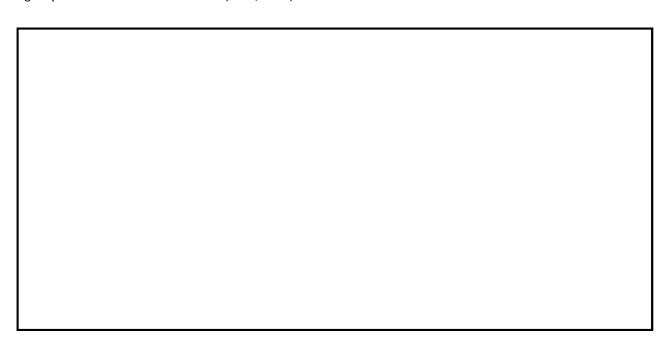


Figure 1a : Carte géologique simplifiée du bassin sud-rifain occidental (Kacimi, 1992).

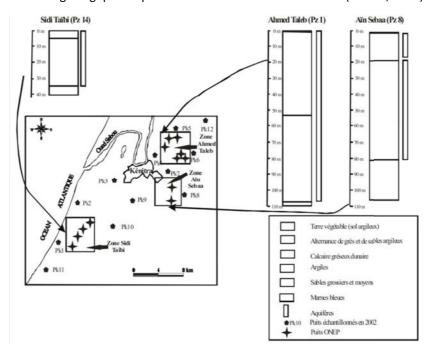


Figure 1b : Localisation des puits échantillonnées et les logs stratigraphiques des différents champs captants de la zone d'étude.

#### I- Hydrogéologie du secteur

Les forages exécutés dans la région ont montré l'existence d'un aquifère constitué principalement par des sables, des grès, des calcarénites et des calcaires bioclastiques parfois karstiques, déposés sur un substratum

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

marneux imperméable constituant l'aquitard (figure 1b). Le réservoir montre des caractéristiques hydrauliques assez élevées, la résistivité électrique est de l'ordre de 100 à 1600 Ωm (El Mansouri, 1999), T=5.10<sup>-3</sup> m²/s, K=4.10<sup>-4</sup> m/s et S= 3.6.10<sup>-2</sup>. L'aquifère est principalement monocouche, souvent à nappe libre formant une large bande d'une dizaine de kilomètres parallèle à la côte atlantique sur une longueur de 80km étendue entre Rabat et Larache. La carte piézométrique montre un axe d'écoulement sud-est, nord-ouest vers l'océan Atlantique en réponse au gradient naturel de l'écoulement (figure 2).

La recharge de la nappe se fait essentiellement par la surface où les cordons littoraux plus ou moins consolidés formant un faciès sédimentaire grossier dont les caractéristiques hydrauliques sont très élevées,  $T = 10^{-2}$  m/s, S = 1 à 2.  $10^{-3}$  (Thauvin, 1966; Combe, 1969)

#### IV- Hydrogéochimie des eaux souterraines

#### IV.1- Méthodes et analyses

En plus des résultats d'analyses d'eau de 12 points effectués par l'ONEP en 1994 (Office National de l'Eau Potable) (Tableau 1), douze autres points ont été échantillonnés. Le choix des points d'échantillonnage a été fait sur le principe de la situation au voisinage des différents champs captant de l'ONEP destinés à l'alimentation en eau des agglomérations urbaines de la région (figure 1b). Différents paramètres physiques ont été mesurés au cours de l'échantillonnage à savoir la température, le pH, la conductivité et le Eh.

Les différentes analyses ont été effectuées au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Cagliari (Italie).

- \*La mesure des anions Cl, SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> a été faite par chromatographie ionique ;
- \*Les analyses des cations Na, Ca, Mg, et Si sont réalisées moyennant ICP OES;
- \*Les mesures de la teneur des éléments lourds et en trace suivants : Cr, Co, Ni, Zn, Li, Rb, et Ba sont effectuées par plasma de masse ICP MS. La qualité des analyses de ces éléments est basée sur la comparaison avec les échantillons standard internationaux de référence SRM1643c du National Institut of Standard and Tecnology (USA).

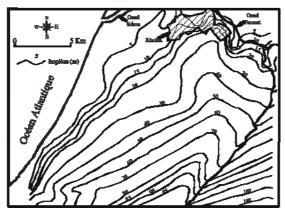


Figure 2 : Carte piézométrique de la zone étudiée pour l'état de 1996.

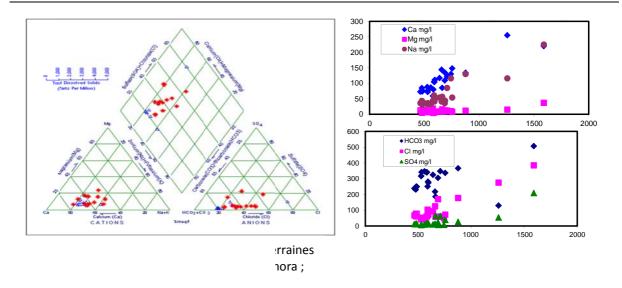
#### IV.2- Faciès chimique des eaux

Le diagramme de Piper des eaux étudiées (figure 3a) montre que les eaux appartiennent au faciès chimique mixte de type bicarbonaté-chloruré-calcique. Les échantillons montrent une évolution graduelle de leur teneur en sodium-potassium, à cause de l'impact de la lithologie. En effet, les eaux circulant dans les cordons dunaires et dans les calcarénites montrent une teneur plus faible en sodium et en potassium par rapport à celles circulant dans les niveaux argileux et limoneux. Un seul point d'eau puisé dans les cordons dunaires montre des teneurs assez basses en bicarbonates (figure 3b) dues à la précipitation du CaCO<sub>3</sub> dans un environnement riche en calcaire (figure 3c) durant la saison sèche d'où la présence de granules calcaires dans le sol.

Les eaux ont une salinité totale moyenne (TDS) entre 600 et 750 mg/l, à l'exception des deux échantillons situés, dans des niveaux argilo-limoneux imperméables, ayant une TDS avoisinant 1200mg/l.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013



Le programme de spéciation géochimique (Phreeqc 2.15) permet de calculer la saturation des eaux vis-à-vis de nombreux minéraux. Ainsi, les eaux étudiées sont en équilibre vis-à-vis de la calcite. Plusieurs échantillons montrent une sous-saturation vis-à-vis de la dolomite (figure 4). En effet, des études antérieures (Snoussi, 1986) ont mis en évidence de faibles teneurs en magnésium et une très forte teneur en calcium dans les sédiments superficiels de la plaine du Gharb-Mamora.

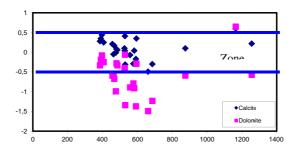
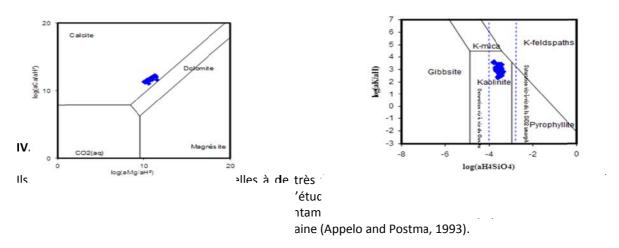


Figure 4 : Saturation des eaux étudiées vis-à-vis de la calcite et de la dolomite

Le diagramme d'activité (figure 5) des phases carbonatées montre que les eaux de la nappe phréatique étudiée sont saturées en calcite. La figure 6 montre que les espèces minéralogiques existantes dans les eaux étudiées correspondent au domaine de stabilité de la kaolinite selon le système K<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H2O. Ces deux diagrammes montrent une relation directe avec la lithologie du terrain riche en calcaire et en kaolinite.



« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Généralement, et à partir des analyses d'eau effectuées au cours de la période d'été 2002 dans le secteur étudié, on constate que la teneur des eaux en éléments lourds et en traces évolue avec la TDS (figure 7) et sont donc issus des processus de l'altération des roches. Deux échantillons prélevés dans le périmètre urbain de la ville de Kénitra montrent des concentrations anormales pour tous les éléments étudiés, l'origine de ces anomalies ne peut être attribuée qu'à l'activité anthropique, puisqu'ils sont situés à proximité de plusieurs unités industrielles et dans un niveau lithologique argilo-lim

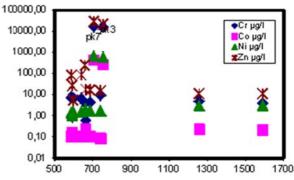


Figure 7: Evolution de la teneur en éléments lourds et en traces en fonction de la TDS.

#### V. La qualité chimique de l'eau

Les teneurs anormales en ions dissous n'ont pas été détectées dans la zone étudiée, à part les deux puits montrant les anomalies en métaux lourds et en traces. La salinité n'excède pas les valeurs recommandées pour une eau destinée à la consommation humaine et à l'agriculture.

La distribution des formes azotées oxydées (NO<sub>3</sub>) dans la zone étudiée est représentée par la figure 8. Des valeurs de NO<sub>3</sub> comprises entre 50 mg/l et 410 mg/l ont été rencontrées dans les eaux souterraines du secteur, ceci est dû à l'utilisation massive des fertilisants azotés et du fumier (Paul, 1999) dont la migration vers la nappe est accentuée à cause de la nature lithologique de l'aquifère (calcarénites de plage karstifiées et sables grossiers) très perméable (K=1,8 10<sup>-3</sup> m/s) (Mouaddine, 1997) et par conséquent très vulnérable à la contamination agricole.

Deux points d'eau montrent des teneurs élevées en métaux lourds et en éléments en traces (Zn, Cu, Co, Cr, Cd et As) (tableau 1b) supérieures à 500 ppb avec une prédominance du zinc, dépassant largement les normes maximales admissibles, ce qui constitue un problème sérieux de point de vue qualité de l'eau ayant des répercussions sur la santé des consommateurs.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

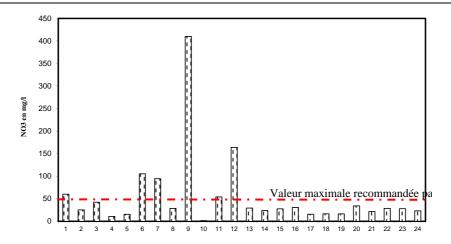


Figure 8 : Teneur des eaux étudiées en nitrates.

#### VI. Conclusion

L'étude des caractéristiques géochimiques des eaux de la bordure atlantique a montré l'existence d'une famille d'eau bicarbonatée-chloruro-calcique de basse salinité. Les eaux sont en équilibre vis-à-vis des minéraux carbonatés. La teneur des eaux en métaux lourds et en traces est faible, à l'exception de deux puits situés dans le périmètre urbain et dans la zone industrielle de la ville de Kénitra et qui se caractérisent par un niveau lithologique argilo-limoneux plus ou moins imperméable. La qualité chimique des eaux est relativement moyenne à cause de la pollution excessive en nitrates.

#### Références Bibliographiques

Appelo C.A.J. and Postma D., 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. 536p. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.

Bahaj T., 2002. Hydrogéochimie et qualité des eaux des nappes phréatiques du Causse Moyen Atlasique, du Bassin de Saiss, de la Plaine du Gharb, de la plaine de la Maâmora et de la région de Zemmour. Thèse de Doctorat .Faculté des Sciences Rabat179p.

Cirac P., 1985. Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur. Evolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement. Mem. Inst. Géol. Bassin d'aquitaine, Université de Bordeaux 1, n° 21, 287p.

Combe M., 1969. Cartes hydrogéologiques de la plaine du Rharb au 1/100000. Notes et mem. Serv. Géol., Maroc, n° 221bis, 39p.

Drever J., 1982. The geochemistry of naturel waters, Edit. Prentice-Hall. Inc., 388p.

El Mansouri B., 1999. Développement d'outils et concepts pour la gestion des eaux souterraines. Applications à l'aquifère côtier du Gharb. Thèse de doctorat d'état, Faculté des Sciences de Kénitra 152p

Kacimi I., 1992. Quelques aspects sur l'hydrogéologie et l'hydrochimie des nappes aquifères du Gharb. Le problème particulier du fer et du manganèse, Master's UQAM; 120p.

Kretzschmar T.G., Schulze-Makuch D., and Tprres-Alvarado I.S., 2001. Chemical evolution of groundwater in the Tularosa Basin in Southern New Mexico. Water-Rock Interaction, Cidu ed., pp 545-548.

Malaki A., Kacimi I., El Wartiti M., Zahraoui M. et Kassou N., 2001. Evolution temporelle de la qualité des eaux souterraines des champs captants dans la plaine du Gharb: Ahmed Taleb, Aïn Sebaa et Sidi Taïbi, Riv. Idrobiol., 40, 2-3, 2001.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Mouaddine L., 1997. Utilisation des cartes de vulnérabilité pour la délimitation des zones de protection des captages d'eau potable : Cas du champ captant de Fouarat. DES Fac. Sci. Semlalia Marrakech, 179p.

Paul F., 1999. Chloride and nitrates distributions in the hickory aquifer, Central Texas US, Environment International, vol. 25 n° 4, pp 393-401 (Elsevier Science)

Snoussi M. 1986. Nature, estimation et comparaison des flux de matières issus des bassins versants de l'Adour (France), du Sebou, de l'Oum-Er- Rabia et du Souss (Maroc). Impact du climat sur les apports fluviatiles à l'océan. Mém. Inst. Géol. du Bassin d'Aquiitaine. Univ. Bordeaux I n°22, 459p.

Thauvin J.P., 1966. Monographie hydrogéologique de la Mâamora. Notes et mem. Ser. Geol. n° 195, Maroc, 120p.

Zizi M., 1996. Triassic –Jurassic extensional systems and their Neogene reactivation in Northen Morocco (The rides prerifaines and Guercif bassin). Ph.D. Dissolution, Rice Univ., Houston, Texas, 230p.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Défluoration des eaux par résines échangeuses d'ions

A. Ben Nasr<sup>(1,2)</sup>, K. Walha<sup>(1)</sup>, C. Charcosset<sup>(2)</sup>, R. Ben Amar<sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Sciences des Matériaux et Environnement, Faculté des Sciences de Sfax, Université de Sfax, Route Soukra Km 3.5, BP 1171, 3000 Sfax, Tunisie 
<sup>2</sup>Laboratoire d'Automatique et de Génie de procédés, Université Claude Bernard de Lyon, UMR 5007, CNRS, CPE, 43 bd du 11 novembre, 69100 Villeurbanne, France

<sup>1,2</sup> Université Claude Bernard Lyon1, anisbennasr@ymail.com

<sup>1</sup> Université de Sfax Tunisie, walha.khaled@yahoo.com

<sup>2</sup> Université Claude Bernard Lyon 1, <u>charcosset@lagep.univ-lyon1.fr</u>

<sup>1</sup> Université de Sfax Tunisie, Raja.Rekik@fss.rnu.tn

#### Résumé

La défluoration des eaux souterraines est une préoccupation majeure dans plusieurs endroits à travers le monde. Un excès d'ions fluorure dans l'eau potable a des effets néfastes sur la santé humaine. En effet, une concentration en F- supérieure à 1,5 mg.L-1 favorise la fluorose dentaire. Une concentration supérieure à 5 mg.L-1 peut provoquer la fluorose osseuse caractérisée par une hypercalcification des os. Dans cette étude, nous avons procédé à la défluoration de solutions modèles de NaF d'une part et d'une eau souterraine tunisienne prélevée de la région de Gafsa (Sud Tunisien) d'autre part en utilisant une résine échangeuse d'ions A-520E. L'influence du temps de contact, de quantité de résine utilisée et de la concentration initiale en fluorure sur la rétention des ions fluorures a été évaluée. La défluoration de l'eau souterraine ([F-] initiale = 3,39 mg.L-1) montre que l'eau traitée avec la résine présente une concentration résiduaire en fluorure de 1.09 mg.L-1. Cette valeur est inférieure à la norme de potabilité fixée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) à 1,5 mg.L-1 en fluorure. Les isothermes d'adsorption des ions fluorures vérifient les modèles de Freundlish et de Langmuir.

Mots Clés: eaux saumâtres, défluoration, échange d'ion, isotherme d'adsorption

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hassan Addakhil (Sud-est du Maroc) par télédétection et SIG

K. Drif <sup>1</sup>, I. Kacimi <sup>1</sup> M. Hilali <sup>2</sup>, N. Kassou <sup>1</sup>, T. Bahaj <sup>1</sup>, M. Morarech <sup>1</sup>

1-Université Mohammed V Agdal, Faculté des sciences Agdal-RABAT, 2- Université Moulay Ismaïl,. Faculté des Sciences et Techniques Errachidia. iliaskacimi@yahoo.fr

#### 1-INTRODUCTION

Parmi les défis majeurs du XXIème siècle celui où on est confronté au problème de la qualité des eaux qu'on est obligé à surmonter surtout dans les régions où on a un potentiel hydrique très limité. En effet au niveau de plusieurs régions du Maroc, les ressources en eau sont de plus en plus confrontées au problème de la pollution. Ceci devient plus alarmant quand on injecte des reflux polluants dans les milieux récepteurs sans leur traitement préalable. [4]

Vu le progrès industriel et agricole qu'a connu le Maroc, le potentiel de contamination des eaux de surface devient de plus en plus important jusqu'à la dégradation relativement totale de la qualité de la ressource dans certains cas. C'est pour cette raison qu'il faut adopter une politique de gestion et de protection de ces ressources afin d'assurer une consommation humaine saine et un meilleur approvisionnement en eau de meilleure qualité, et sauvegarder cette ressource pour les futures générations.

A cet effet, il est essentiellement nécessaire de connaître profondément la ressource, assurer son suivi aussi bien qualitativement que quantitativement par des mesures capables de la protéger. Parmi ces mesures, des périmètres de protections peuvent être appliqués comme un outil très sérieux. Il s'agit de trois périmètres qui dépendent de divers paramètres liés à la ressource et au bassin en général, réalisés sur des distances croissantes en s'éloignant de la ressource [1].

Afin de mener à bien une délimitation de zones de protection, un certain nombre de données multidisciplinaires doivent nécessairement figurer dans le dossier technique; Données climatologiques, hydrologiques, géologiques, ainsi qu'un inventaire des sources et foyers de pollution; et ces données doivent être présentées d'une manière significative et surtout facile à interpréter et à extraire de l'information convenable.

