

Les nappes d'eau souterraines en contexte urbain

XIV^{es} journées techniques du Comité français d'hydrogéologie
Comité national français de l'Association internationale des hydrogéologues

Colloque – Lyon 2007
8 – 10 novembre 2007 – Le Grand Lyon



GRAND LYON
communauté urbaine



Les nappes d'eau souterraines en contexte urbain



Colloque – Lyon 2007
8–10 novembre 2007 – Le Grand Lyon

Les nappes d'eau souterraines en contexte urbain

XIV^{es} journées techniques du Comité français d'hydrogéologie
Comité national français de l'Association internationale des hydrogéologues



Colloque
8–10 novembre 2007
Lyon

Hémicycle du Grand Lyon
Hôtel de communauté
20, rue du Lac
69003 Lyon

Les nappes d'eau souterraines en contexte urbain

XIV^{es} journées techniques du Comité français d'hydrogéologie
Comité national français de l'Association internationale des hydrogéologues

Secrétaires du colloque

Pierrick Chastagner & Yves Gouisset
Disthène Diren Rhône-Alpes

Comité d'organisation

Yves Gouisset Diren Rhône-Alpes
Pierrick Chastagner Disthène
Laurence Chery Brgm, secrétaire du CFH-AIH
Nicole Baran Brgm, secrétaire adjointe du CFH-AIH
Pierre Marchet Agence de l'eau Adour-Garonne
Laurent Cadilhac Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse
Bruno Leclerc Trésorier du CFH-AIH
Jean-Claude Roux Président du CFH-AIH

Les nappes d'eau souterraines en contexte urbain

En contexte urbain, où les pressions anthropiques sont fortes et nombreuses, la gestion des nappes souterraines est confrontée à des conditions historiques, techniques et économiques particulières.

Les influences de l'activité humaine sur les nappes sont multiples : imperméabilisation, déficits d'alimentation, cloisonnement par les parois moulées, rabattements temporaires et permanents des niveaux de nappes, tassement des terrains, fuites des réseaux d'eaux usées et des stockages de substances polluantes, pompes à chaleur...

Peut-on considérer certaines nappes sinistrées comme vouées à l'abandon ou faut-il au contraire redoubler de vigilance? La ville croît et menace ou « rattrape » des zones de captage d'eau potable jusqu'alors préservées : comment gérer le conflit? La réglementation actuelle concernant l'hydrogéologie urbaine est-elle suffisante, est-elle perfectible? Quels enseignements tirer des retours d'expérience?

Ces questions complexes sont abordées par le biais de **quatre sessions** :

- **Équilibres et déséquilibres physiques**
- **Pollutions**
- **Usages thermiques**
- **Gestion et réglementation**

Le bureau du Comité français d'hydrogéologie

Programme

Jeudi 8 novembre

8 h 30 *Accueil des participants*

Allocution d'ouverture de Michel REPPÉLIN

9 h 00 Vice-Président du Grand-Lyon en charge de l'Environnement, Maire de Collonges-aux-Monts-d'Or
Accompagné de Jean CHAPGIER-LABOISSIÈRE
Responsable du service Développement durable - Direction de l'eau - Grand Lyon

9 h 15 **Session 1 - ÉQUILIBRES ET DÉSÉQUILIBRES PHYSIQUES**
Président : Gérard NICOUUD - Professeur, Université de Savoie

- Les parcs de stationnement souterrains de Lyon, principes de construction
Alain LEMAY - LYON PARC AUTO
- Réalisation de parkings en contexte peu favorable
Marc BOISSON - SOGREAH
- Le projet Mozart à Paris - Issy-les-Moulineaux
Hydrogéologie, fondations profondes et réglementation
Gérard MONNIER - BURGEAP
- Grandes infrastructures souterraines en site urbain : impact sur les écoulements de nappe
Christine ONDEL - EGIS Rail
- Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise
Jacques COUDERT - GRAND-LYON, Jérôme NICOLAS - BRGM Rhône-Alpes

12 h 30 **Remise des prix ARCHAMBAULT et CASTANY**

13 h 00 **Déjeuner sur place (salon Louis Pradel - Grand Lyon)**

- Paris - Contrôle de l'aléa lié aux dissolutions du gypse
Jean-François VERNOUX - BRGM, Anne-Marie PRUNIER-LEPARMENTIER - IGC
Pierre THIERRY, Céline NOWAK, Émilie VANOUDEUSDEN - BRGM
- La nappe de Seine-Saint-Denis : carte de zonage de l'infiltrabilité du sol
Olivier FOUCHÉ - CNAM

15 h 00 **Session 2 - POLLUTIONS**
Président : Noël MONGEREAU - Professeur honoraire

- Bancarisation et valorisation des données de suivi de la qualité des eaux souterraines au droit des sites industriels en région Rhône-Alpes
Laurent ALBERT - DRIRE Rhône-Alpes, Laurent CADILHAC - Agence de l'eau RM&C,
Romain CHARTIER - BRGM Rhône-Alpes
- Bilan des cas d'impact de pollution de nappes sur les travaux et infrastructures souterraines en milieu urbain
Claude MICHELOT - BURGEAP
- Risques de pollutions chimiques ou bactériennes dans la construction et l'exploitation des infrastructures de transport : inventaire, classification, prévention, remèdes
Christine ONDEL - EGIS Rail
- Dynamique du carbone organique dissous dans les nappes souterraines à l'aplomb de bassins d'infiltration
Florian MALARD - CNRS, OTHU

17 h 30 **Fin de la première journée**

17 h 45 **Assemblée générale du CFH**

20 h 00 **Dîner en ville**

Vendredi 9 novembre

8 h 30 *Accueil des participants*

9 h 00

Session 3 - **USAGES THERMIQUES**

Président : Fabrice BOISSIER - Directeur du département Géothermie - BRGM

- La filière géothermie très basse énergie en France
Fabrice BOISSIER - BRGM
- Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre
Jean Claude MARTIN - BRGM Centre
- Régime thermique des nappes phréatiques à l'aplomb de bassins d'infiltration
Arnaud FOULQUIER - CNRS, OTHU
- Ville de Grenoble : utilisation thermique de la nappe
Claire CHARGUERON - SOGREAH, Frédéric JACQUES - Ville de Grenoble
- Utilisation de l'eau de nappe pour le traitement thermique des bâtiments
Christian GERINTE - BARBANEL
- Une expérience réussie de géothermie en Rhône-Alpes : la CAF de Lyon. Bilan des neuf années de fonctionnement
José NAVETEUR - EDF

12 h 45 **Déjeuner sur place (salon Louis Pradel - Grand Lyon)**

14 h 00

Session 4 - **GESTION ET RÉGLEMENTATION**

Président : Philippe DUPONT - Directeur Planification et programmation - Agence de l'Eau RM&C

- Sécurisation de l'alimentation en eau de consommation en situation de crise : le cas de l'agglomération lyonnaise et de son approvisionnement potentiel via sa nappe urbaine profonde
Philippe CORRIGNAN - ANTEA, Yves DELACRETAZ – Grand Lyon
Noël MONGEREAU - Professeur honoraire
- Une démarche concertée pour la gestion d'une nappe en secteur périurbain : le schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) de l'Est lyonnais
Caroline BERSOT - Conseil Général du Rhône
- Application de la réglementation des eaux souterraines dans le contexte de l'agglomération lyonnaise
Daniel DANCETTE, Fabienne GOETZ - Direction départementale de l'agriculture et de la forêt du Rhône,
Juliana CARBONEL - Service de la navigation Rhône-Saône
- Dissolution du gypse à Paris - Efficacité et carences de la réglementation
Anne-Marie LEPARMENTIER-PRUNIER - IGC

16 h 30 **Conclusions, perspectives**

17 h 30 **Clôture du colloque**

Samedi 10 novembre - **Visites techniques**

9 h 00

Parking souterrain de Villeurbanne

Alain LEMAY - Directeur technique - LYON PARC AUTO
Philippe CORRIGNAN - ANTEA

Chantier du métro de Lyon

Christine ONDEL - Ingénieur principal, expert Génie Civil et Structures - EGIS

12 h 15

Déjeuner en commun

14 h 00

Champ captant de Crépieux-Charmy

Jean CHAPGIER-LABOISSIÈRE - Responsable du service Développement durable - Direction de l'eau - Grand Lyon

Robert JONAC - Directeur du service de production Lyon - VEOLIA Eau
Claude MICHELOT - Directeur technique - BURGEAP

16 h 30

Fin de la troisième journée - Fin du colloque

Sommaire

Session 1 – Équilibres et déséquilibres physiques

Les parcs de stationnement souterrains de Lyon, principes de construction Alain LEMAY - LYON PARC AUTO	5
Réalisation de parkings en contexte peu favorable Marc BOISSON - SOGREAH	11
Le projet Mozart à Paris - Issy-les-Moulineaux Hydrogéologie, fondations profondes et réglementation Gérard MONNIER - BURGEAP	21
Grandes infrastructures souterraines en site urbain : impact sur les écoulements de nappe Christine ONDEL - EGIS Rail	33
Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise Jacques COUDERT - GRAND-LYON, Jérôme NICOLAS - BRGM Rhône-Alpes	45
Paris - Contrôle de l'aléa lié aux dissolutions du gypse Jean-François VERNOUX - BRGM, Anne-Marie PRUNIER-LEPARMENTIER – IGC Pierre THIERRY, Céline NOWAK, Émilie VANOUUDHEUSDEN - BRGM	63
La nappe de Seine-Saint-Denis : carte de zonage de l'infiltrabilité du sol Olivier FOUCHÉ – CNAM	89