Donc pour protéger les ressources en eau, un grand nombre d'informations géo-scientifiques multidisciplinaires, multi-sources et souvent multi-formats sont nécessaires. Ces informations doivent être structurées selon les thèmes suivants: la définition du contexte de la retenue; les caractéristiques physiques du bassin versant et l'aire d'alimentation; l'occupation du sol; l'évaluation de la vulnérabilité à la contamination et la détermination des périmètres de protection. Cela implique: la compilation de l'information existante, l'acquisition de nouvelles données, l'intégration et l'analyse des données géo-scientifiques, et l'interprétation des résultats (Paradis et al. 2000).

#### 2- MATERIEL ET METHODE

#### 2-1-Aire d'étude et problématique

Comme cité auparavant, cette étude concerne essentiellement l'amont du barrage Hassan Addakhil (mis en service en 1971), situé dans le Sud-est du Maroc à 25Km approximativement d'Errachidia. Ce barrage permettra de couvrir les besoins en eau d'irrigation de la région, il collecte les eaux du bassin versant de Ziz dont les précipitations moyennes annuelles sont d'environ 124mm.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

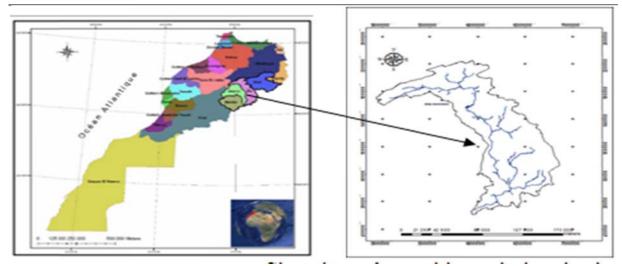


Figure1: Situation géographique du bassin de Ziz et sa limite

Au niveau de l'amont de barrage sont situées les agglomérations principales suivantes :

Ait Yahia, Anemzi, Asoul, Lkheng, Ennzala, Gourama, guers Tiallaline, Guir Mzizel, Sidi Aayad, Errich, Tadigoust, Zaouiat Sidi Hamza, Amougher, Bou Azmou, Imilchil, Outrbat, Agoudim, Ait Ouzdeg, et Amersid. Le barrage est sujet à une pollution généralement urbaine (déchets solides et liquides: eaux usées) ou accidentelle (trafic routier).

#### 2-2-Les périmètres de protection

La réglementation (articles 2 et 63 de la loi N° 10-95 sur l'eau au Maroc) prévoit que la protection des points d'eau à usage public doit être réalisée par la mise en place de deux zones : l'une de protection immédiate, l'autre de protection rapprochée, complétées éventuellement par une troisième dite de protection éloignée. Selon la même loi, ces trois zones se définissent comme suit:

- Une zone de protection immédiate englobant le ou les points de prélèvement ;
- Une zone de protection rapprochée qui doit protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration des substances polluantes;
- Une zone de protection éloignée qui, si nécessaire, prolonge la précédente pour renforcer la protection contre les pollutions [1].

#### 2-3-Méthode

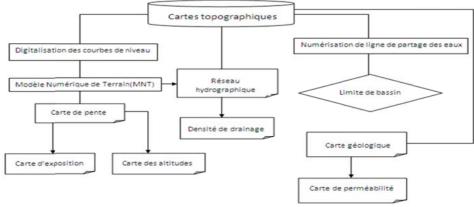


Figure 2: Enchainement des travaux effectués par l'outil SIG(ArcGis)

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

L'objectif de cette étude consiste principalement et dans un premier temps à mieux définir et connaître les différents caractéristiques du bassin de Ziz en commençant par la délimitation du bassin en digitalisant les lignes de crêtes, par la suite, les paramètres physiographiques ont été déterminés à savoir la superficie, le périmètre, l'indice de Gravelius, les altitudes...

Puis le réseau hydrographique et la pente à travers le Modèle Numérique de Terrain ont été réalisés en utilisant l'ellipsoïde Clarke 80 avec un système de projection basé sur la projection conique conforme de Lambert et un datum dont l'origine est la localité de Merchich près de Casablanca.

#### **3-TRAVAUX REALISES**

#### 3-1-Paramètres physiographiques:

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Le temps de concentration Tc, caractérise en partie la vitesse d'écoulement des eaux, La réponse hydrologique engendrée suite à une averse est influencée par les diverses caractéristiques morphologiques du bassin: en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son élévation, sa pente et son orientation.

Après délimitation du bassin, des informations géomorphologiques ont été recueillies afin de mieux estimer ses caractéristiques. Ses principaux paramètres sont les suivants :

Α	Р	Kc	Alt max	Alt min	Pente	
14212Km <sup>2</sup>	914Km	2 .15	3567m	587m	5.6'	

Tableau1 : Les différents paramètres caractérisant le bassin versant de Ziz

Le bassin d'Oued Ziz a un indice de compacité égale à 2 .15. Sa forme est donc allongée témoignant d'un faible drainage qui va minimiser le temps de rassemblement des eaux et diminuer les charges transportées par l'eau. Mais cela peut aussi être en faveur des crues car cette forme montre une faible largeur ce qui favorise l'accumulation des eaux à l'exutoire du bassin versant dans un temps plus court.

#### 3-2-Paramètres topographiques

#### 3-2-1-Le relief

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement.

L'altitude moyenne du bassin versant de l'Oued Ziz est de 1197 m avec un sommet à 3567m et un exutoire à 587 m. L'amont de ce bassin est étroit et il s'élargit progressivement en allant vers l'aval. Ce qui permet de constater que le bassin versant de Ziz est caractérisé par une topographie très contrastée. Généralement et d'après la carte ci-dessus, la partie amont est caractérisée par un grand nombre de sommets d'altitudes élevées, notamment un sommet de 3567m; cette partie très accidentée témoigne d'une forte dynamique (ruissellement, érosion...).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

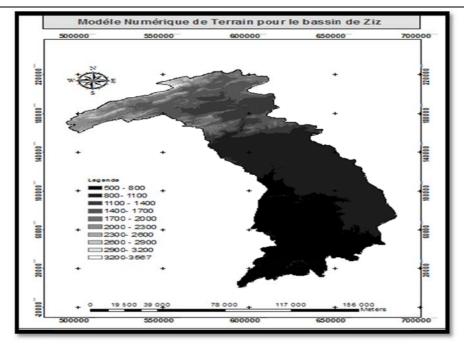


Figure3: Carte des altitudes

#### 3-2-2Hypsométrie du bassin versant

Puisque la plupart des facteurs climatiques et hydrologiques sont en fonction de l'altitude, il est donc important de déterminer la répartition du bassin versant par les tranches d'altitudes et de dégager les différents paramètres de reliefs du bassin versant étudié.

Pour mieux comprendre les variations d'altitudes au sein du bassin versant de l'Oued Ziz, une méthode statistique a été appliquée et a permis grâce à un histogramme et une courbe hypsométrique de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude et permet en outre de déterminer les altitudes caractéristiques.

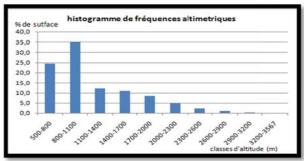


Figure 4 : Histogramme de fréquence altimétrique du bassin de Ziz

L'altitude de la plus grande surface élémentaire comprise entre deux courbes de niveau successives, au niveau du bassin de Ziz, est celle de 950m avec une superficie de 4996 Km², la moyenne de la classe (800-1100), localisée dans l'aval du barrage Hassan Addakhil.

#### 3-3-Les cartes numériques thématiques

#### 3-2-3 Le Modèle Numérique de Terrain

Le Modèle Numérique de Terrain a été utilisé en premier (Résolution 30 m de coté de pixel).

Un MNT est une représentation numérique simplifiée de la surface d'un territoire en coordonnées altimétriques (le plus souvent exprimées en mètres par rapport au niveau de la mer) et planimétriques calées dans un repère géographique. Elle est Intégrée dans un système d'information

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

géographique, cette information joue alors un rôle important, à l'instar des courbes de niveau et estompages (ombrages) dans une carte traditionnelle. Avec cependant des possibilités d'exploitations bien supérieures notamment en termes d'analyse spatiale. [3]

Par l'utilisation d'ArcGis, le MNT (Image de gauche) a été superposé avec le contour de bassin créé auparavant. Puis tout ce qui est à l'extérieur du bassin a été masqué afin d'obtenir uniquement la MNT de Ziz ; La même procédure a été suivie pour les autres éléments (toute donnée est limitée par le contour du bassin).

#### 3-3-Carte des pentes

Les classes de pente sont déduites d'un modèle numérique de terrain. (Résolution 30 m de côté de pixels).

A partir du profil, les pentes au niveau du bassin de Ziz sont en majorité très faibles (inférieur à 20'). Géographiquement, cette classe de pente occupe surtout l'aval du barrage Hassan Addakhil. Les fortes pentes (60'-80') caractérisent les zones situées à l'amont du barrage, ceci est tout à fait normal puisqu'il s'agit de la chaîne du Moyen Atlas.

#### 3-4-Réseau hydrographique

Dans le secteur d'étude, le réseau hydrographique est riche en vallées importantes mais à faible développement de cours pérennes, l'oued Ziz présente un régime à tendance saharienne. Le cours d'eau principal comprend :

\*Un cours supérieur de direction est-ouest sur 122km devenant nord-sud au coude de kerrando. Ce cours draine le bassin amont du Ziz qui est limité au Sud par le barrage Hassan Addakhil.

Le Ziz et ses affluents recoupent les axes des structures du Haut Atlas en formant des cluses dites « Foum »

\*Un cours moyen, de direction générale nord-sud collecte les eaux du bassin intermédiaire depuis le barrage au radier d'Erfoud.

Dans la partie sud, le Ziz coule dans ses alluvions largement étalées. En aval d'Ain Meski, il entaille les calcaires du Turonien par des gorges surimposées très encaissées.

\*Un cours inférieur, de direction générale nord-sud traversant la plaine de Tafilalet.

Les principaux affluents sont issus de l'Atlas : oued Outerbat, oued Nasla, oued Talsast, oued Sidi Hamza...

#### 3-4- Carte de densité de drainage

La densité de drainage (Dd) est définie comme le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique (longueur de tous les cours d'eau, pérennes ou temporaires) et la superficie du bassin versant.

La densité de drainage est, en quelque sorte, un reflet de la dynamique du bassin, de la stabilité du réseau hydrographique et du type de ruissellement de surface. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées. [2]

Par la suite, la carte de densité de drainage à partir du réseau hydrographique a été élaborée.

La carte ci-dessous (figure 5) montre que la densité est de plus en plus importante en s'éloignant de la ligne de crête, et en se rapprochant du cours d'eau principal, et cela s'étend de part et d'autre du barrage Hassan Addakhil.



Figure 5 : Les différentes cartes thématiques réalisées par ArcGis

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### 3-5-Carte d'exposition

La carte d'exposition permet d'obtenir une carte des orientations ou d'exposition des versants de notre aire d'étude, le calcul est réalisé à partir de ligne de la pente maximale entre chaque pixel et les pixels avoisinants. Les valeurs oscillent entre 0° et 360° suivant la direction de l'aiguille de l'horloge. Dans la carte résultante ces valeurs apparaissent graduées en 9 classes et une classe qui correspond aux zones planes. Concernant la zone plane il s'agit en majorité de l'aval de barrage Hassan Addakhil avec des inclinaisons moins importantes, or l'amont du barrage est caractérisé par une exposition au Nord plus fréquente ce qui rend cette disposition peu favorable à l'enneigement. Ceci montre que malgré une altitude élevée, les neiges y fondent plus rapidement. Cette fonte des neiges précoce favorise l'alimentation du cours d'eau principal ainsi que des crues saisonnières (généralement au mois d'Avril et Mars).

#### 3-6-Carte de perméabilité

La carte de perméabilité est issue de la géologie de la région concernée, autrement dit chaque degré de perméabilité est étroitement liée à une géologie bien définie.

Généralement l'amont du barrage est caractérisé par une perméabilité faible due aux roches sédimentaires de résistance moyenne (flysch-marnes) et aux roches métamorphiques schisteuses (schistes). Toujours au niveau de l'amont, une perméabilité très faible conséquence de roches sédimentaires résistantes, roches métamorphiques, et roches volcaniques est mise en évidence; Cette perméabilité est en totalité faible éventuellement à l'avant du barrage, avec présence de terrains fortement perméables à l'Est du bassin (présence de roches sédimentaires du Paléogène et Néogène), ainsi qu'un terrain moyennement perméable à l'ouest et au sud-ouest (dépôts quaternaires).

#### 4-Superposition de vulnérabilité

Après la réalisation de diverses cartes thématiques du bassin, d'une part, le sous-bassin de l'amont du barrage Hassan Addakhil a été extrait afin d'estimer la vulnérabilité liée à chaque paramètre physiographique et/ou topographique, dans une première étape sans faire intervenir les foyers de pollution qui existent à ce niveau-là. D'autre part, toutes nos cartes ont été superposées en donnant à chaque facteur l'ordre 1 (en supposant que tous les facteurs ont le même effet), en utilisant bien évidemment l'ArcGis et plus précisément le « Raster Calculator » ainsi, une estimation plus ou moins significative de la vulnérabilité liée aux facteurs naturels au niveau de l'amont du barrage a été obtenue.

La carte ci-dessous permet une vision générale de la vulnérabilité. Celle-ci a été répartie en 5 classes, allant d'une vulnérabilité faible à très élevée, et dont la valeur de chaque classe est la somme des différentes classes liées chacune à une carte bien déterminée.

Comme le montre la carte de vulnérabilité, la fragilité à la pollution est très importante au Nord-est du barrage ainsi qu'à l'ouest, ce qui est évident, vu que dans cette zone se trouve une classe de pente assez élevée et donc un ruissellement également marquant. Ceci engendre une menace réelle pour la retenue de point de vue dispersions de pollution accidentelle ou apport solide.

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

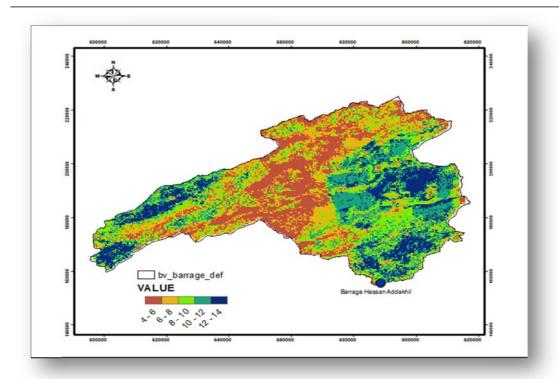


Figure 6 : Carte de la vulnérabilité de l'amont de barrage Hassan Addakhil

#### **5-ETUDE CLIMATIQUE**

Cette étude est réalisée grâce à une série de données diverses issues de l'Agence du Bassin Hydraulique-Errachidia

#### 5-1-Les précipitations :

Le tableau suivant montre que les précipitations augmentent en allant vers le nord, les valeurs minimales sont enregistrées plus en aval du barrage (au niveau de la station Radier d'Erfoud) avec un minima de 66mm, et un maxima de 264mm au niveau de la station Zaouia Sidi Hamza (l'amont du barrage).

D'une manière générale, ces précipitations restent relativement faibles reflétant de ce fait les caractéristiques climatologique de la région.

Stations	Longitude X	Latitude Y	Précipitation moyenne annuelle (mm)
M'zizel	560,000	185, 300	183
Zaouia S	564,400	204,390	264
Hamza			
Foum	579, 850	192, 500	201
Tilicht			

Tableau 3 : Précipitations annuelles dans chaque station au niveau du bassin de Ziz

#### 5-2- Les températures

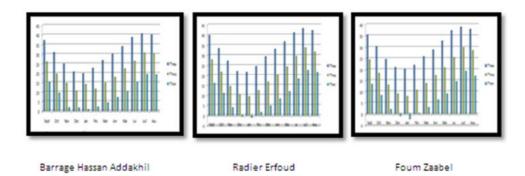
Les données disponibles de température sont celles de la station de BHD, Radier Erfoud, et de Foum Zaabel. A la base d'une série de données étalées entre 1982 et 2009, la moyenne des maximas et des minimas annuelle a été établie.

187

124

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013



Les températures moyennes mensuelles au niveau de l'aval du barrage Hassan Addakhil varient entre 10,6°C (Décembre) et 30,7 °C (Juillet). Quant à celles des stations de Radier Erfoud et Foum Zaabel, elles varient entre 9,3°C (Janvier) et 33,8°C (Juillet) pour la première et 29,9°C (Juillet) et 9,09°C (Janvier) pour la deuxième. Les moyennes mensuelles maximales sur le bassin de Ziz s'observent en général pendant le mois de Juillet. Les températures sont élevées dans leur ensemble, mais varient peu au sein de l'année et d'une station à l'autre.

#### **6-CONCLUSION**

L'objectif de cette étude c'est d'élaborer des périmètres de protection pour l'amont du barrage Hassan Addakhil en se basant sur des données multidisciplinaires afin de bien estimer les paramètres jouant le rôle tranchant dans l'élaboration de ces périmètres. Diverses cartes thématiques ont été réalisées, en moyennant l'outil SIG, et par la suite la qualité de l'eau de l'oued Ziz a été évaluée à travers les sources principales alimentant le bassin et aussi au niveau de toute sortie d'agglomération afin d'estimer la pollution organique engendrée par des activités urbaines ou rurales. Dans un deuxième temps on va attaquer le débit solide qui caractérise l'amont de barrage Hassan Addakhil vu les pentes importantes qui définissent la région. Et finalement on procédera à déterminer les périmètres de protection pour l'amont de la retenue, avec la proposition des solutions provisoires et/ou permanentes afin de résoudre les principaux problèmes tirés de cette étude.

#### Références bibliographiques :

[1]ANONYME, 1995. Loi N° 10-95 sur l'eau au Maroc. Bulletin officiel du Maroc, n° 4325, 20 septembre 1995. [2]ONEP-GTZ, 1995. Étude en vue de la requête pour l'installation des périmètres de protection pour la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur l'oued Bou Regreg. Office national de l'eau potable et Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit, Office national de l'eau potable du Maroc, Rapport scientifique, 175 p.

[3]FALEHI Ali et SADIKI Abdelhamid, 2011Système d'Information Géographique et Analyse Spatiale

[4]Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement-NOVEC, 2011, actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eaux des bassins de Guir-Ghris-Ziz et Maider, phase I-Agence du bassin hydraulique.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Application de la géophysique en vue de dégagement des ressources en eau du système de Charf El Akab

Lazar H.<sup>1</sup>, Benmoussa A.<sup>2</sup>, Kassou N.<sup>1</sup>, Kacimi I.<sup>1</sup>, Tarik B.<sup>1</sup>, Morarech M.<sup>1</sup>
\*Laboratoire d'Océanologie, Géodynamique et Génie Géologique Faculté des sciences Agdal-RABAT,

\*\* ONEP

iliaskacimi@yahoo.fr

hajarlazar1488@gmail.com - asmabenmoussa@gmail.com nadiakassou@yahoo.fr - iliaskacimi@yahoo.fr

#### I. INTRODUCTION

Dans le cadre de la politique du développement accéléré que connait le Maroc actuellement, la zone du Nord, notamment la zone du Tangérois, est appelée à se préparer pour accueillir une importante activité sociale et économique. Les besoins en eau, que ça soit potable ou industrielle, dans la région de Tanger-Asilah sont appelés à s'accroître pour accompagner l'augmentation de la demande instaurée par le développement économique, la croissance démographique et l'augmentation des risques de pénuries.

L'aquifère de Charf El Akab d'une superficie de 17 km², situé à 17 Km au Sud Ouest de la ville de Tanger, joue un rôle déterminant en tant que réservoir régulateur des eaux superficielles qui y sont injectées en Hiver, puis repompées en période sèche pour le renforcement de l'AEPI des villes de Tanger et d'Asilah.

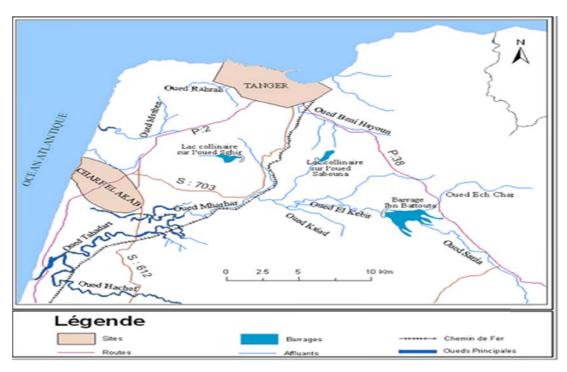


Figure 1 - Carte de situation du bassin de Charf El Akab par rapport au bassin du LOUKKOS

Ce système aquifère représente le système de secours en cas d'urgence qui peut être dû à l'arrêt ou l'indisponibilité de l'un des ouvrages de desserte actuelle ou relative à l'augmentation de la demande.

Vu les différentes problématiques des ressources en eau de la région, les études de dégagement de nouvelles ressources en eau par la réalisation de nouveaux forages, semblent nécessaires et de haute importance, ces études sont essentiellement basées sur des reconnaissances géophysiques et hydrogéologiques. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet qui consiste à la réalisation d'une synthèse hydrogéologique et géophysique des forages ONEP et dont les ressources sont destinées à l'AEP de Tanger –Asilah.

#### **II. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE**

Cet aquifère est constitué de deux nappes, à savoir, la nappe supérieure qui circule dans des sables et des grès fins du pliocène et repose sur un substratum marneux sableux, et la nappe inférieure qui circule dans des formations biocalcarénites, des grès et des sables du Tortonien supérieur.

#### III. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le complexe de Charf El Akab est constitué d'une série détritique (d'âge s'échelonnant entre le Tortonien et le Pliocène), déposée sur l'unité imperméable de Tanger.

Les différents faciès lithologiques contenus dans cette unité permettent de distinguer les trois formations principales suivantes :

#### Formation inférieure :

Elle affleure au niveau de la partie sud de Charf El Akab. Son âge est attribué au Toartien supérieur. Son épaisseur varie entre 0 et 250 m et peut dépasser localement 340 m.

#### Formation intermédiaire :

Cette formation, d'âge Messinien, Elle affleure au niveau de la limite NE de la formation inférieure. Son substratum s enfoncevers le Nord où il atteint la cote de - 250 m N.G.M. L'épaisseur de cette formation varie entre 0 et 150 m.

#### Formation supérieure :

Cette formation, d'âge probablement pliocène, occupe pratiquement toute la partie centrale et Nord du bassin de Charf El Akab. Son épaisseur varie entre 0 et 150 m et peut atteindre localement 180 m.

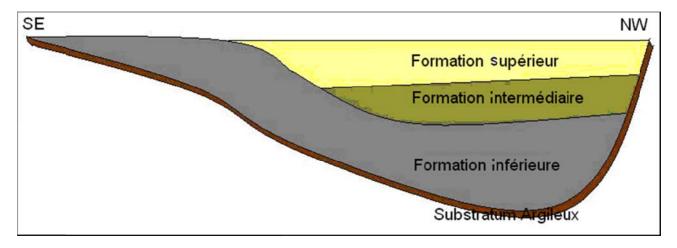


Figure 2- Schéma de la subdivision du système aquifère de Charf El Akab (Loubani, 1990).

#### **IV. CONTEXTE CLIMATIQUE**

La situation du bassin de Tangérois dans le NW du Royaume, lui confère des conditions climatologiques particulières typiques de l'extrême Ouest de la Méditerranée.

Le climat est humide et doux de type marin, bénéficiant de la double influence maritime méditerranéenne et atlantique, avec des vents d'Est.

#### V.UTILISATION DES SIG DANS L'ETUDE DU SYSTEME AQUIFERE

Une base de données pré-établie a été complétée avec un SIG qui représente la base principale de toute la suite de l'étude afin de permettre une bonne visualisation et interprétation des données. Le logiciel **arcmap** a permis de générer différentes cartes :

Carte de délimitation du système aquifère de charf el Akab.

Carte de délimitation des différentes nappes (supérieure, intermédiaire et inferieure) du système.

Carte d'implantation des points d'eau disponibles dans la zone d'étude.

Carte de superposition des différentes couches.

La carte ci-dessous montre l'allure des différentes couches superposées :

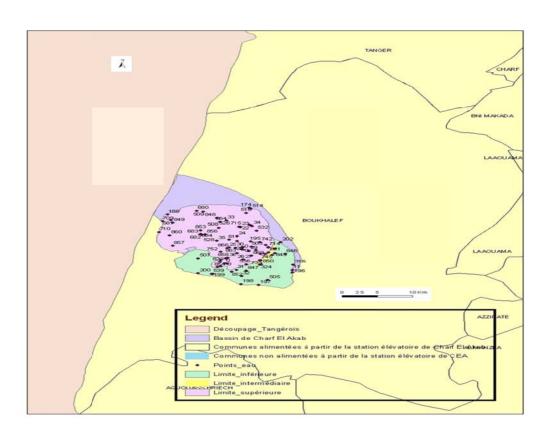


Figure 3 - Carte de superposition des différentes couches élaborées

#### VI. IDENTIFICATION DES BESOINS EN EAU

Le tableau 1 consigne les prévisions sur la demande en eau de la zone alimentée à partir de la station élévatoire de Charf El Akab jusqu'à l'horizon 2030 (en millions de m³/an) :

dduction	Centre	Années				Date de
	Centre	2010	2015	2020	2030	saturation
	Besoins en eau potable de pointe en l/s					
	TANGER	2 185	2 633	2 980	3 584	
	ASSILAH	80	83	91	96	
	TNINE S. YAMANI	2	2	2	2	
	DAR CHAOUI et JBEL LAHBIB	3	4	5	6	
TANGER	Pôles urbains (Ksar Majaz et Melloussa)		174	291	504	
	Total Urbain 1	2 270	2 896	3 369	4 192	
	COMPLEXES TOURISTIQUES 2		307	411	617	
	ZONES INDUSTRIELLES 3	31	401	549	994	
	Total Rural 4	73	95	112	141	
	Total 1+2+3+4	2 374	3 699	4 441	5 944	
	Ressources actuelles en l/s	2 550	2 700	2 700	2 700	
	Ressources à équiper en l/s		300	300	300	
	Total Ressources en l/s	2 550	3 000	3 000	3 000	
	Déficit en l/s	176	-699	-1 441	-2 944	2 012

Tableau-1: Les prévisions sur la demande en eau de la zone alimentée à partir de la station élévatoire de Charf El Akab jusqu'à l'horizon 2030.

A l'horizon 2030, en période de fréquentation de pointe, le bilan ressource / besoins estimé est déficitaire de **2 944** l/s, et ll y'a lieu de souligner que la nappe Charf El Akab n'est plus réalimentée actuellement, ce qui fait qu'on puise dans les réserves de la nappe qui ne sont pas éternelles.

La comparaison entre la demande et la disponibilité des eaux, montre que la ressource actuelle couvre les besoins de la demande jusqu'en l'an 2010, d'où l'intérêt de mener des études susceptibles de pouvoir dégager d'éventuels point d'eau.

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### VII. RECONNAISSANCE HYDROGEOLOGIQUE

Les coupes lithologiques ont été traitées moyennant le logiciel rockworks après saisie des données lithologiques et reconnaissance du niveau aquifère pour quelques forages profonds, afin de distinguer les différentes formations au niveau de chaque coupe.

La première coupe A est réalisée à partir de l'analyse des formations géologiques de huit forages portant le n° IRE : 512/1, 740/1, 29/1, 741/1, 25/1, 28/1, 860/1, 863/1.

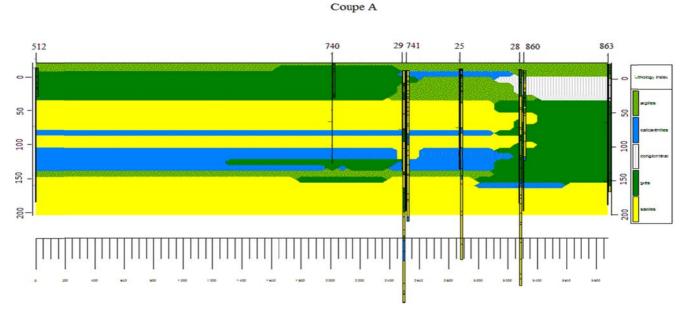


Figure 4 - coupe lithologique A générée par le logiciel rockworks.

La coupe B décrit la lithologie des six forages : 532/1, 22/1, 23/1, 848/1, 680/1, 715/1.

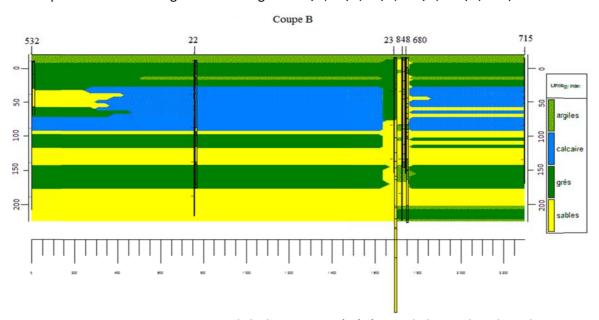


Figure 5 - coupe lithologique B générée par le logiciel rockworks.

L'analyse des deux coupes suggère les conclusions suivantes :

La formation inférieure (-150m à -200m) et qui représente le corps de la nappe profonde se distingue par une granulométrie grossière et elle est formée en général par des sables grossiers et des grés. La formation intermédiaire (-50 à -150) est distinguée par le développement du faciès calcaire, en général elle est formée des sables des grés, des argiles sableuses et des sables argileux. La formation supérieure (-50m à 0 m), qui correspond à la nappe phréatique est distinguée par sa granulométrie fine, elle est formée en général par des grès et des argiles voir des conglomérats.

La coupe C décrit la lithologie des trois forages : 846/1, 26/1 et 27/1.

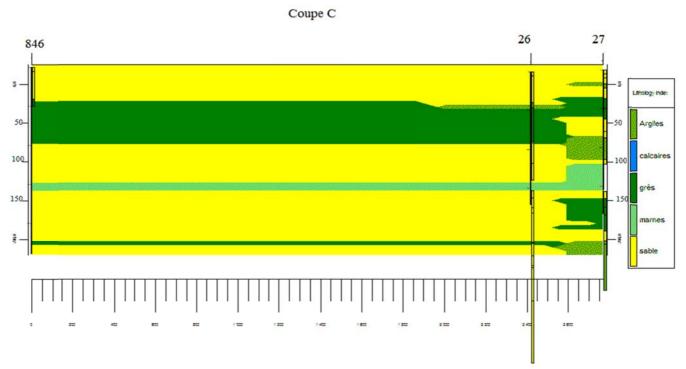


Figure 6 - Coupe lithologique C générée par le logiciel rockworks.

La base de cette série sédimentaire est dominée par des sables et des grés, ces sédiments sont caractérisés par une grande hétérogénéité, une granulométrie grossière,

Au milieu de la série se développe un faciès à dominance marneuse. Il est constitué dans la plus part de son étendue par des marnes.

Le sommet de la série est constitué par des sédiments fins, riche en sables et grès fins.

Le développement du faciès marneux constitue le principal caractère distinctif de cette coupe par rapport aux deux autres coupes. Cette couche constitue un écran d'étanchéité entre la nappe profonde et la nappe phréatique. L'épaisseur de cette formation varie entre- 125 et -135m.

#### **VIII.RECONNASSANCE GEOPHYSIQUE**

Les informations fournies par les diagraphies devraient permettre aux hydrogéologues, par comparaison avec les données générées par les coupes lithologiques et les caractéristiques hydrodynamiques des forages déjà effectués, de définir les zones d'intérêt pour l'implantation de nouveaux forages d'eau.

L'objectif proposé à la géophysique était :

De suivre l'évolution du système aquifère.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

De faire ressortir les zones favorables à d'éventuels forages (présence éventuelle des couches résistantes pouvant représenter des aquifères potentiels).

Cette reconnaissance a été établie moyennant des diagraphies.

Après avoir traité les données des diagraphies avec le logiciel rockworks, on a pu obtenir la coupe ci-dessous :

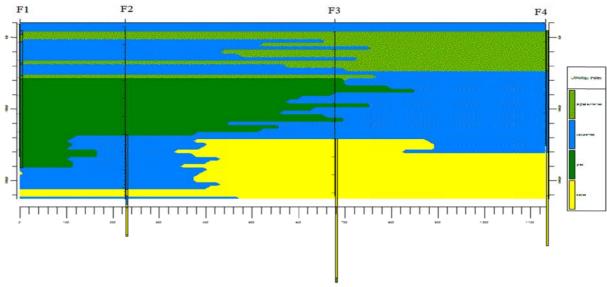


Figure 7 - Coupe générée à l'aide du logiciel rockworks à partir des diagraphies des forages.

#### **IX.RESULTATS**

L'étude hydrogéologique a permis d'identifier les formations aquifères suivantes :

Une nappe inférieure où les eaux circulent généralement dans une matrice constituée de grès et de sables.

Une nappe supérieure où les eaux circulent dans une matrice composée de calcarénites, de grès et de sables.

La présence de quelques intercalations argilo-marneuse qui représentent les formations imperméables.

L'étude géophysique a permis d'identifier les formations aquifères suivantes :

Des formations supérieures résistantes que l'on peut attribuer à des calcarénites et des formations inférieures qui peuvent correspondre à des sables ou des grès.

Ces deux matrices (la formation inférieure et la formation supérieure) correspondent aux zones d'intérêt hydrogéologique, où l'on suggère l'implantation de nouveaux forages d'eau.

#### **X.CONCLUSION**

Le bassin de Charf El Akab est un bassin fermé sans réseau hydrographique, il s'étend sur une superficie de 17 km² et n'ayant pas d'échanges avec les autres avoisinants. Il renferme l'aquifère important de la zone du Tangérois. Cependant le bassin reste toujours menacé d'une exploitation excessive de ses ressources.

Les débits apportés par les forages réalisés par l'ONEP peuvent satisfaire une bonne partie des besoins en eau de la région.

Les informations fournies par la prospection électrique devraient permettre aux hydrogéologues, par comparaison avec les données générées par les coupes lithologiques et les caractéristiques hydrodynamiques des forages déjà effectués, de définir les zones d'intérêt pour l'implantation de nouveaux forages d'eau.

## « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

L'étude a permis d'identifier les formations aguifères suivantes :

Une nappe supérieure où les eaux circulent dans une matrice constituée de grès et de sables.

Une nappe inférieure où les eaux circulent dans une matrice composée des calcarénites, des grès et des sables grossiers.

En se basant sur l'étude réalisée et d'après tout ce qui précède, on peut avoir comme recommandations :

D'approfondir les études dans les unités hydrogéologiques mal connues pour détecter l'existence d'éventuelles nappes profondes.

D'Uniformiser les fiches techniques des captages selon un modèle numérique englobant toutes les informations référant au système aquifère de Charf El Akab.

D'étudier la vulnérabilité des nappes, notamment superficielles qui sont menacées par la pollution.

De transférer l'eau des unités connaissant un excès hydraulique vers les unités dépourvues de nappes exploitables.

#### Références bibliographiques

- [1] PDAIRE de l'agence du bassin hydraulique du LOUKKOS.
- [2] Lithologie et diagraphies des forages du système aquifère de Charf El Akab consultés auprès du secrétariat d'état chargé de l'eau et de l'environnement et d l'ONEP.
- [3] Thèse de *Loubani*, 1990

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

## Synthèse hydrogéologique et géophysique de la nappe Maamora en vue d'implantation de nouveaux forages

Ayach M., Kassou N., Kacimi I., Bahaj T. et Daghmoumi R.