Session 2 – Pollutions

Bancarisation et valorisation des données de suivi de la qualité des eaux souterraines au droit des sites industriels en région Rhône-Alpes Laurent ALBERT - DRIRE Rhône-Alpes, Laurent CADILHAC - Agence de l'eau RM&C, Romain CHARTIER - BRGM Rhône-Alpes	105
Risques de pollutions chimiques ou bactériennes dans la construction et l'exploitation des infrastructures de transport : inventaire, classification, prévention, remèdes Christine ONDEL - EGIS Rail	115
Dynamique du carbone organique dissous dans les nappes souterraines à l'aplomb de bassins d'infiltration Florian MALARD - CNRS, OTHU	129

Session 3 - Usages thermiques

La filière géothermie très basse énergie en France Fabrice BOISSIER - BRGM	139
Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre Jean Claude MARTIN - BRGM Centre	147
Régime thermique des nappes phréatiques à l'aplomb de bassins d'infiltration Arnaud FOULQUIER - CNRS, OTHU	155
Ville de Grenoble : utilisation thermique de la nappe Claire CHARGUERON - SOGREAH, Frédéric JACQUES - Ville de Grenoble	167
Utilisation de l'eau de nappe pour le traitement thermique des bâtiments Christian GERINTE - BARBANEL	171
Une expérience réussie de géothermie en Rhône-Alpes : la CAF de Lyon. Bilan des neuf années de fonctionnement José NAVETEUR - EDF	179