\*Laboratoire d'Océanologie, Géodynamique et Génie Géologique Faculté des sciences Agdal-RABAT,

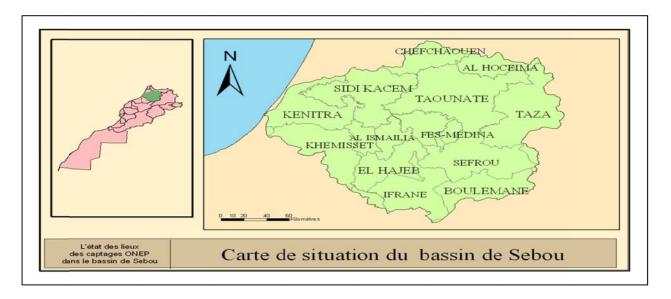
iliaskacimi@yahoo.fr

meryem.ayach1989@gmail.com - iliaskacimi@yahoo.fr - nadiakassou@yahoo.fr

#### **I-OBJECTIFS DE TRAVAIL**

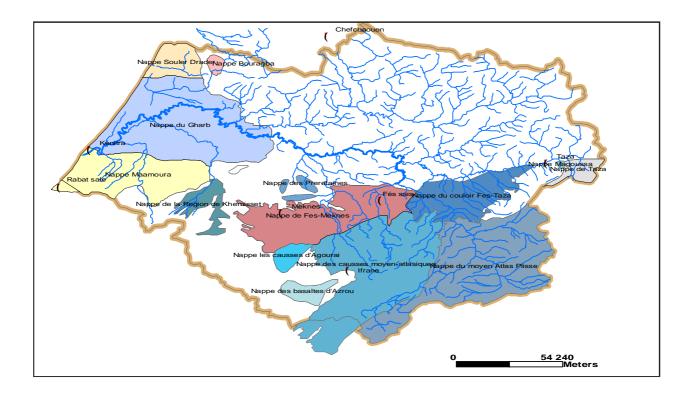
Pendant la dernière décennie le bilan de la nappe de la Maamora se présente comme déficitaire, ce qui était confirmé par la baisse du niveau piézométrique et surtout au niveau de la zone centrale de la nappe. Cette diminution est due à la baisse de l'alimentation de la nappe suite à la diminution des précipitations et à l'augmentation des sollicitations de cet aquifère. Cette problématique, nous a amené à faire une étude de dégagement des ressources en eau par l'implantation de nouveaux forages.

#### **II- INTRODUCTION**



Le plateau de la Maamora, qui fait partie de l'ensemble du bassin de SEBOU, d'une superficie de 1890 km² est délimité au Sud par le massif de la Meseta, au Nord par le bassin du GHARB. Pour assurer l'alimentation en eau potable de la région, on vise à faire une étude hydrogéologique et géophysique de la nappe qui nous permettra de connaître les localités ou on peut mettre de nouveaux forages.

)



### III- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA NAPPE MAAMORA

### III.1- Topographie de la région

La topographie de la région se présente comme une succession de collines et de vallées allongées parallèlement au rivage, l'altitude est relativement basse et ne dépasse pas 250 m.

### III.2- Climat et végétation

La Maamora est climatiquement homogène, dans sa plus grande partie, couverte d'une végétation arborescente, constituée principalement de chêne liège et d'eucalyptus dans sa partie nord. Malgré les conditions climatiques de plus en plus difficiles, la forêt de la Maamora continue à alimenter en matière première l'usine "Liège du Maroc" (à Salé) et "Cellulose Maroc" (à Sidi Yahya). La zone côtière fait l'objet d'importantes cultures maraîchères.

### III.3- Contexte hydrologique

Le réseau hydrographique de la Maamora est très peu développé. Il est représenté par quelques petits cours d'eau de direction SSW-NNE. Ces cours sont alimentés (dans leur partie amont) par la nappe de la Maamora par le biais de sources de faible importance. Les cours d'eau les plus importants sont : L'oued Tiflet, L'oued Smento, L'oued Fouarate et L'oued Tourza.

### III.4- Contexte géologique :

Le glacis de la Maamora est compris entre le massif ancien et tabulaire de la Méséta au Sud et la plaine subsidente du Gharb au Nord. Du Sud vers le Nord affleurent les terrains primaires (schistes et quartzites) recouverts progressivement par les assises marneuses du Miocène qui supportent elles mêmes des formations du Plio-Villafranchien et du Quaternaire (grès, cailloutis, sables et argiles). Ces dernières formations contiennent une nappe phréatique qui s'écoule, en raison de la disposition de la Maamora, vers le Gharb.

### III.5- Contexte hydrogéologique :

Le plateau de la Maamora, qui s'étend sur une surface de 2100 m, contient une nappe libre très importante qui s'étend sur une superficie d'environ 1820 km². Ses limites naturelles sont constituées par :

- L'Océan Atlantique à l'Ouest ;
- L'oued Beht à l'Est;
- Les affleurements des marnes miocènes au Sud ;
- Au Nord, la nappe est délimitée par une ligne de mise en charge au niveau de laquelle elle se subdivise en nappe phréatique moins importante et peu exploitée et une nappe profonde plus importante constituant le principal système aquifère de la plaine du Gharb.

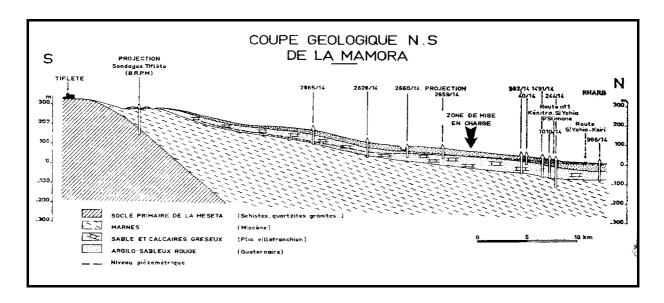


Figure n°3: Coupe des profondeurs du niveau de la nappe de la Maamora

La nappe peut être subdivisée en deux tranches. Une tranche avec des profondeurs variant entre 0 et 40 m qui représente la grande majorité de la nappe. Elle correspond à des zones très facilement accessibles à l'exploitation. Ces zones sont localisées essentiellement au centre, à l'Est et au Nord de

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

la Maamora au niveau de la ligne de mise en charge de la nappe. Il en est de même dans la zone côtière, dans les espaces interdunaires et enfin au niveau des vallées des oueds. Si ces zones sont intéressantes car elles permettent une exploitation facile de la nappe, elles constituent néanmoins des zones vulnérables qu'il faut protéger. Les exploitations et les champs captant actuels se situent effectivement en grande partie dans ces zones. A titre d'exemple, on peut citer la zone de Taicha.

L'autre tranche, où la profondeur de la nappe est supérieure à 40 m se situe de manière générale dans la partie Sud-Ouest de la Maamora où on note une protubérance avec des profondeurs atteignant 100 m.

#### III.6- BILAN DE LA NAPPE

Selon le type de données disponibles et l'objectif visé, plusieurs conceptions du bilan peuvent être envisagées. Le but étant de retrouver l'impact des exploitations sur la ressource moyenne en vue d'une planification à long terme, nous tenterons d'établir un bilan moyen. Ce bilan confronte des conditions d'exploitation récentes à des conditions d'apport moyennes sur une longue période:

ENTRÉES	Mm³/an
Infiltration des eaux de pluie	150
Retour d'irrigation	10
Entrées totales	160
SORTIES	
Sortie vers la mer	10
Déversement vers le Gharb	38
Drainage par l'oued Beht	7
Prélèvements AEP	42
Prélèvements par l'industrie	25 <sup>(1)</sup>
Prélèvements agricoles	50
Sorties totales	172
Bilan (Entrées-Sorties)	-12

Tableau 1 : les ressources en eau de la nappe de la Maamora

Le bilan de la Maamora est déficitaire. Cette conclusion est confirmée par la baisse des niveaux piézométriques surtout dans la région centrale de la nappe. Cette diminution étant due à la baisse de l'alimentation de la nappe suite à la diminution des précipitations d'une part, et à l'augmentation des sollicitations de cet aquifère d'autre part.

### IV- La Production et le bilan besoin en eau potable de la nappe Maamora

### IV.1- La production de la région

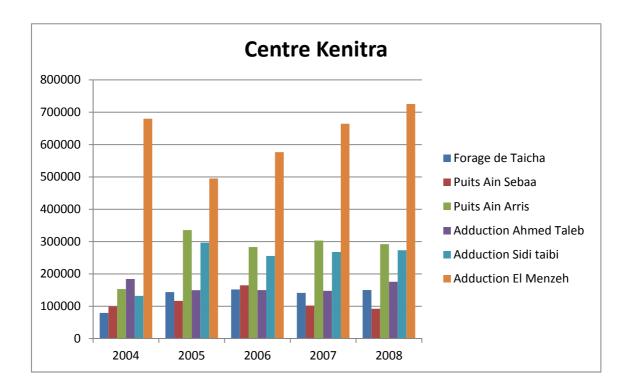


Figure 4 : la production au niveau de la nappe de la Maamora Etat de Février 2005

Après avoir étudié tous les points de la zone Kenitra. L'adduction El Menzeh présente le point de forte production par rapport aux autres points durant les Cinque ans (2004-2008), chose qu'on peut l'interpréter par un débit qui est très fort par rapport aux autres forages ou par la forte demande en eau au niveau de la région d'el Menzeh.

### IV.2- Le bilan besoin en eau potable

Le développement accéléré de la région de Kenitra fait que les besoins en eau augmentent d'une année à l'autre.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Le développement accéléré de la région de Kenitra fait que les besoins en eau augmentent d'une année à l'autre ; La comparaison entre la demande et la disponibilité des eaux, montre que la ressource actuelle couvre les besoins de la demande jusqu'en l'an 2030.

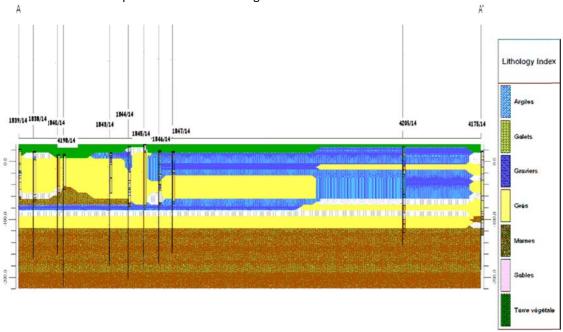
dduction	Centre	Années			Date de	
aduction		2010	2015	2020	2030	saturation
	Besoins en eau potable de pointe					
FOUARAT	en I/s					
	Pôle Kenitra					
	KENITRA	875	943	1025	1202	
	S. YAHYA GHARB	41	45	50	57	
	MEHDIYA	105	127	153	201	
	SIDI TAIBI	27	32	40	54	
	Douars SIDI TAIBI	10	15	20	40	
	Station Biladi Mehdiya		33	67	111	
	Medz à Kénitra		50	100	160	
	Total Besoins Pole Kenitra	1057	1245	1455	1825	
	RESSOURCES FOUARAT en I/s	1850	1850	1850	1850	
	Déficit en l/s	793	605	395	25	>2030
	POLE SALE					
	BOUKNADEL+Douars	59	78	92	114	
	Projet Plage des nations à Bouknadel		61	123	205	
	Tableau 2 : Bilan besoin en eau de la nappe de la Maamora					
	Ressources : Reliquat à/p					
	Fouarat	793	605	395	25	

### V- ETUDE HYDROGEOLOGIQUE ET GEOPHYSIQUE

### V.1- Etude Hydrogéologique :

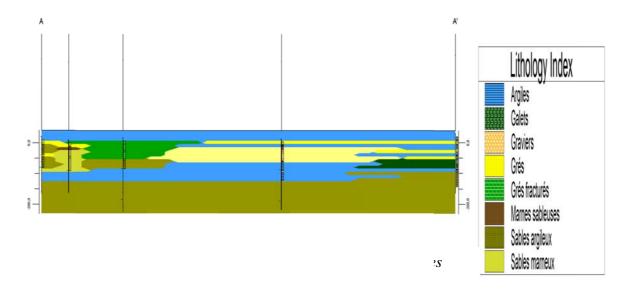
Pour bien étudier le cas, une base de données des forages et des puits a été établie sur SIG pour permettre la visualisation et la prise de décision en ce qui concerne l'exploitation et le dégagement de nouvelles ressources en eau dans cette zone et aussi dans le but de réaliser des coupes lithologiques et hydrogéologiques par

l'exploitation du logiciel Rockworks. Trois coupes géologiques traversant l'ensemble de la région ont été tracées en tenant compte des données de forages



### V.2- Etude géophysique

Une diagraphie consiste à mesurer, à l'aide de différentes sondes, les caractéristiques des roches traversées lors d'un forage. L'analyse des diagraphies, fournies par L'ONEP, avait pour objectif de différencier les formations du sol et du sous-sol ; leur traitement a permis ainsi d'élaborer des coupes stratigraphiques du bassin :



« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

#### **V.3- RESULTATS**

La zone est climatiquement homogène, et ses formations aquifères sont essentiellement de nature gréso-sableuse et d'âge Plio-Villafranchien; vers l'Est et des cailloutis quaternaires sont superposés à ces formations.

Les études hydrogéologiques ainsi que les études géophysiques entamées pour le dégagement de nouvelles ressources en eau pour le bassin de la Maamora ont montré que la nappe phréatique circule dans des grès, sables, galets et graviers et que l'ensemble repose sur un substratum imperméable formé par les marnes et/ou les argiles.

La profondeur de la nappe varie de 50 à 120m, tout ce qui précède permet d'identifier les zones d'implantation de nouveaux forages réservés à l'alimentation en eau potable

#### VI- CONCLUSION

Le plateau de la Maamora d'une superficie de 1890 km2 est délimité au Sud par le massif de la Meseta, au Nord par la Le plateau de la Maamora recèle une nappe phréatique libre circulant dans des grès calcaires, sables et sables argileux du Plioquaternaire. L'ensemble repose sur un substratum imperméable formé par les marnes du Miocène. Cette nappe fait partie de l'unité hydrogéologique connue sous le nom du bassin du Gharb-Maamora. Elle est la principale ressource en eau qui alimente la ville de Kenitra.

L'examen des termes du bilan hydraulique de la nappe de la Maamora montre l'importance des sorties (184 Mm3/an) par apport aux entrées constituées principalement par les infiltrations de pluies. Le déficit est de 9 Mm3/an

Il est également important de noter que la baisse continue de la nappe en zone littorale a engendré l'intrusion de 5 Mm3 d'eau salée dans l'aquifère. Certes, si aucune mesure n'est prise pour optimiser les pompages d'eau souterraine, le volume d'intrusion marine augmentera davantage compromettant ainsi, à terme la qualité des eaux de la nappe.

Par ailleurs, la demande en eau ne cesse de s'accroître face à une ressource en eau souterraine limitée et menacée par l'invasion marine.

Pour assurer l'alimentation en eau potable de la région, on a fait une étude hydrogéologique et géophysique de la nappe qui nous a permis de connaître les localités et les profondeurs où on peut avoir des nouveaux forages.

### Références bibliographiques :

[1]ABHS, 2010. Plan d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin hydraulique de Sebou

[2]ONEP, 2010. Bilan besoin en eau de la nappe Maamora

[3]ONEP, 2011. Données d'évolution de la production en eau potable de la région de Kénitra

[4]Thauvin J.P., 1966. Monographie hydrogéologique de la Maamora Notes et mem. Ser. Geol.n° 195, Maroc, 120p.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Caractérisation chimique et structurale des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine de Hammamet Tébessa NE Algérien

### F. Chelih<sup>1</sup>, C. Fehdi<sup>2</sup>

1- Université de Tébessa, Département de Géologie, Tébessa 12002, Algeria. <a href="mailto:fatha geo@yahoo.fr">fatha geo@yahoo.fr</a>
2- Université de Tébessa, Département de Géologie, Tébessa 12002, Algeria. <a href="mailto:fehdi@yahoo.fr">fehdi@yahoo.fr</a>

#### I. INTRODUCTION

La région étudiée (Massif de Djebel Es Senn, Troubia), situé au Sud-Ouest de la région de Hammamet, fait partie des domaines des hautes plaines de l'Est algérien aux confins algéro-tunisien plus précisément sur la zone de Nemmemcha (fig.1).

Cette région comprend une série stratigraphique qui s'échelonne du Trias au Quaternaire, abritant ainsi plusieurs aquifères dont le plus important est le Plio-Quaternaire, il est constitué par des dépôts très variés correspondant aux alluvions, limons, graviers, croûte de calcaire et calcaire lacustres, renfermant une nappe généralement libre (fig.3).

Sur le plan hydrogéologique, les aquifères sont alimentées par les massifs avoisinants, et à partir des accidents tectoniques orientés SW –NE, W-E.

Sur le plan tectonique, les massifs étudiés (Djebel Es Senn, massif de Troubia, Gaagaa, Bouziane, Bourouh, ...), affectées par des nombreux et importants accidents tectoniques d'orientation générale NE -SW, E-W, N-S, NW-SE.

#### **II.METHODE ET OBJET**

La reconnaissance de la surface piézométrique de la nappe, a été obtenue par l'inventaire de 14 puits implantés dans les alluvions, dans le cadre du réseau piézométrique de la région de Hammamet. La période d'observation piézométrique a régulièrement lieu de façon mensuelle. Ces mesures permettent d'établir des cartes piézométriques. L'interprétation de ces surface piézométriques nous permet de connaître la forme de l'écoulement de la nappe, le sens de l'écoulement général, la profondeur de la surface piézométrique et elles figurent également les conditions aux limites hydrodynamiques.

Une carte morphostructurale établie à partir des photographies aériennes (Echelle 1/25 000) (Fig .04) nous a permis de mieux comprendre la structuration complexe et particulière de la région de Hammamet. Cette analyse Couvrant la zone Est de la feuille de Hammamet a permis d'émaner de la région d'étude ainsi que son reflet sur l'organisation particulière des éléments morphologiques de celle- ci, et l'influence de cette fracturation en hydrogéologie.

Notre travail, ayant aussi pour but de déterminer les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du sous bassin de Hammamet, les méthodes d'échantillonnage et le matériel utilisé, les méthodes analytiques sont conformes aux recommandations de Rodier (1976 ; 1978) . Pour caractériser l'hydrogéochimie du système aquifère de Hammamet, le long des lignes d'écoulement, 13 puits ont été échantillonnés.

Les coordonnées des forages ont été utilisées pour réaliser la carte de répartition des forages à l'aide des logiciels, Surfer 8. Les coordonnées initialement exprimées en degré sont converties en Universel Transverse Mercator (UTM) exprimées en kilomètre.

Nous avons procédé à l'analyse du calcium  $(Ca^{2+})^r$  du magnésium  $(Mg^{2+})$ , du sodium  $(Na^{2+})$ , du potassium  $(K^+)$ , des sulfates  $(SO_4^{2-})$ , des chlorures  $(Cl^-)$ , des bicarbonates  $(HCO_3^-)$ 

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Nous avons également mesuré la température de l'eau (T), le pH et la conductivité électrique (CE), in situ à l'aide d'une valise multiparamètres de terrain dont la marque est Multi340i WTW. Par contre les autres analyses ont été faites dans le laboratoire de l'Université de Tébessa. Les flacons en plastiques de 1,5 litre ont été utilisés et transportés dans une glacière pour assurer leurs conservations et conditionnement.

La répartition spatiale des paramètres physico-chimiques, basée sur les résultats des analyses de mars-avril 2010, et en raison de la densité relativement importante des points, permet de mettre en évidence l'évolution de chaque élément et d'estimer l'origine des minéralisations.

#### **III. RESULTATS**

#### III.1 Piézométrie

Les données des relevées piézométriques ont permis de tracer la carte piézométrique de cet aquifère en cette période. Cette carte montre des courbes isopièzes dont l'altitude varie entre 800 m en amont et 690 m en aval (Fig.4).

Les isopièzes sont serrées dans la partie Sud et Sud-Est, surtout du côté de Djebel Es Senn, elles sont presque parallèles à la bordure qui est constituée essentiellement par des formations d'âge Turonien, traduisant ainsi une zone d'alimentation .Le rapprochement des courbes isopièzes donne un gradient hydraulique plus au moins fort.

L'écoulement souterrain se fait, en général, selon deux directions -Ouest -Est, et Sud-ouest - Nord Est avec deux axes de drainage qui coïncide sensiblement avec le parcours de l'Oued Serdiess et oued Boudiss.

L'écoulement des eaux souterraines présente une certaine convergence vers le centre de la plaine pour coïncider avec le tracé de l'oued Principal, ce qui justifie le renforcement de l'alimentation des eaux de surface par les eaux souterraines.

### III.2 L'analyse morphostructurale

L'analyse morphologique et structurale des massifs étudiés tend à confirmer l'existence des Structures favorisant la circulation des eaux et leur accumulation dans des réservoirs (aquifères).

Lorsque les plans de failles constituent, des zones de circulation préférentielles, on a observé ce modèle dans la plupart des failles dans les massifs étudiés, où la direction de circulation des eaux se fait parallèlement aux plans de failles (Fig.4)

Le meilleur exemple est le grand accident tectonique qui délimite le massif de Djebel Es Senn dans la bordure Nord et Sud et le grand accident de 2,1 km de longueur dans la partie Nord du synclinal de Troubia (photo 1), les plans de failles constituent, des zones de circulation préférentielles, démontre le double rôle : elles arrêtent les circulations, se faisant perpendiculairement à leur direction et barrent le réservoir en même temps qu'elles drainent ses eaux, d'après Vu T. Tam & Okke Batelaan (A multi-analysis remote-sensing approach for mapping groundwater resources in the karstic Meo Vac Valley, Vietnam).

### **III.3 Hydrochimie**

L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur qualité de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation .Elle permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec la géologie et la piézométrie.

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Le report des résultats des analyses des eaux de la région d'étude sur le diagramme triangulaire de Piper (Figure.5), ce diagramme met en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux, il permet aussi d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification.

Dans le diagramme des anions, on distingue que les points d'eau forment pratiquement un seul grand groupe, proche du pôle chloruré.

Dans le diagramme des cations, on distingue deux groupes, l'un proche du pôle calcique Et l'autre est représenté au milieu du triangle ne présentent pas de dominance.

La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend de la nature lithologique de l'aquifère et des conditions de recharge.

Le diagramme de Schoeller et Berkallof, nous portons sur un semi logarithmique les quantités en réactions des anions et des cations sur l'axe des ordonnées et sur les abscisses les éléments chimiques à pas régulier, et ceci pour chaque point d'eau de prélèvement.

Le diagramme est tracé pour la période d'étude (figure.6), confirme principalement

A un faciès chloruré sulfaté calcique et magnésienne, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions Cl, SO4, Ca, Mg ou on observe un faciès chloruré calcique et aussi sulfaté calcique et magnésien.

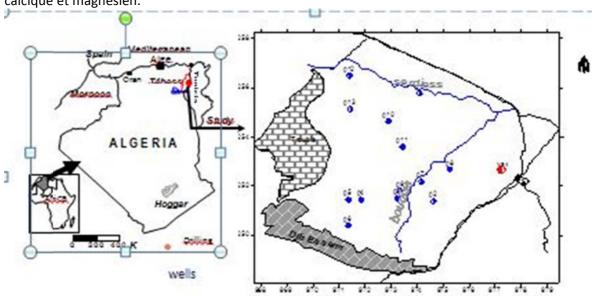
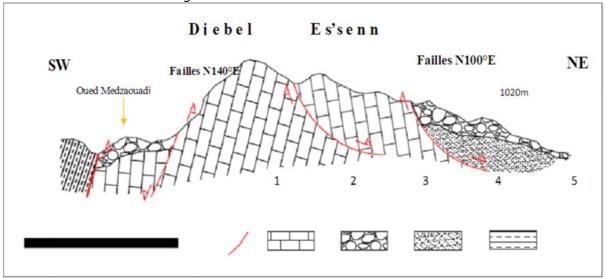


Figure 1 - Localisation de la zone d'étude



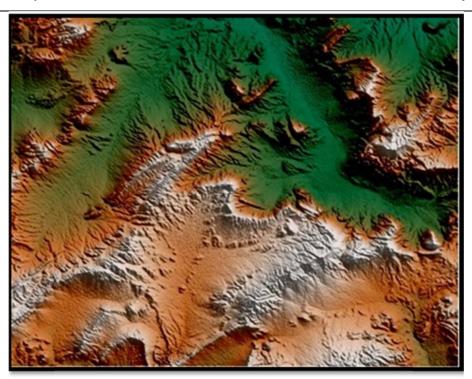
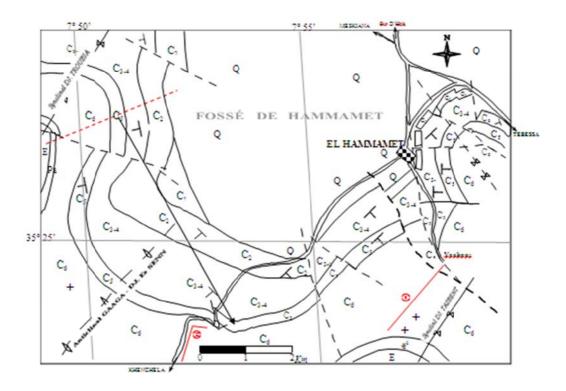


Figure 2- Situation topographique de la zone d'étude



recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

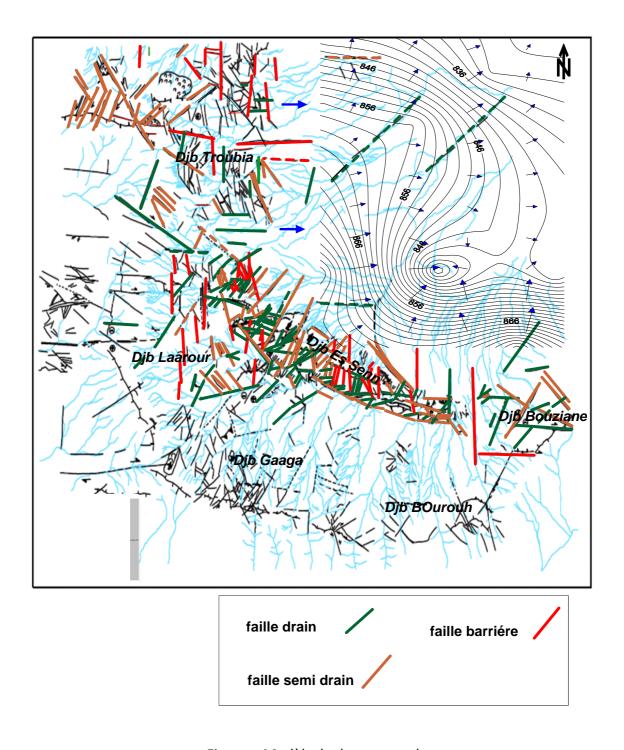
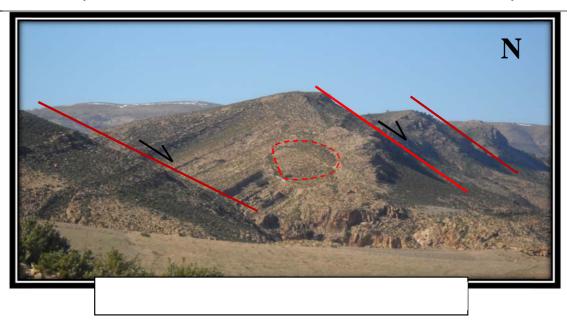
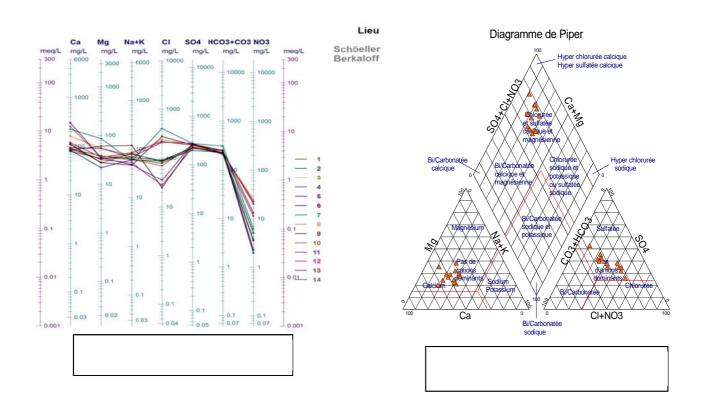


Figure - Modèle hydrostructural





### **IV. CONCLUSION**

L'alimentation se fait à partir des bordures calcaires de Dj Es Senn au Sud, et Dj Troubia à l'ouest. Le traitement des données chimiques des eaux de la région d'étude montre que les eaux souterraines de la région, à travers les différentes analyses, présentent des teneurs inférieurs aux normes excessives fixées par l'OMS. Il s'agit, en fait, d'une eau chimiquement potable.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### Références bibliographiques

Appelo Caj, Williemsen A, Beekmanhe, Grippioen 1 (1990) Calculations and observations on salt water intrusion, II. Validation of a geochemical model with laboratory experiments. J Hydrol.120:225-250

ARNAUD .CH . 2007 : L'aquifère karstique de Fourbanne.Etude du comportement hydraulique et mécanique à partir de l'hydrogéochimie.Direction de l'environement France.

Chelih .Fatha (2012) Rôle et caractéristique des calcaires d'âge Turonien dans l'alimentation du champs captant Chabro, Hammamet .Tébessa . Memoire de Magister , Université de Tébessa

Djabri L (1987) Contribution to the hydrogeological study of the subsidence plain of Tebessa NE Algeria. Attempt of modeling. Doctorate Thesis, University of Franche Comté, France.

Fehdi Ch. Rouabhia Aek. Baali F **(2008):** The Hyd0rogeochemical characterization of Morsott-El Aouinet aquifer, Northeastern Algeria. Environmental Geology, Springer-Verlag, Berlin; Heidlerg. DOI 10.1007/s00254-008-1667-4

Rouabhia Aek. Baali F. Fehdi Ch. **(2009):** Impact of agricultural activity and lithology on groundwater quality in the Merdja area, Tebessa, Algeria. Arab Journal of Geosciences, Springer-Verlag, Berlin; Heidlerg. DOI 10.1007/12517-009-0087-4

Todd K. (1980): Groundwater hydrology. Seconde Edition. New York, J.Wiley & Sons, 510 pages.

Vu T. Tam & Okke Batelaan 2011 A multi-analysis remote-sensing approach for mapping groundwater resources in the karstic Meo Vac Valley, Vietnam.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

### Modélisation d'un aquifère alluvial en zone hyperaride : Cas de la nappe de la palmeraie de Béni Abbes (Vallée de la Saoura, Sud Ouest algérien).

T. Merzougui<sup>12</sup>, A. Bouanani<sup>2</sup>, K.Baba-Hamed<sup>2</sup> et O. Khaddoum<sup>3</sup>

### 1. Introduction

L'eau souterraine cette composante invisible du cycle de l'eau, joue un rôle majeur pour l'homme et les milieux, surtout en zones arides et hyperarides. Elle représente la seule ressource hydrique pour les oasis de la vallée de la Saoura, d'approvisionnement en eau potable, une source majeure pour l'irrigation (primordiale en zone hyperaride) et l'usage industriel

Les nappes d'eaux souterraines en zone aride ou hyperaride ont des caractéristiques hydrogéologiques classiques, leurs conditions de réalimentation et d'exploitation induisent des problèmes particuliers dont on doit tenir compte lors de leur modélisation.

Implantées au pied du grand erg occidental et le long de la vallée de la Saoura, se sont développées des oasis, bénéficiant de résurgences d'eau et particulièrement sous forme de sources à fort débit, qui permettent de maintenir des palmeraies favorables à la production et à l'alimentation des besoins humains.

Une modélisation hydrodynamique de la nappe de la palmeraie va permettre de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère en estimant les échanges latéraux de la nappe alluviale avec la nappe de l'erg et l'oued Saoura.

### 2. Situation géographique de Béni Abbés :

L'oasis de Béni Abbès est une commune d'environ 12000 habitants, située dans le Sud Ouest Algérien (fig.1), à un point d'élargissement de cette longue et étroite vallée par l'Erg Occidental à l'Est et la chaîne d'Ougarta à l'Ouest, elle représente la plus importante Oasis dans la vallée de la Saoura. Elle se trouve à 245 km de Bechar et 357 km d'Adrar.

La région de Béni Abbès fait partie de la vieille plate-forme Saharienne, caractérisée par un climat hyperaride et une faible pluviométrie estimée à 33 mm/an. Cette oasis est constituée d'une palmeraie, localisée sur les terrasses, d'une superficie de l'ordre de 40 hectares.

La commune de Béni -Abbés occupe une superficie totale de 10040 km², ce qui représente 6% de la superficie de la wilaya de Béchar, elle est traversée du Nord au Sud par Oued Saoura formé des Oueds Zousfana et Guir, qui se rejoignent à Igli.

### 3. Hydrogéologie:

L'oasis de Béni Abbès est implantée construitée sur un plateau de 500 m d'altitude, appartient à la plate forme saharienne (fig. 1). A l'échelle régionale, cette région se rattache aux monts d'Ougarta, constitués d'une gamme de terrains très variés, allant du Précambrien à l'actuel (Menchikoff, 1933; Alimen, 1957).

<sup>1 :</sup> Agence nationale des ressources hydraulique- secteur -Bechar. BP 63 Hai El Feth 08018 BECHAR Email : touhamime@yahoo.fr

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Labo25, Faculté SNVSTU, département des sciences de la terre, BP. 119, Université de Tlemcen, Tlemcen 13000

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>: Faculté des Sciences, département des sciences de la terre, Université d'Oran, Algérie, 31000.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Géologiquement la région est constituée d'un substratum paléozoïque surmonté par des formations tertiaires (Hamada) qui reposent en discordance sur cette dernière, puis viennent les formations du Quaternaire.

Figure. 1 : Situation géographique de l'Oasis de Béni Abbès.

### 3. 1 Fonctionnement du système aquifère

Le sous-sol de la région de Béni Abbès contient des ressources d'eau souterraine non négligeables. Il renferme un système d'eaux souterraines diverses et interconnectées dont la vallée de la Saoura est considérée comme étant le cordon ombilical.

La nappe du grand erg occidental, hydrogéologiquement bien définie, et la plus ample, elle est alimentée par les oueds septentrionaux, principalement par les eau de surface de l'Atlas Saharien. La grande source, dite usuellement «source de Sidi Othmane », capte les eaux souterraines de cette nappe, avec un débit de 26 l /s à 33 l/s (Roche, 1973 ; Merzougui, 2005), elle assure un rôle double, l'alimentation en eau potable, et l'irrigation de la palmeraie. Elle représente à cet endroit exutoire par excellence de cette nappe.

<u>La nappe du Hamada du Guir</u>, se rattache aux dépôts calcaires lacustres du Tertiaire alimentée par les rares eaux météoriques dont l'aquifère correspond aux calcaires locustes, à capacité hydrique faible

<u>Les nappes des formations paléozoïques</u>, peux explorées, vraisemblablement, elles constituent un système multicouches, ces nappes sont alimentées partiellement par les eaux météoriques et la vallée de la Saoura.

<u>Les nappes des terrasses alluviales et d'inféro-flux</u>, constituent un type particulier de nappes, formées par les grands épandages de sables et graviers (terrasses alluviales) étagées de la Saoura, connus sous les noms du Saourien (Pléistocène Supérieur) et du Guirien (Holocène).

### 3. 2 Géométrie de l'aquifère

Les terrasses alluviales étendues dans la palmeraie et l'oued Saoura, contiennent des sables argileux et des graviers et constituent l'aquifère alluvial de la palmeraie.

La stratigraphie de quelques puits dans la palmeraie (fig. 2) indique la variation de l'épaisseur (10-20 m) des terrasses (formations plus ou moins homogène dans l'ensemble), où elle peut atteindre le substratum dévonien à 20 mètres dans le lit mineur de l'oued Saoura qui représente le centre du remplissage alluvionnaire. Le mur imperméable de la nappe est constitué par les schistes rouges du Dévonien.

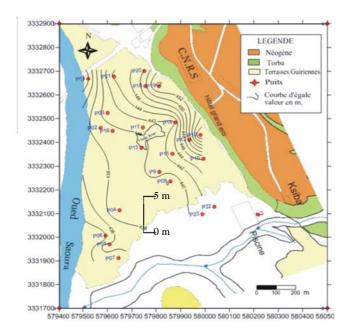


Figure 2 : Présentation du mur du Quaternaire.

### 3. 3 Piézométrie de la Nappe alluviales de la palmeraie

La carte piézomètrique réalisée en 2008 (fig. 3) est presque identique de celle- établie en avril 1991 (Fig. 4). Elle présente un écoulement général NE/SW.

Les apports à la nappe proviennent de de la dalle hamadienne (15 l/s), les eaux transitent par un drain naturel et par les seguias, tout au long du talus et des eaux de la grande source (11 l/s) après passage par la piscine municipale, soit un débit totale de 26l/s.