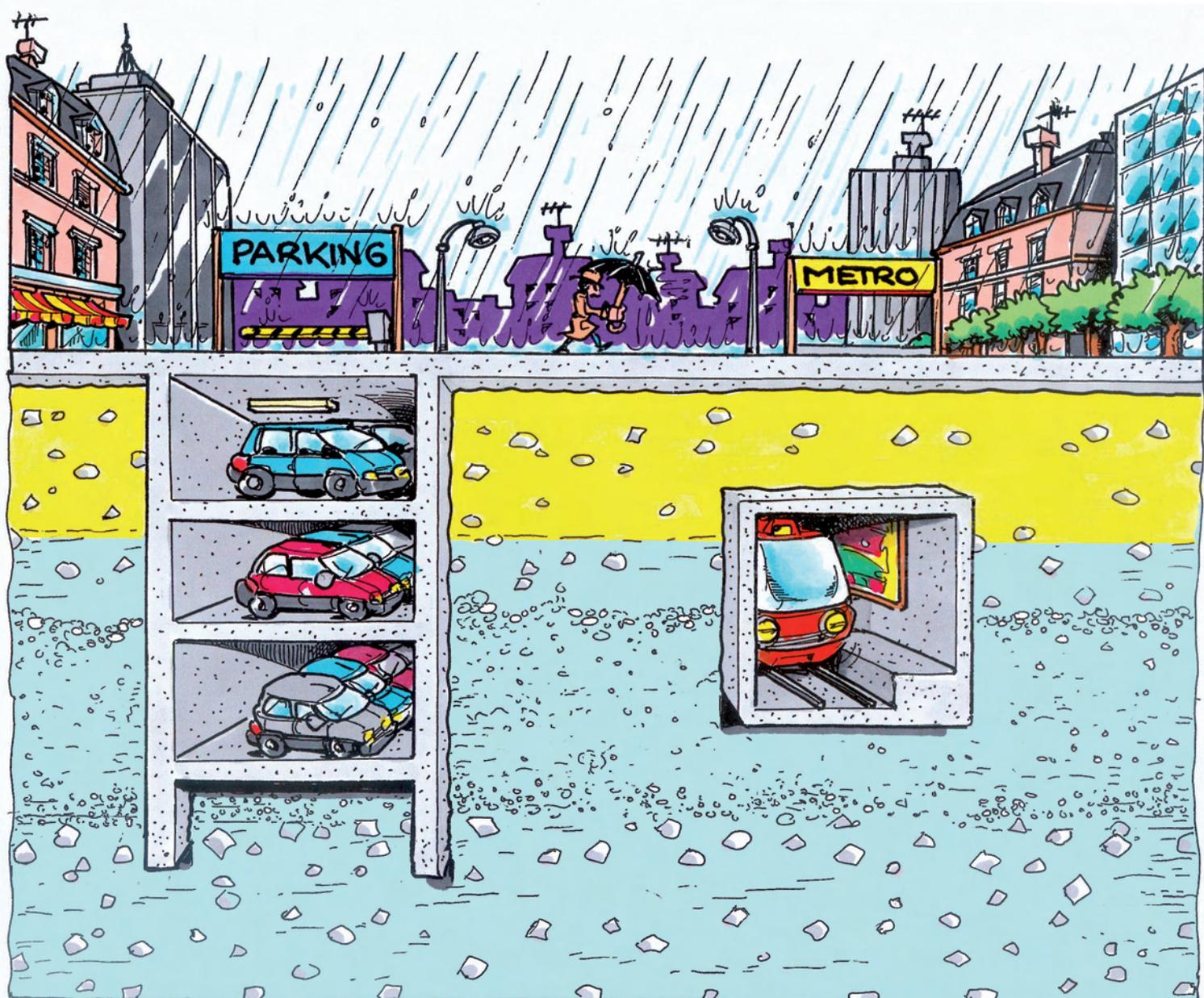
Session 4 - Gestion et réglementation

Sécurisation de l'alimentation en eau de consommation en situation de crise : le cas de l'agglomération lyonnaise et de son approvisionnement potentiel via sa nappe urbaine profonde Philippe CORRIGNAN - ANTEA, Yves DELACRETAZ – Grand Lyon Noël MONGEREAU - Professeur honoraire	187
Une démarche concertée pour la gestion d'une nappe en secteur périurbain : le schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) de l'Est lyonnais Caroline BERSOT - Conseil Général du Rhône	195
Application de la réglementation des eaux souterraines dans le contexte de l'agglomération lyonnaise Daniel DANCETTE, Fabienne GOETZ - Direction départementale de l'agriculture et de la forêt du Rhône, Juliana CARBONEL - Service de la navigation Rhône-Saône	205
Dissolution du gypse à Paris - Efficacité et carences de la réglementation Anne-Marie LEPARMENTIER-PRUNIER - IGC	215

Communications

Première session

Équilibres et déséquilibres physiques



Les parcs de stationnement souterrains de Lyon

Principes de construction

Alain Lemay

LYON PARC AUTO - 2, place des Cordeliers - BP 2105 - 69226 Lyon Cedex 02
alain.lemay@lpa.fr

Depuis 15 ans, la construction de 16 parcs de stationnement souterrains à Lyon a été simultanément l'occasion d'une réhabilitation de l'espace public et d'une nouvelle conception de l'urbanisme souterrain. Ce travail original réunit ingénieurs, architectes, artistes et designers.

La présence de la nappe phréatique à une faible profondeur (4 à 5 mètres), et la présence d'un substratum entre 20 et 30 mètres, ont conduit LPA à proposer des parcs enterrés de 5 à 7 niveaux, permettant ainsi une optimisation de l'espace souterrain. En outre, la réutilisation de l'eau a été envisagée et des dispositifs ont été mis en place pour rendre possible le remplissage de bassins, l'arrosage d'espaces verts, l'alimentation de fontaines...

I. INTRODUCTION

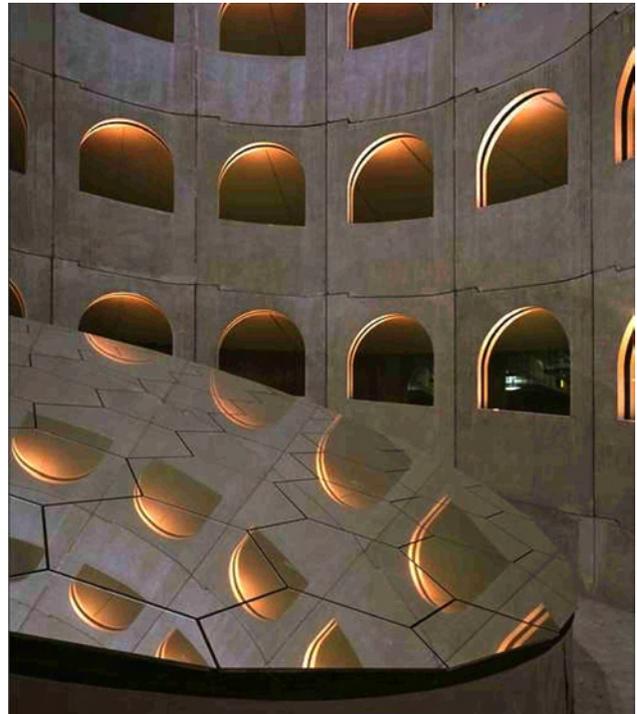
LYON PARC AUTO est une SEM (société d'économie mixte) créée en 1969. Aujourd'hui, elle gère 22 000 places de stationnement sur voirie et 19 000 places de stationnement dans 26 ouvrages. Depuis ces 15 dernières années, la construction de 16 parcs de stationnement souterrains à Lyon a été simultanément l'occasion d'une réhabilitation de l'espace public lyonnais et d'une nouvelle conception de l'urbanisme souterrain.

Cela a permis une reconquête de l'espace souterrain au profit des hommes : les parcs de stationnement ne sont plus de simples lieux de stockage des voitures, mais de véritables portes d'entrée de la ville.

Ce travail original s'est fait sous la maîtrise d'ouvrage de LPA grâce à l'intervention d'ingénieurs, d'architectes, d'artistes, de designers...

Un soin particulier a été apporté à l'accueil et au confort, par l'utilisation du concept de poly-sensorialité : esthétique, transparences, choix des matériaux, traitement de l'acoustique, facilité d'usage...

*Figure 1 - Parc des CÉLESTINS
Artiste Daniel BUREN*



LPA a également utilisé une palette d'éléments techniques, parfois plus coûteux que les solutions habituelles, mais qui ont permis des améliorations considérables en termes de qualité (parcs profonds, absence de poteaux, traitement soigné des accès voitures et piétons, priorité aux espaces piétons...).



Figure 2 - Parc FOSSE AUX OURS

II. PRINCIPES DE CONSTRUCTION

La présence de la nappe phréatique à une faible profondeur (4 à 5 mètres), et la présence d'un substratum entre 20 et 30 mètres, ont conduit LPA à proposer des parcs enterrés de 5 à 7 niveaux, permettant ainsi une optimisation de l'espace souterrain en évitant le gaspillage de ressources potentiellement précieuses (espace, eaux souterraines...).

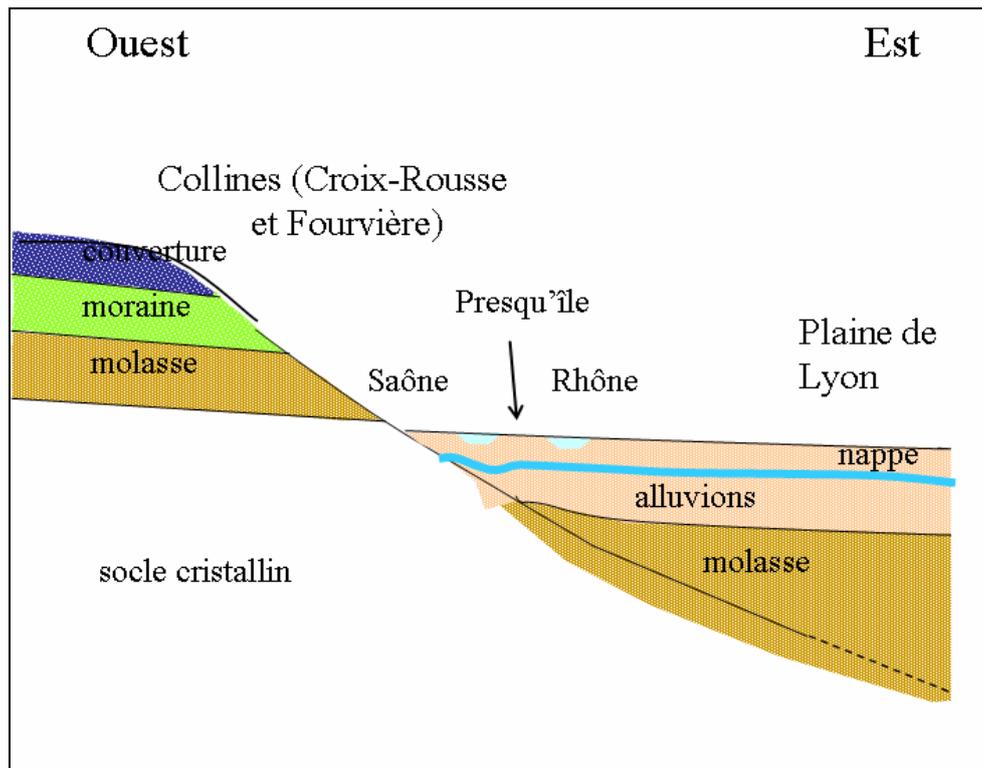


Figure 3 - Contexte géologique lyonnais

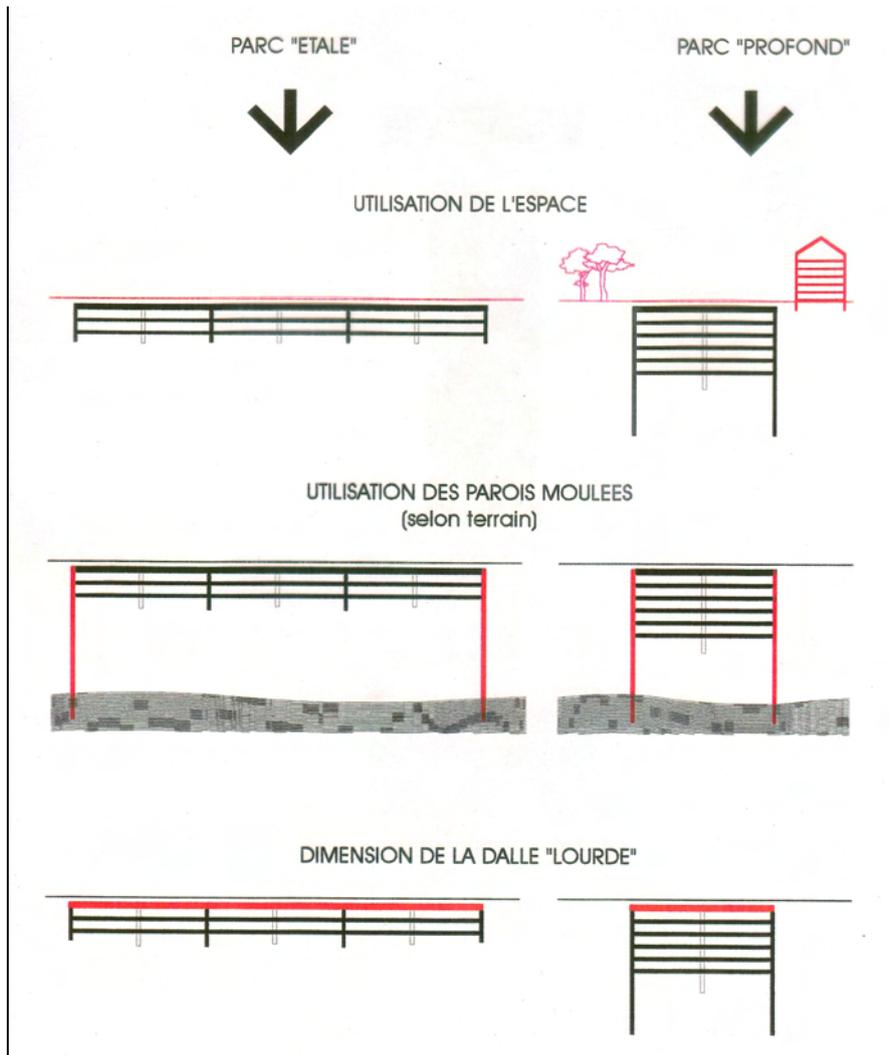


Figure 4 - Quelques arguments pour un parc profond

LPA a mis au point avec ses conseils et ses constructeurs une méthodologie de réalisation qui se retrouve pour la majorité des parcs :

- paroi moulée ;
- terrassement avec butons ;
- radier drainant et rejet des eaux d'exhaure au milieu naturel.

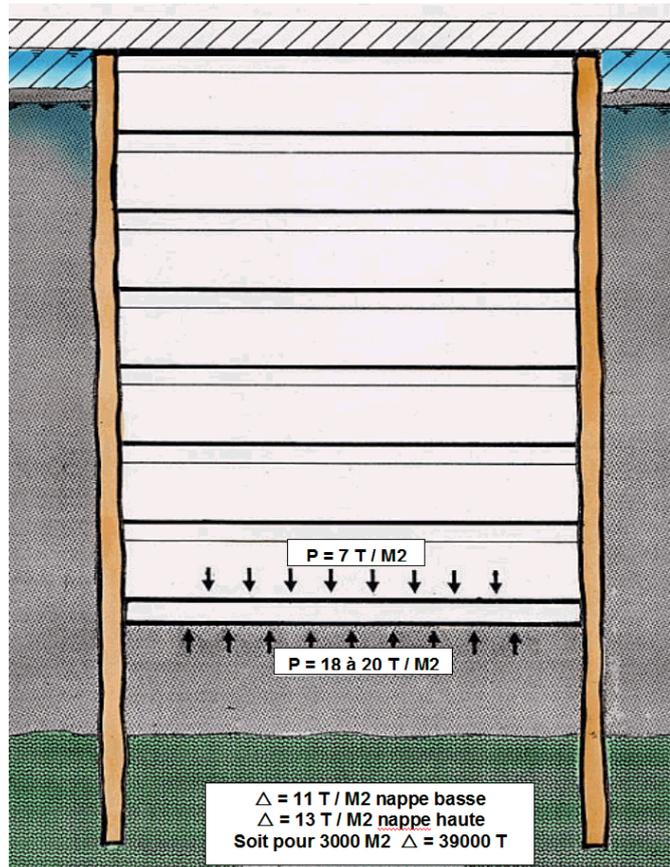


Figure 5 - Parc PART-DIEU GARE
Poutres butons - Radier drainant

La présence de la nappe phréatique implique nécessairement de pomper pendant la réalisation des travaux.

Le souhait d'avoir un ouvrage complètement étanche une fois construit, conduit à trouver une solution pour reprendre la pression hydrostatique qui s'appliquera à sa base.