Le gradient hydraulique varie entre  $2 \cdot 10^{-2}$  ou  $5 \cdot 10^{-2}$ . Avec une moyenne de  $3 \cdot 3 \cdot 10^{-2}$ , pour l'ensemble de la palmeraie.

La profondeur moyenne du plan d'eau par rapport au sol est de l'ordre de 2 à 10 m.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

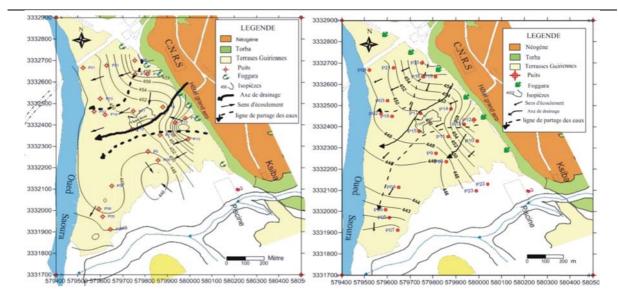


Figure 3: piézométrie de référence Avril 1991

Figure 4: piézométrie initial Avril 2008

#### 4. MODELISATION NUMERIQUE

Pour la discrétisation spatiale, nous avons placé sur 1 Km² de la zone, un maillage carré uniforme de 25 m de côté, dont 800 mailles sont actives (Fig. 5)

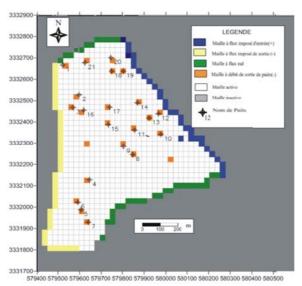


Figure 5: Discrétisation et conditions aux limites du modèle.

### 4.1. Conditions aux limites

Le remplissage alluvionnaire de la palmeraie de Béni Abbés a été étudié dans sa globalité, il peut être considéré comme monocouche pour le modèle. Les formations néogènes sont représentées par

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

la falaise hamadienne du grand erg occidental, dans le coté Est, à l'ouest le remplissage est limitée par les formations néogènes de la hamada de Guir ;

Les conditions aux limites suivantes ont été imposées (fig.)

- A L'est : une limite à flux imposé d'entrée (alimentation de l'erg),
- A l'ouest : une limite à flux imposé de sortie (oued),
- Au sud et au Nord : une limite à flux imposé nul
- Par ailleurs les débits de sortie en continu ont été imposés aux mailles où existent les pompages.

Les foggaras fournissent un débit de suintement moyen de 0.05 l/s avec un total de 0.5 l/s.

La grande source fournit pour l'irrigation de la palmeraie un débit moyen déversé en continu voisin de 11l/s, ce qui représente un recharge de 0,26 l/s /ha.

Tableau 1 : débit d'exploitation et évaluation de la ressource

### - Conditions de niveau liées à la piézomètrie

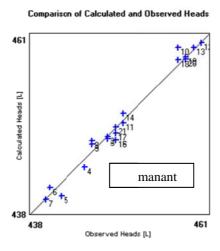
Il s'agit dans ce cas-là de condition de débit imposable. On se contentera d'afficher une infiltration sur tout le domaine à modéliser estimée à 30 % de l'apport total estimé à 10l/s : de la seguia de la grande source, des foggaras actives et l'inféro- flux de l'oued saoura.

Nous avons introduit le nombre de puits et leur débit d'exploitation d'après les données disponibles (inventaire 2008). Le débit total prélevé en 2008 et de 0.052 m³/s, ce débit est estimé à partir des informations recueillies auprès des utilisateurs

#### 5. Calibration du modèle et vérification

#### 5.1 Calage en régime permanent

L'état de référence retenu pour caler le modèle en régime permanant est la piézométrie de 1991. La comparaison entre les potentiels calculés et mesurés (Hc-Hm)) pour les vingt et une mailles d'observation, montre que le nuage de points est bien situé autour de la droite définie par l'équation Hc=Hm(Fig.6)



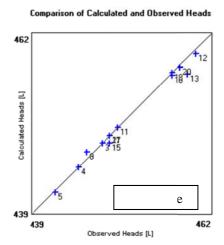


Figure 6 - Piézométrie mesurés et calculé après calage du modèle en régime permanent

### 5.2 Calage en régime transitoire

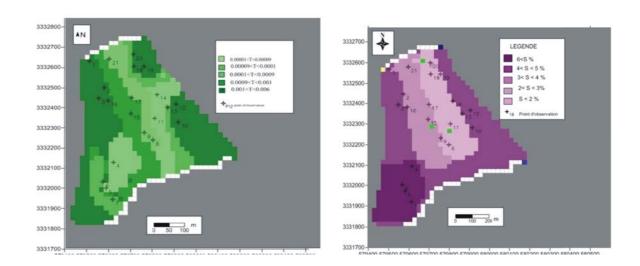
L'objectif principal de cette étape de la modélisation hydrodynamique en régime transitoire par la méthode des différences finies permet de caler le coefficient d'emmagasinement (Fig 7)et d'appréhender l'évolution de la piézomètrie suite à des perturbations multiples variables (débits

extraits, l'infiltration efficace...). La phase de simulation considérée s'étant d'avril 1991 à avril 2009 et correspond à une période de moyenne eaux.

### 5.3 Bilan de la nappe

**Tableau 2:** Bilan de la nappe calculé par le modèle en régime transitoire.

	Input (m 3/s)	Output (m 3/s)	IN-OUT (m 3/s)
STORAGE	1.068625E+01	1.101592E+01	-3.296690E-01
CONSTANT HEAD	8.199019E-01	5.111691E-01	3.087328E-01
WELL	7.999851E-03	9.203774E-02	-8.403789E-02
BOUNDARY FLOW	1.409520E-02	0.000000E+00	1.409520E-02
RECHARGE	7.445569E-02	0.000000E+00	7.445569E-02
TOTAL	1.160270E+01	1.161912E+01	-1.642323E-02



a) Carte de transmisivité

b) carte de coefficient

d'emmagasinement

**Figure 7:** Carte des paramètres hydrodynamiques adoptés pour le calage du modèle en régime permanent.

Le calage du modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère. La zonation de ce paramètre coïncide avec la nature géologique et l'épaisseur de l'aquifère.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### 6. RESULTATS ET EXPLOITATION DU MODELE

Après avoir calé le modèle hydrodynamique, il apparaît intéressant de réaliser quelques simulations afin de pouvoir estimer les potentialités en eaux souterraines de la nappe de la palmeraie de Beni Abbés.

Quatre scénarios de simulation ont été testés (Fig.8) :

### 6.1. Première simulation, exploitation sur une période de 20 ans

Cette simulation présente une exploitation de la nappe avec le même régime actuel. Les résultats de cette première simulation montre une baisse du plan d'eau de plusieurs mailles situées au sud de la palmeraie du au pompage important dans cette zone. (fig. 8)

#### 6.2 Deuxièmes simulations

La création d'un barrage souterrain à l'ouest de la palmeraie, sur toute la longueur de l'aquifère la limite de l'oued sur 400 de largeur et une hauteur de 10 m. La digue sera située à un mètre audessous de la surface du sol (fig. 8)

La simulation réalisée sur 10 ans, en maintenant le même régime d'exploitation montre une remontée du niveau d'eau d'une moyenne de 2 à 3 m au centre de la palmeraie et au Sud avec une légère diminution à l'Ouest (Fig. 8)

#### 6.3 Troisième simulation

Nous avons supposé une recharge artificielle de l'ordre de 28 l/s par les eaux usées traitées, que nous injectons dans neuf puits et une recharge de tout le domaine modélisé, en présence du barrage souterrain. La piézométrie représentant la variation des rabattements montrent une augmentation considérable du plan d'eau de la nappe. Par contre le deuxième scénario, avec la recharge artificielle dans tout le domaine maintient la même hauteur du plan d'eau que le régime transitoire.(FIG. 8)

### 6.4 Quatrième simulation

Cette simulation visualise les scénarios sans barrage avec recharge artificiel ou recharge ponctuel. Les scenarios sont effectués sur une période de 20 ans en 2020.

1. Un premier scénario avec recharge artificielle:

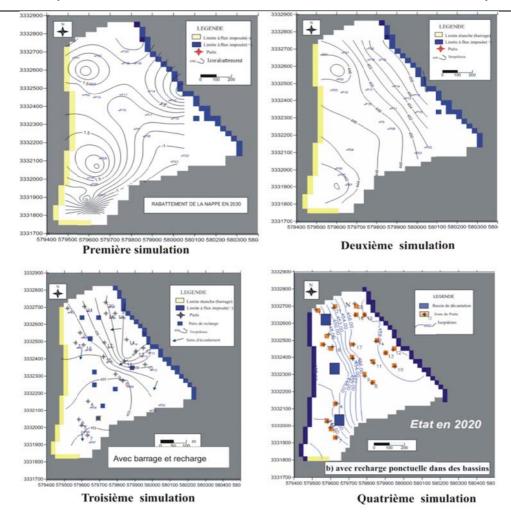


Figure - Cartes piézométriques pour différentes simulation

Une recharge artificielle sur le domaine modélisé, les résultats de ce scénario montrent une stabilité du plan d'eau de la nappe, aucun changement dans l'ensemble du comportement de la nappe.

#### 2. <u>Un deuxième scénario avec recharge par bassin (étang) :</u>

La recharge ponctuel dans trois étangs de décantation d'une surface de 400 m², implantées dans les zones dégradées à l'Ouest de la palmeraie, sur dix ans provoque une remontée remarquable de la nappe de la palmeraie, particulièrement près des étangs de recharge comme le montre la figure 9.

#### 3. c) Avec recharge et sans barrage

La meilleure solution c'est de construire des bassins de décantations avec de l'argile, qui seront remplis de sable de dunes du grand erg occidental et de gravier, d'un volume de 400 m³ chacun. Ces bassins seront implantés dans les zones dégradées des terres de la palmeraie. L'objectif de ces étangs, est de servir de surface d'épandage des eaux usées épurées pour une recharge artificielle de la nappe. Cette eau usée déjà épurée subirait une autoépuration d'une part, et ferrait diminuer la salinité des eaux dans cette partie de l'aquifère endommagée.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

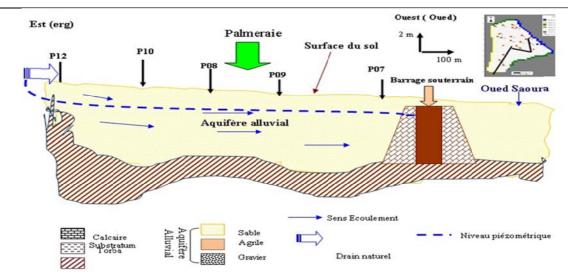


Figure 9: coupe schématique transversal de l'aquifère alluvial avec barrage souterrain.

#### **CONCLUSION**

Les conditions climatiques et pédologiques de la plaine alluviale de la palmeraie sont à l'origine d'une exploitation intensive des eaux souterraines à des fins la modélisation de la nappe de la palmeraie de Béni Abbés nous a permis de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère, en estimant l'alimentation latérale de la nappe et la recharge par infiltration efficace puis l'influence des prélèvements par pompage sur l'écoulement souterrain, ainsi que d'identifier et d'analyser grossièrement le comportement du niveau piézométrique.

Quatre scénarios de simulation ont été exécutés, une exploitation avec le même régime sur 20 ans, une recharge artificielle par épandage des eaux usées après traitement, la construction d'un barrage souterrain, et une recharge avec barrage.

L'exploitation du modèle par la réalisation des scénarios nous a permis de définir le comportement futur de la nappe en cas d'une surexploitation, et en cas de la recharge artificielle par les eaux usée traitées qui peuvent être une solution plausible pour palier au problème de salinité des eaux de la nappe de la palmeraie

Ce modèle numérique présente un outil de base de gestion et de prévision dons l'objectif d'une gestion intégrée de la ressources en eau souterraine en zone hyperaride afin de garantir un développement durable dans les écosystèmes oasiens.

### Références bibliographique

Alimen H, 1957- Tertiaire et villafranchien au Sahara nord-occidental. C R .Soc Géol Fr, pp 238-40.

Baba Hamed K., et all, 2005- Modèle transitoire de la plaine des alluvions de la plaine d'Hennaya (Tlemcen, NW-Algérie) le journal de l'eau et de l'environnement, ENSH Blida *p7-p17*.

Blondel T., 2002 - Modélisation numérique avec Visuel Modflow v. 3.0. Rapport Cabinet Conseil Blondel.

Bonnet M., 1983 - Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie BRGM., Orléans.

GTZ Coopération Technique Algéro-Allemande, 2006 - gestion intégrée des eaux oasis de Béni Abbès atelier de restitution et d'évaluation, rapport interne

Kabour. A ,2005- Contribution à l'étude hydrogéologique de bassin versant de Cheria, (Sud-Ouest Algérie et essai de modélisation de la région Sud, mem. Magister, U Batna. *170p*.

Kouane .K.J. et al, 2008 - Grondwater modellling and implication for groundwater protection: Case study of the Abidjan aquifer Cote d'Ivoir (in Applied droundwater studies in Africa: seum MA Adelana et Alan M. MacDonald N° 13, chapitre 27, pp458-472)

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

Mansour H., Safa A. et Bekhedda B., 1998- La flexure Sud Atlasique et son rôle hydrodynamique dans la réalimentation de la plate-forme Saharienne à Béni Ounif. Journées d'étude sur les zones arides, retroperspectives, enjeux et réalités. Adrar.

Laurence C. et De Marsily G. (2007) Aquifer systems management: Darcy's legacy in a world of impending water Shortage, edition Tayor et Francis Chapter 20, pp 269-279.

Merzougui T et all, 2008 - Un modèle de gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyperaride : Cas de l'oasis de Béni Abbès (Vallée de la Saoura, sud-ouest algérien), 13e Congrès Mondial de l'Eau, 1-4 septembre, Montpellier, France

Roche MA, 1973- Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord-occidental). Paris: Publ CNRS, série Géol,; 91p.

Scholler H, 1945- L'hydrogéologie d'une partie de la vallée de Saoura et du grand d'erg occidental, bull, soc, géol.fr.5 .T.XV, page 563-585.

Roche MA. (1973) Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord occidental). Paris: Publ CNRS, série Géol, 91p.

Yousfi N et Ait-Ahmed C, 1992 - Contribution à l'étude hydro-géologique de la Grande Source et de la palmeraie de Béni-Abbès (Sahara occidental). Memoire Ing Etat, Univ Sci Tech d'Oran-Algérie, p 44.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

# Caractérisation Géophysique et modélisation Tridimensionnelle des aquifères SW du bassin du Gharb (Maroc NW)

A.Mansouri<sup>1</sup>, A.Mridekh<sup>2</sup>, I. Kacimi.<sup>1</sup>, N. Kassou<sup>1</sup> et T. Bahaj<sup>1</sup>

- 1- Laboratoire d'Océanologie, Géodynamique et Génie Géologique Faculté des sciences Agdal-RABAT,
- 2- Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences et Techniques Errachidia, Boutalamine Errachidia.

iliaskacimi@yahoo.fr

### **INTRODUCTION**

La plaine du Gharb est à fort potentiel hydrogéologique à l'échelle Maroc. Elle est Située au Nord-Ouest du Maroc, elle s'étend sur une superficie de 4000 km². elle est connue, par le style alluvial des dépôts et le caractère très hétérogène de ses aquifères. La frange côtière de ses aquifères est, en outre, compliquée par les effets des variations du niveau marin au cours du Plio-quaternaire. Afin de mieux comprendre son potentiel hydrogéologique, les nouveaux outils informatiques offrent de nouvelles possibilités de visualisation, de croisement et d'analyse des données acquises par différentes méthodes. L'exploitation des données géoélectriques dans un S.I.G a permis de montrer que les corps sableux (résistants électriquement) se répartissent dans de larges dépressions dont les limites sont pour la première fois bien établies (Kénitra-Beht Ouest et Oued Touirza).

#### I. CADRE GEOLOGIQUE

Le bassin du Gharb est situé à la limite de deux domaines structuraux: mésétien méridional et rifain septentrional (figure 1). Il se présente en vastes plaines alluviales de la partie inférieure de l'Oued Sebou qui correspond à une dépression dissymétrique (Cirac, 1985). Sa structure actuelle est intimement liée aux mouvements tectoniques dont le Rif était le siège (Piqué et Michard, 1989) et aux mouvements épirogéniques du socle mésétien (Thauvin, 1966; Michard, 1976). Ces événements tectoniques sont contemporains aux mouvements eustatiques très actifs au Miocène terminal, Pliocène inférieur et Plio-Villafranchien. Le bassin est subsident depuis le Vindobonien moyen et son affaissement a persisté depuis le Quaternaire jusqu'à l'Actuel (Combe, 1975; Cirac, 1985). Au Pliocène, le bassin se présente en forme de golf dont les limites sont parallèles au front sud rifains et à la limite mésétien pénaplanée. Au Pliocène supérieur, à l'instar du reste du pourtour méditerranéen, le bassin du Gharb est sous l'effet d'une phase tectonique compressive majeure (Cirac, 1985); en parallèle, une sédimentation continentale marque le centre du bassin alors que sur les bordures, notamment à l'Ouest, la sédimentation est essentiellement formée de calcaires bioclastiques. Au Villafranchien, la structure du bassin côtier se précise avec l'installation de dunes côtière en forme de cordons (Michard, 1976; Cirac, 1985; Aberkan, 1989; Flinch. 1993).

#### II. BASE DE DONNEES ET METHODOLOGIE

Le bassin du Gharb a fait l'objet de plusieurs compagnes de reconnaissance par forages et des études de reconnaissances par divers méthodes géophysiques. Dans ce travail nous avons effectué une synthèse des études géologiques, hydrogéologiques et une réinterprétation des données géophysiques antérieures et ce dans le but de construire le model 3D des aquifères de la zone côtière du Gharb. Une base donnée sous SIG a ainsi été construite. Elle comporte 260 forages et 40 coupes géophysiques de direction NW-SE construites à partir de l'interprétation de 1150 sondages électriques où les données techniques relatives aux faciès géologiques et hydrogéologiques sont disponibles (une partie de ces données est visible sur la figure 2). Ces données nous ont été gracieusement fournies par l'Administration de l'Hydraulique (ADH) et l'Office National de l'Eau Potable (ONEP).

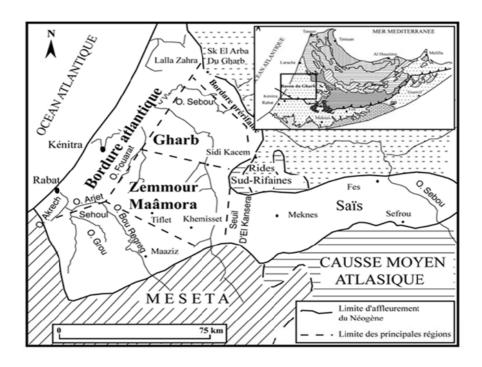


Figure 1 : situation géographique et contexte géologique de la zone d'étude dans le cadre du bassin du Gharb.

La méthodologie adoptée consiste en une de méthodes spécifiques de traitement des coupes en plus des méthodes de géoréférencement classiques des cartes. Les méthodes spécifiques concernent aussi l'intégration des données géophysiques (Résistivité), le relevé des valeurs au toit des horizons géoélectriques et les cordonnées des différents sondages. L'analyse préliminaire des données comporte la construction des coupes dans des directions différentes de celles initialement établies, des coupes stratigraphiques sériées ainsi que la construction du model 3D des aquifères côtiers.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

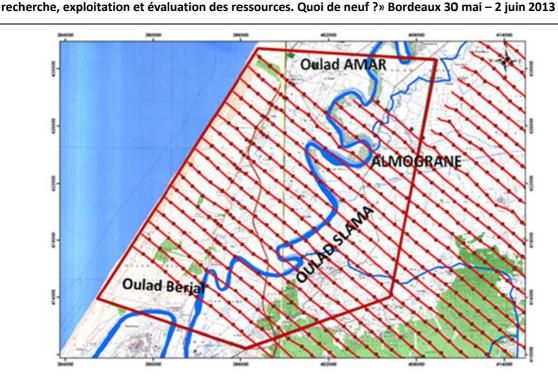


Figure 2 – Eléments physiographiques et lignes utilisées dans ce travail

#### III. RESULTATS ET DISCUSSION

### a. Lithostratigraphie et Niveaux Géoélectriques

La sédimentation dans le bassin est la conséquence de l'instabilité de la marge méridionale prérifaine et le mouvement de basculement dû à la surrection de la chaîne rifaine. Ces événements exercent une influence majeure sur l'organisation de plusieurs systèmes hydrogéologiques du bassin du Gharb-Maamora (El Mansouri, 1999). Le cadre lithostratigraphique des bassins côtiers du Gharb est présenté par corrélation entre lithofaciès et éléctrofaciés. Ceci nous a été possible, par le faite que plusieurs coupes géoélectriques ont été effectuées sur des forages mécaniques, ce qui nous a permis des corrélations de faciès lithologiques aux niveaux géoélectriques (figure 3 A et 3 B).

La série sédimentaire débute à la base par le dépôt d'une puissante séquence marneuse de plusieurs centaines de mètres d'âge Miocène terminal (Cirac, 1985), qui constitue le substratum, représentée par des valeurs de résistivité avoisinant 5 ohm.m. Elle est surmontée par une unité géoélectrique (unité géoélectrique 1, tableau 1) dont les valeurs de résistivités varient de 10 à 400 ohm.m. Cette unité est composée d'argile sableuse, de sable argileux, calcaire et sable d'âge pliocène inférieurmoyen (figure 3 A et 3C).

Ces niveaux sont surmontés par des sables à matrice carbonatée ou des argiles sableuses de résistivité variant entre 10 à 200 ohm.m de l'unité 2 (tableau 1) d'âge pliocène supérieur. Cette valeur est atteinte au niveau des dunes côtières (figure 2, 3 A et tableau 1).

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

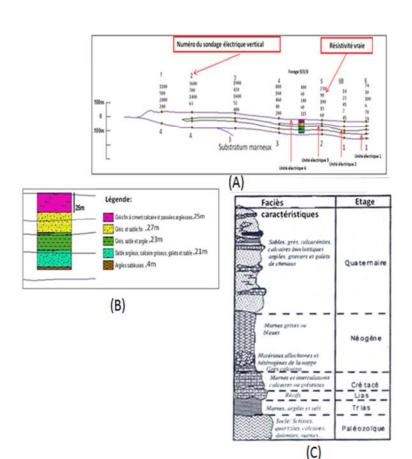


Figure 3 : Coupe géoélectrique corrélée à un forage mécanique (923\8) (A), détail des unités géoélectriques corrélées au forage (B) et coupe lithologique synthétique de la zone étudiée (C).

La séquence du Pliocène supérieur au Villafranchien est représentée par des calcaires bioclastiques, des sables à matrice carbonatée et par des lentilles de cailloutis (figure 3 C). Dans la zone côtière, régionalement, on note une augmentation de la granulométrie en allant de la base vers le sommet (Cirac, 1985). Elles s'expriment par niveaux de fortes résistivités pouvant atteindre 3600 ohm.m (tableau 1), valeur qui passe au centre de la zone côtière à une moyenne de 100 ohm.m.

ere a une moyenne de 100 omn.m.				
Unités géoélectriques	La rive droite de	Axe du chenal	La rive gauche	
	l'Oued Sebou		de l'Oued	
Substratum	3	5	1	
1	10 à 160	55	150	
	10 à 50		30	
	60 à 400			
2	200	14	30	
3	100 à 700	40	4	
4	1000 à 3600	Zone sans dépôt	10 à 60	

Tableau 1 : Valeurs de résistivités (en ohm. m) des unités géologiques de la zone d'étude.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

### b. Coupes sériées géoélectriques et géologiques des directions NW-SE :

Nous reportons dans ce qui suit une analyse comparée des coupes géoélectriques et géologiques de la zone côtière, ceci compte tenu de l'échelle de résistivité cité ci-dessus (figures 4 B et 4 C et tableau 1).

Sur les transversales géoélectriques NW-SE, parallèles aux coupes originalement introduites de direction NW-SE (figure 4 B), les unités géoélectriques identifiées montrent des comportements variables de l'Ouest vers l'Est (figures 4 B). Ainsi, l'unité géoélectrique 2 (varie entre 14 et 200 ohm.m) montre sur la transversale 3 un important épaississement au centre et une réduction vers les bordures. Au point de vue lithologique cette unité est attribuée à l'interval d'âge pliocène inférieur (figure 3). La valeur de résistivité relativement élevée de la rive droite de l'Oued Sebou (tableau 1) montre que dès cet âge une différentiation s'est opérée à l'intérieur même de l'aquifère côtier. La formation sableuse représentant l'axe du chenal migre du SE sur la transversale 4 (figure 5A) et au NW sur la transversale 2 (figure 5 B et C). Les unités 3 et 4 présentent une épaisseur maximale au NW sur les transversales 2 et 1, une épaisseur constante sur la transversale 3 et un épaississement au centre sur la transversale 1. Elle représente la tendance générale des unités plio-Villafranchien (figure 4B).

### a. Modèle géoléectriques et géologique de la zone côtière du Gharb :

La géométrie tridimensionnelle des aquifères côtiers du bassin du Gharb peut être visualisée par confrontation de deux types de données qui se complètent; les coupes géoélectriques et les corrélations des forages hydrogéologiques. Les possibilités que nous offres les SIG permettent l'intégration de ces données dans un modèle 3D (figure 6 A et B). Dans ce modèle, les aquifères côtiers se présentent sous forme d'une zone de dépression centrale de direction globale NNE-SSW délimitée par deux zones hautes (figure 6 A et B); la plus importante est celle qui est située à l'Est de la zone et qui peut être attribuée à la zone haute de Maamora (Mansouri et al. 2010).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

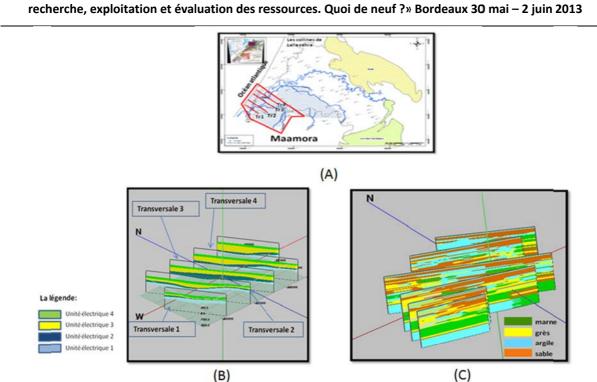


Figure 4 : Carte de situations de coupes géoélectriques et géologiques (A), coupes géoélectriques (B) et coupes géologiques (C).

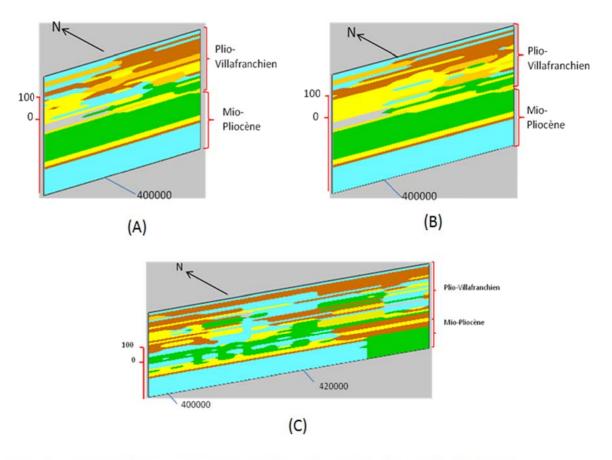


Figure 5 : corrélations lithologiques des niveaux aquifères de la zone côtière du bassin du Gharb (A, B et C représentent respectivement les transversales 1, 2 et 3 sur la figure 4).

La dépression se présente en un vaste réceptacle de largeur 50 km environ à fond plat ou courbe bordé par des limites parallèles de direction NNE-SSW, et s'étendant de Mograne au Nord à Oulad Slama au Sud (figure 6 A et B). Ces directions seraient l'expression des limites géomorphologiques hérités très probablement de la période miocène terminale et attribué à la remonté isostasique des marges (Cirac, 1985). La dépression constitue l'actuel tracé subméridien de l'Oued Sebou et constituerait ainsi son lit majeur qui aurait reçu les dépôts de démantèlement de l'avant pays tout au long du Pliocène et du Quaternaire selon une dynamique jusqu'à présent partiellement connu.

La dépression majeure de l'Oued Sebou est associée à des zones basses secondaires d'axe orienté globalement Est-Ouest (figure 6 A). On compte au minimum deux zones basses : la première au Nord, au niveau de la région de Mograne, la seconde au Sud au niveau de la région Oulad Slama. Cette dernière semble être parallèle au tracé du "coude" Est-Ouest de l'Oued Smanto-Tiflet. Il semble donc que le contrôle structural évoqué par certains auteurs (Flinch, 1993, Zouhri, 2001, Kili, 2006) en plus de la dynamique héritée de la période miocène terminale soit à l'origine de cette physionomie.

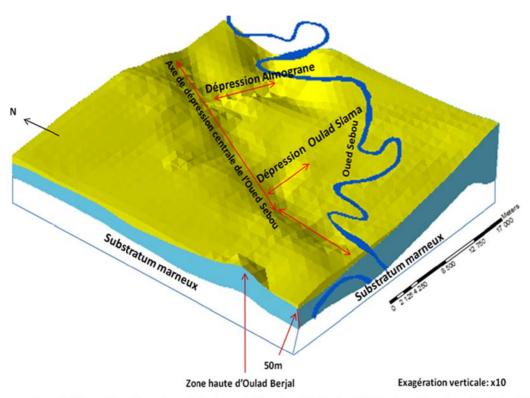


Figure 6 (A): modèle tridimensionnel du niveau géoélectrique 2 (Pliocène inférieur) centré sur le tracé principal de l'oued Sebou.

### Modèle tridimensionnel de la zone côtière du Gharb dans son cadre régional :

Le modèle tridimensionnel des unités géoélectriques de la zone côtière (figure 6 B) montre que les dépôts représentés par l'unité géoélectrique 2 (voir tableau 1) se distribuent aux alentours d'une zone haute centrée sur le domaine d'Oulad Berjal (figure 6 et 2). Les formations plio-quaternaires reposent en discordance au Nord et à l'Est et ne dépassent pas la zone haute de Maamora. Or,

dans les reconstitutions paléogéographiques (Cirac, 1985), à cet âge, cette zone fait partie d'une bande parallèle à la ligne de côte actuelle dont l'essentiel des dépôts est marneux. La mise en évidence d'une telle zone haute montre que des irrégularités paléographiques ont existé dès le Pliocène inférieur sur la rive droite de l'Oued Sebou. Le reste du domaine sud Sebou est constitué par les dépôts du fond d'un golf (Cirac, 1985) dont certaines parties isolent des microbassins (Belksiri, centre Rharb par exemple) qui font partie très probablement des bassins satellites mis en évidence par Flinch (1993). En effet; la dépression de Mograne est orienté globalement Est-Ouest, elle effectue un effet certain sur les circulations hydriques en surface et en profondeur ; en témoigne l'importante virgation de l'actuel Oued Sebou au niveau de les localités de Mograne et de Oulad Slama (figure 2). Deux éléments structuraux profonds seraient à l'origine d'une telle physionomie: le jeu des composantes inverses du front sud atlasiques (Cirac, 1985, Flinch, 1993) et les dépressions secondaires aux bassins satellites de Flinch (1993).

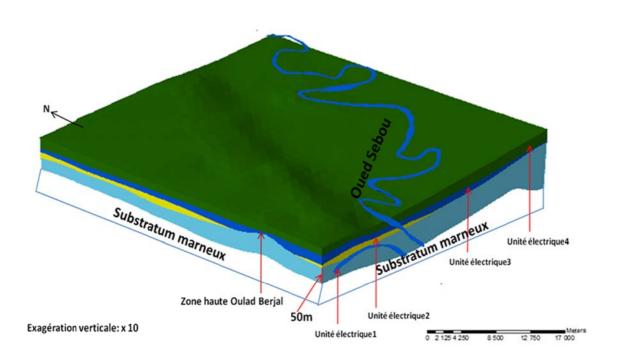


Figure 6 (B): vue générale de la distribution des unités géoélectriques 3 et 4.

### **CONCLUSION**

Dans ce travail, nous avons procédé à une modélisation tridimensionnelle des aquifères de la zone côtière du bassin du Gharb. Celle-ci a nécessité l'utilisation de données multisources (Géologie, géophysique et autres) et leur intégration dans une base de données SIG. Les résultats préliminaires auxquels nous sommes parvenus montrent que les valeurs de résistivité des unités géoélectriques varient de part et d'autre de l'axe central du tracé de l'Oued Sebou. Elles sont élevées et très variables sur la rive droite (pouvant atteindre 10000 ohm.m), moyenne et sensiblement voisines de 150 ohm sur la rive gauche alors qu'elles ne dépassent pas 50 à 60 ohm.m au niveau de l'axe du

### « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai − 2 juin 2013

chenal. Les faciès géoélectriques décrivent le comportement des niveaux conducteurs et résistants des aquifères côtiers des coupes géologiques. Ces faciès (gréso-sableux d'âge Plio-Villafranchien) remplissent un chenal d'environ 50 km ayant pris naissance dès la fin du Miocène. Ce chenal s'associe localement à des dépressions secondaires de direction subéquatoriale. Deux dépressions sont actuellement bien définies : la dépression de Mograne et celle d'Oulad Slama. Une des conséquences de la mise en évidence de cette géométrie est l'important changement du parcours de l'actuel Oued Sebou noté au niveau de ces deux dépressions.

En fin, nous avons montré que les importantes unités sableuses et sablo-gréseuses en nombre de Six subissent d'importantes migrations latérales due certainement à la dynamique fluviatile de remplissage qui persisté tout au long du Plio-quaternaire.

Ce travail de modélisation géométrique préliminaire ouvre de nouvelles perspectives quant à l'étude du potentiel hydrogéologique du bassin du Gharb, sa modélisation ainsi que l'étude des risques d'inondation de cette partie de la plaine.

#### Références bibliographique

Aberkan M., 1986. Le Quaternaire littoral de la bordure méridionale du Rharb (Maroc nord-occidental) Aspects sédimentologiques, pédologiques et néotectoniques.

Aberkan. M., 1981. Etude sédimentologique des formations littorales quaternaires de la zone côtière du Rharb (Maroc), D.E.S. 3<sup>ème</sup> Cycle géol. Univ. Mohammed V, Rabat, 131p.

Cirac, P., 1985. Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur. Evolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement. Mem. Inst. Géol. Bassin d'aquitaine, Université de Bordeaux 1, n° 21, 287p.

Combe M., 1975. Bassin du Gharb –Maâmora. In ressources en eau du Maroc. Tome2, Notes et mem. Serv. Géol., Maroc. N° 231, pp 93-128.

El Mansouri B., 1999. Développement d'outils et concepts pour la gestion des eaux souterraines. Applications à l'aquifère côtier du Gharb. Thèse de doctorat d'état, Faculté des Sciences de Kénitra. 152p.

Flinch J.F. 1993. Tectonic evolution of the Gibraltar Arc. Ph.D Dissertation, Rîce Univ., Houston, 381p.

Flinch J.F. & Vail P.R.,1998. Plio-Pleistocene sequence and tectonics of Gibraltar arc. Mesozoic and cenozoic sequence stratigraphy of Europe an Basins, SEPM Special Publication n 60, pp-199-208.

Kacimi I., 2004. Modélisation hydrodynamique et hydrochimique de la nappe cotiére Gharb-Maamora. Maroc. Thése d'Etat Es –Sciences, Univ.Mohammed V, Rabat,213p.

Kili M. (2007).Les aquifères profonds du bassin du Gharb (Maroc). Géometrie, Bilan et Modélisation. Thèse d'Etat Es sciences, faculté des Sciences de Kénitra; 193p.

Le Coz J. 1964. Le Rharb. Fellahs et colons. Etude de géographie régionale. . Inframar, Rabat. Maroc.

Michard A. 1976. Eléments de géologie marocaine. Notes & Mém. Serv. Géo Mar. n°252, 408p.

Piqué, P., et Michard, A., 1989, Moroccan hercynides: A synopsis, The paleozoic sedînientary and tectonic evolution at the northern margin of West Africa, American Journal of Science, Vol. 289, pp 286-330.