Figure 6 - Déséquilibre en phase définitive



Solutions d'équilibre en phase définitive

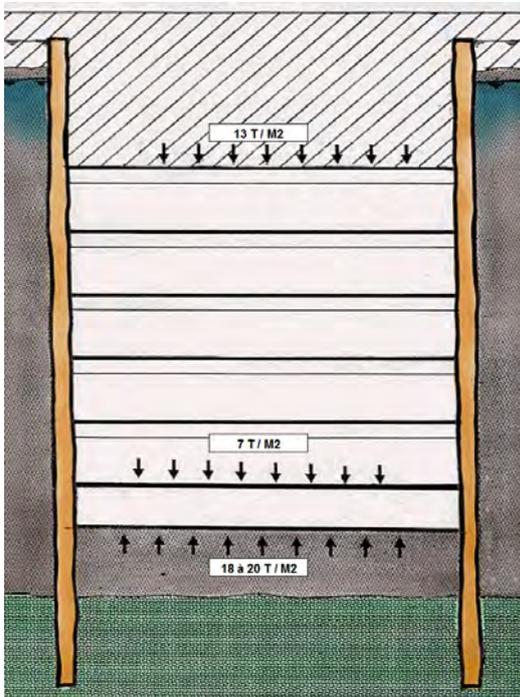


Figure 7 - Solution de lestage
(Pas de maintenance, attention aux travaux en surface)

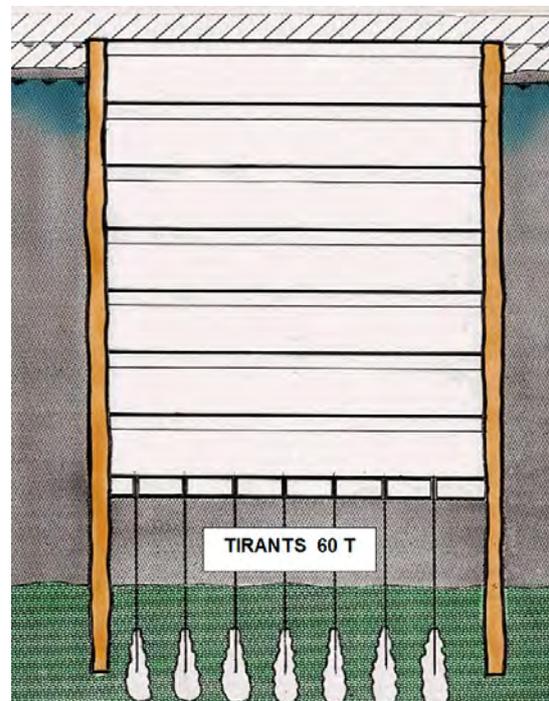


Figure 8 - Tirants
(Tirants définitifs, surveillance et maintenance)

La solution retenue pour les parcs construits à Lyon consiste à réaliser un radier drainant dont le but est de supprimer la pression hydrostatique.

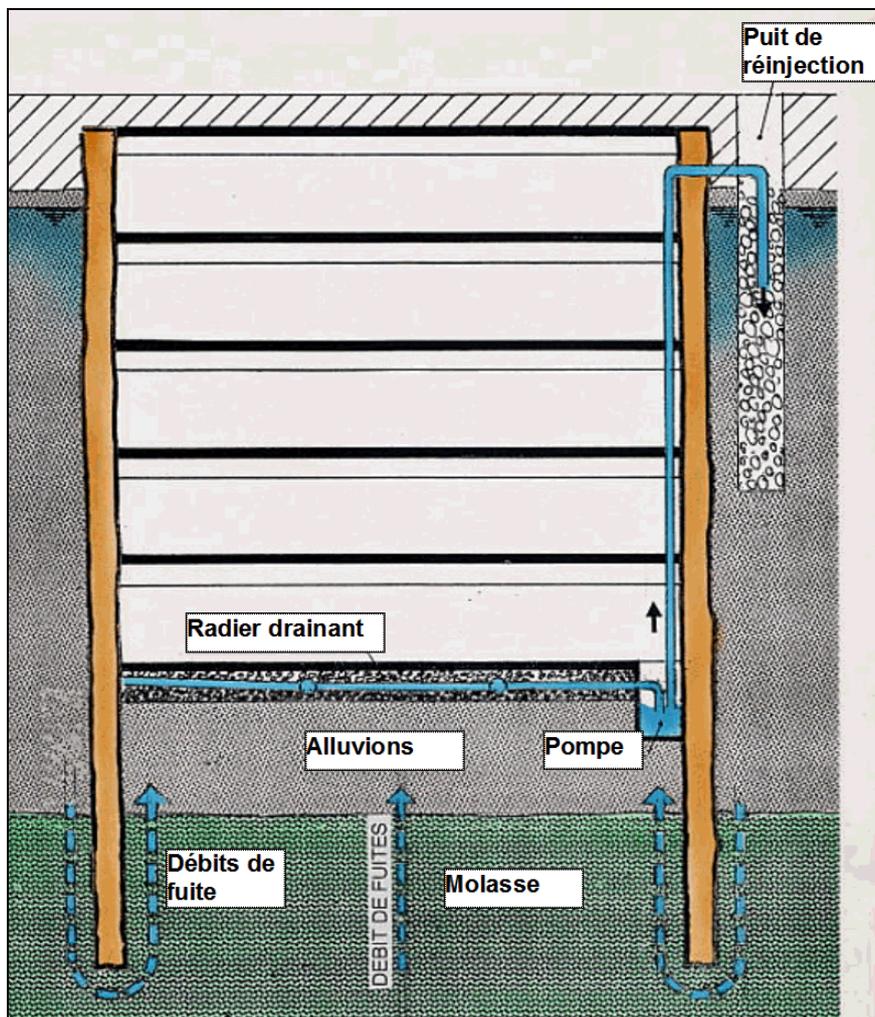


Figure 9 - Schéma type du radier drainant et de la réinjection

Les principaux avantages de cette solution sont :

- une mise en œuvre relativement simple ;
- des coûts de construction réduits.