Thauvin J.P., 1966. Monographie hydrogéologique de la Mâamora. Notes et mem. Ser. Geol. N° 195, Maroc, 120p

Zouhri L., 2001. L'aquifére du bassin de la Maamora, Maroc : géometrie et ecoulement souterrain, Journal of Africain Sciences, Vol. 32, n°4, pp. 837-850.

Zouhri L., Lamouroux C. Vachard D. Pique A., 2002. Evidence of flexural extension of the Rif foreland: The Rharb- Maamora basin (northern Morocco), Bull. Soc. Géol. Fr., 173, n°6, p 509-514.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

# Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau par modélisation hydrodynamique – exemple avec le modèle Crétacé du sud Charentes

### O. Douez

BRGM Poitou-Charentes <a href="mailto:o.douez@brgm.fr">o.douez@brgm.fr</a> – f.bichot@brgm.fr

Les nappes du Sud des Charentes sont soumises à une forte pression vis-à-vis des prélèvements (pour l'irrigation en particulier) qui peuvent impacter significativement les niveaux d'eau dans les nappes mais également les débits de certains cours d'eau en période d'étiages. Ainsi, ces périodes estivales peuvent s'avérer problématiques et entrainer des conflits d'usage importants entre l'AEP, l'irrigation, l'industrie, la pêche et les besoins en eau douce des activités du littoral comme la conchyliculture.

Pour aider à la gestion quantitative de la ressource en eau souterraine sur le sud de la Région Poitou-Charentes, le modèle hydrodynamique régional du Crétacé du sud des Charentes été actualisé, recalé et utilisé. Cet outil a été développé par le BRGM en partenariat financier avec la Région Poitou-Charentes, la DREAL et l'Agence de l'Eau Adour Adour-Garonne.

Ce modèle, développé sous le code de calcul MARTHE (BRGM), couvre une superficie d'environ 7900km² avec un maillage au kilomètre carré. Le modèle comporte 8 couches (de haut en bas) : les formations superficielles ; le Campanien 4-5 (aquifère) ; le Campanien 1-2-3 et le Santonien ; le Coniacien (aquifère) ; le Turonien (aquifère) ; le Turonien Inférieur et le Cénomanien Supérieur ; le Cénomanien moyen et Inférieur (aquifère) ; le Cénomanien basal et le Jurassique Supérieur. Les nappes étant en relation étroite avec les rivières, les principaux cours d'eau sont intégrés, soit environ 900 km de linéaire. La recharge et le ruissellement sont calculés à partir des données de 8 stations météorologiques (précipitations et ETP) et à l'aide du modèle GARDENIA (modèle hydrologique global à réservoir - BRGM) couplé à Marthe sur 28 zones de sols différentes (fonction de la réserve utile du sol, du temps de percolation...).

Le calage a été réalisé sur la période 2000 à 2008 (période présentant l'intérêt d'être très contrastée d'un point de vue climatique), à un pas de temps mensuel, avec l'introduction d'environ 2000 forages (agricoles- AEP-Industries : ~ 75 millions de m3/an) ainsi que les prélèvements en rivières (~35 millions m3/an).

A travers le calage et les diverses simulations, le modèle a permis :

- de reproduire le fonctionnement des nappes au cours du temps : niveaux des nappes, circulations des eaux, relations nappes/rivières et ainsi de mieux comprendre le fonctionnement de ces réservoirs.
- de réaliser des bilans par bassins versants : stockage/déstockage des nappes, flux d'échanges avec les rivières, prélèvements.
- d'estimer l'impact des prélèvements sur les nappes et les cours d'eau à partir de scénarios de réduction et de suppression des prélèvements.
- d'étudier les effets des changements climatiques à long terme sur la ressource en eau souterraine (et de surface) avec l'intégration d'un scénario météo issus des travaux du GIEC.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

## Hydrogéologie et simulation numérique de l'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja (Algérie).

B.Saaidia<sup>1</sup>. S. Chaab<sup>2</sup>. L. Djabri<sup>3</sup>. A. Hani<sup>4</sup>. H. Chaffai<sup>5</sup>

Maitre de Conférences , laboratoire de ressource en eau et développement durable université Annaba ALGERIE basaaidia@yahoo.fr

#### Résumé

L'analyse des données géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques a permis de montrer l'existence d'une nappe libre côtière gisant dans les sables dunaires avec présence de quelques lentilles d'argiles. L'élaboration d'un modèle numérique a permis de déterminer la distribution des paramètres hydrodynamiques, en l'occurrence la perméabilité, à l'aide d'un calage en régime permanent, mais aussi de définir les conditions aux limites et d'approcher au mieux ces paramètres grâce à un calage en régime transitoire.

L'exploitation excessive et mal planifiée conduirait inexorablement à la dégradation de la qualité chimique des eaux par l'intrusion des eaux salines venant de la bordure Nord. La mise au point d'un modèle numérique prévisionnel a permis de donner une variante rationnelle d'exploitation de l'aquifère libre de Bouteldja.

Mots-clés: Massif dunaire, aquifère libre, modèle, simulation numérique, Bouteldja, Algeria.

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013

## An early warning system to better control deep groundwater exploitation

### K.-P. Seiler

Utting am Ammersee, Germany peter.seiler1@gmx.de

#### **Abstract**

The exploitation of groundwater from depth exceeding 50 to 100 m below valley floors requires special management techniques because the rate of available groundwater recharge decreases significantly with depth, hence hydrodynamics change with depth too. Since this is mostly neglected in exploiting deep groundwater, vertical hydraulic short cuts generate and import after a long run of time often water of undesired quality to the exploitation floor. These long-term transient hydraulic changes are both difficult to predict and recognize in time using only traditional tools. Therefore, instead of only monitoring the arrival of contaminants, it is also proposed to control changes in the natural isotope and chemical stratification of aquifers, which express hydraulic changes. If the results of such a survey is linked to mathematical modelling, an effective early warning tool becomes available to better assess hydrodynamic changes, respectively to prevent in time any significant contaminant access to the exploitation floor.

#### 1. INTRODUCTION

Within the last 100 years drinking water abstraction proceeded in temperate, tropical and semi-arid climates to depth exceeding 60m to 100m in groundwater prone areas. The reason for this development was

- to become more independent from variable annual changes in groundwater levels, which are specifically important in semi-arid and tropical climates, and
- to seemingly better manage pollution problems, especially from accidental spills.

Recent field and numerical studies [1, 2] demonstrate for all except special arid climates that groundwater resources are subdivided into an active (shallow) and a passive turnover zone (deep groundwater) (Fig. 1). In the active turnover zone more than 85%, in the passive turnover zone less than 15% of modern groundwater recharge occurs [3]. The thickness of the active turnover zone develops according to the amount of groundwater recharge and the hydraulic parameters of the aquifer system; in temperate, semi-arid and tropical areas, it comprises

- in fissured rocks mostly less than 100m,
- in unconsolidated rocks less than 60m below valley floor and
- may drop in arid areas to a few decimetres or is locally even missing.

In contrast, the passive turnover zone becomes many 100m in thick and reaches down till the zone of connate waters [4]; this passive turnover zone provides

- a significant dilution volume and
- more quantitative microbial, chemical and physical natural attenuation capacity than the active turnover zone due to long mean residence times.

At the interface between the mentioned turn-over zones, there exists an abrupt change in concentrations of environmental tracers (Fig. 2); in between these tritium drops to non-measurable concentrations and thus can be used as a guide tracer to recognize the interface shallow/deep

groundwater. With its short half life (12.34 years) it also stands in a first approximation for potential non-reactive pollutants of the 20<sup>th</sup> century.

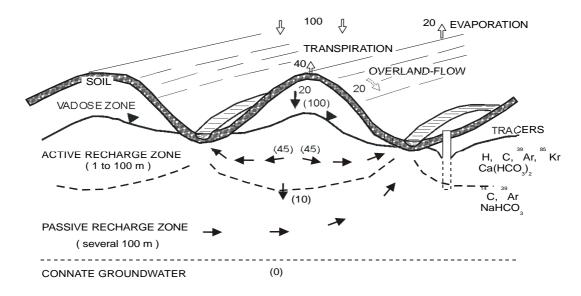


Figure 1 - Subdivision of aquifer systems into an active (shallow) and passive (deep) groundwater recharge zone (not to scale). 100 = 100% of precipitation, (100) = 100% of groundwater recharge.

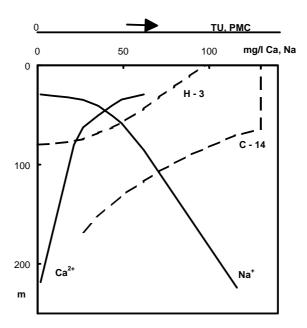


Figure 2 - Characteristic changes in <sup>3</sup>H-, <sup>14</sup>C-, Ca<sup>2+</sup>- and Na<sup>+</sup>-concentrations with groundwater depth in the Molasse Basin of South Germany; <sup>3</sup>H-concentrations in TU, <sup>14</sup>C concentrations in PMC. (Modified after [5]).

### 2. EXPLOITATION OF DEEP GROUNDWATER

Disregarding the change of groundwater flow with depth (Fig 3 A) in planning any deep groundwater exploitation, leads as a rule to hydraulic stress situations expressing in vertical hydraulic short in aquifer systems (Fig. 3 B); these may cause an undesired access of either polluted (from above, Fig 3 B) or high mineralised waters (from beneath) to the exploitation floor.

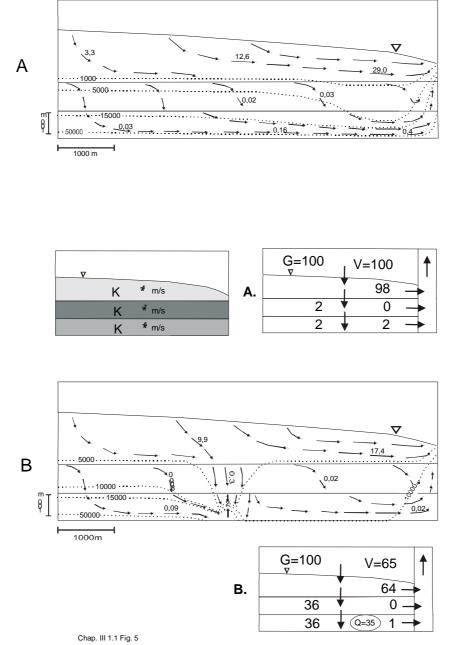
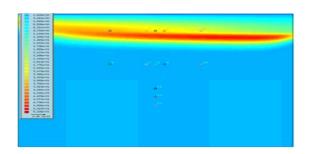
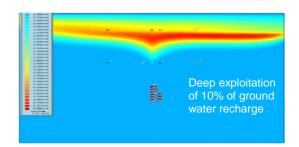


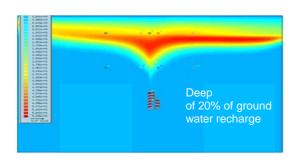
Figure 3 - Flow lines (arrows) with distance velocities of the groundwater (m/d) and isochrones (years) in an aquifer system with a typical hydraulic conductivity distribution (from up to down: exp.-4m/s, exp.-7m/s, exp.-5m/s). A without/B with 35% exploitation of groundwater recharge; A./B. percent of turn over of groundwater recharge.

To avoid any deterioration of the water quality by the abstraction of deep groundwater, adapted management strategies are necessary, which, however, are mostly difficult to define, because in deep aquifers both the estimate of depth related groundwater recharge, hydraulic and geologic parameters lake precision and deep groundwater systems behave hydraulically transient.

To overcome this problem, a special monitoring and evaluation has been developed to better control hydraulic and quality consequences of deep groundwater exploitation [6]. Especially, to quantify short cuts in a transient flow system, concentration changes of non-reactive environmental tracers should be monitored and used to recalibrate numerical evaluations (early warning system). Hydraulic changes of vertical fluxes can be monitored through controlling changes in the concentration of <sup>14</sup>C-, <sup>39</sup>Ar-, <sup>31</sup>H-, <sup>18</sup>O-, <sup>2</sup>H-, <sup>85</sup>Kr and Cl<sup>-</sup> in the abstracted groundwater.







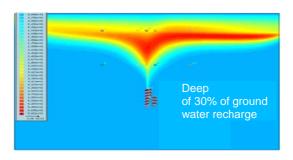


Figure 4 - Shallow and deep aquifers unstressed (up left) over a run of 20 years and then stressed in depth over 30years, extracting 10%, 20% or 30% of known groundwater recharge.

Red/yellow=contaminated, blue=not measurable contaminated.

Fig. 4 demonstrates the bulk changes in hydrodynamics in a 20years unstressed aquifer system (up left), followed by a 30years deep exploitation; figs. 5 to 9 demonstrate detailed results of the numerical modelling on the time distribution of a non-reactive contaminant and tracers like <sup>3</sup>H and <sup>39</sup>Ar, all entering the subsurface system according to real input functions. As expected

- in the active turn-over zone, the concentration of <sup>3</sup>H does not significantly change as compared to the input function with an exploitation of 0%, 10%, 20% and 30% of groundwater recharge (Figs. 5 and 6), because extraction does not exceed groundwater recharge. Both non-reactive tracers (contaminant and <sup>3</sup>H) behave similar and may substitute in practise one another.
- Opposite, in the passive turn-over zone (e.g. 150m depth) groundwater abstraction rises the <sup>3</sup>H and contaminant concentrations; this happens according to abstraction quantities delayed (Figs. 7 and 8).
- Such a delay is missing for <sup>39</sup>Ar (Fig. 9), because both <sup>3</sup>H and the non-reactive contaminant are discontinuously (see above), <sup>39</sup>Ar, however, is continually distributed over depth.

From these modelling results, which have been confirmed by field observations, it becomes obvious that <sup>39</sup>Ar as compared to tritium is a more sensitive early warning indicator to asses hydraulic

changes due to deep groundwater exploitation. Mathematical modelling also showed that, once the contamination reached the deep groundwater, it remains even 30years after ending the exploitation unchanged and thus may produce quality deterioration over a longer run of time than in shallow

groundwater.

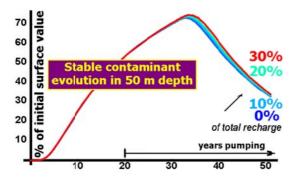


Figure 5 - Groundwater exploitation in the **active turnover zone**. The percentage of abstraction does not change the non-reactive contaminant concentration, because it does not exceed the available groundwater recharge.

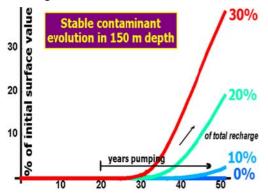


Figure 7 - Groundwater exploitation from the **passive turnover zone**. The percentage of abstraction changes significantly both the delay time of response and the non-reactive contaminant concentration, because abstraction happens in disequilibria with the depth related groundwater recharge.

Figure 8 - Groundwater exploitation from the **passive turnover zone**. The percentage of abstraction changes significantly the <sup>3</sup>H concentration and the delay time of response, because abstraction happens in disequilibria

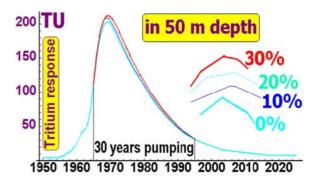
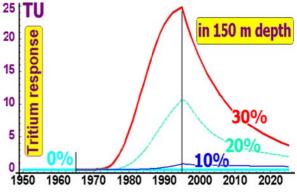


Figure 6 - Groundwater exploitation in the **active turnover zone**. The percentage of abstraction also does not change the <sup>3</sup>H concentration, because it happens also in equilibrium with the available groundwater recharge.



with the available deep groundwater recharge. The delay times of tritium and the contaminant are - as expected - equal (Fig.7).

« Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique,

recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ?» Bordeaux 30 mai - 2 juin 2013

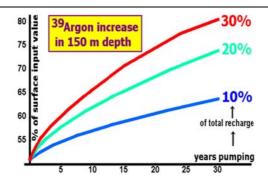


Figure 9 - Groundwater exploitation from the passive turnover zone. The percentage of abstraction changes significantly the <sup>39</sup>Ar concentration, but the delay time of response is quasi instantaneous. Measuring accuracy of <sup>39</sup>Ar is about 5%.

### 3. CONCLUSIONS

Deep groundwater should not be exploited only according to traditional methods because groundwater availability decreases with depth. Since it is difficult to determine through a good approximation this depth related availability of groundwater, 15% of the catchment recharge should be the upper limit of extraction to avoid any undesired displacement of salt or contaminated water to the extraction floor.

This estimate of groundwater abstraction, however, needs a special monitoring, because geologic and hydro-geologic data are mostly not detailed and precise enough for any reliable prognosis. Therefore an early warning system has been developed which monitors on a long run of years deep wells and couples these results with numerical modeling.

Under the many indicators applicable as early warning indicators,  $^{39}$ Ar and  $^{14}$ C combined with Cl $^{-}$ ,  $^{2}$ H and  $^{18}$ O proved reliable for age ranges of 1000years, respectively 1000 to 20 000years; in between these indicators  $^{39}$ Ar appears most sensitive.

### Acknowledgement

The author thanks Prof. Dr. P. Maloszewski in supporting him to express the hydrogeologic ideas into numerical algorithms.

#### References

- [1] Freeze, R.A., Witherspoon, P.A., 1967 Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variations.- Water Resources Res.3, p 623-634
- [2] Seiler, K.-P., Lindner, W., 1995 Near surface and deep groundwaters. J. Hydrol. 165, p 33-44
- [3] Einsele, G., Seiler, K.-P., Bertleff, B., Lindner, W., Plum, H., Weber, E., 1987 Erkundung tiefer Grundwasserzirkulationssysteme. DVWK Schr. 81, 223 p
- [4] Engelhardt v., W. (1960): Der Porenraum der Sedimente. (Springer) Berlin, 207 p
- [5] Egger, R., 1978 Das Grundwasser in der Oberen Suesswassermolasse im Raum München und Augsburg. PhD theses (unpublished), Univ. of Munich, pp 110
- [6] Ghergut, J., Maloszewski, P., Seiler, K.-P., 2001 Age, environmental isotope, and contaminant transport uncoupling in heterogeneous aquifers following hydraulic stress. In: Seiler, K.-P., Wohnlich, S.(Eds.): New Approaches Characterizing Groundwater Flow, Vol. 1, , Balkema, p. 327-334