Le principal inconvénient est le coût du rejet durant toute la durée de l'ouvrage :

- entretien et consommation de l'installation de pompage ;
- taxes de rejet.

La réinjection des eaux d'exhaure directement dans la nappe à partir de puits de réinjection positionnés à l'extérieur de l'ouvrage permet de s'affranchir des taxes de rejet. La forte épaisseur d'alluvions très perméables qui est présente à Lyon permet cette réinjection.

Suite à la mise en service des premiers parcs profonds, une surveillance des dispositifs de drainage a été mise en place et des actions d'entretien et d'amélioration sont régulièrement effectuées.

Les derniers parcs construits ont donc bénéficié de cette expérience :

- dimensionnement des couches filtre et drain en tenant compte de la nature des terrains en place et du débit, l'épaisseur étant de l'ordre de 70 cm ;
- indépendance parfaite des réseaux d'EU et de drainage et vérification par caméra des réseaux pendant les travaux de radier puis à la fin des travaux ;
- sécurisation du pompage : doublement des fosses d'exhaure, double sécurité des pompes, double alimentation électrique ;
- évacuation par des canalisations en inox, têtes de puits de réinjection visitables permettant l'entretien, branchement à l'égout de secours ;
- suivi en phase étude et en phase travaux par un hydrogéologue.

Nous avons constaté à ce jour que les débits n'augmentent pas avec la durée de vie de l'ouvrage.

En comptant les parcs qui vont être mis en service très prochainement, LPA gère 13 parcs construits avec un radier drainant. Le débit de pompage total est d'environ 2 500 m³/h. Il varie selon les ouvrages de 1 000 à 1 000 m³/h.

La réutilisation de l'eau a été envisagée et des dispositifs ont été mis en place pour plusieurs parkings :

- PO Cité Internationale : remplissage du lac du parc de la tête d'or ;
- Hôtel de ville de Villeurbanne : remplissage des bassins, arrosage des espaces verts, climatisation du théâtre ;
- Fosse aux ours : alimentation de la lame d'eau des bassins des berges et arrosage des espaces verts (Figure 10) ;
- pour tous les derniers parcs réalisés, mise en place d'une bride permettant, en cas de besoin, de réaliser un branchement rapide afin d'alimenter soit des points de distribution d'eau en surface soit de remplir des camions citerne. ■



© Grand Lyon

Figure 10 - Parc FOSSE AUX OURS - Aménagement des berges

Réalisation de parkings en contexte peu favorable vis-à-vis de la nappe – Exemple à Grenoble (38)

Claire Charguéron, Sébastien Langlais, Marc Boisson

SOGREAH – 6, rue de Lorraine – 38130 Échirolles

claire.chargueron@sogreah.fr - sebastien.langlais@sogreah.fr - marc.boisson@sogreah.fr

L'étude présente la réalisation de parkings souterrains dans la nappe peu profonde de Grenoble avec l'évaluation de l'impact de différentes options de rabattement de nappe : soit avec exhaure (sans dispositif de limitation des débits prélevés, avec palplanches, avec palplanches et bouchon de fond), soit avec rejet (dans le réseau, dans la nappe).

I. INTRODUCTION

La réalisation de parkings en milieu alluvial avec une nappe peu profonde implique de rabattre la nappe par pompage afin de pouvoir réaliser hors d'eau les radiers des sous-sols. Le prédimensionnement d'un système d'exhaure adapté doit intégrer à la fois les caractéristiques du projet, celles de la nappe et les contraintes la gestion de l'eau lors de la phase travaux.

Ainsi par exemple, lorsque la nappe est peu profonde et très productive, la réalisation de parking s'avère délicate comme c'est le cas pour la nappe de Grenoble. Par ailleurs, des possibilités limitées de rejet de l'eau d'exhaure imposent des contraintes supplémentaires sur la conception d'un système d'exhaure adapté.

Les différents éléments à prendre en compte pour la réalisation de parkings et une démarche de prédimensionnement de systèmes d'exhaure à l'aide d'outils de modélisation sont présentés ici dans le cadre de la nappe de Grenoble avec deux exemples :

- le niveau de rabattement recherché est constant ;
- le niveau de rabattement recherché est variable dans l'espace.

II. PRÉDIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME D'EXHAURE POUR UN PARKING AVEC UN RADIER HORIZONTAL

Dans ce premier cas, deux niveaux de parkings sont envisagés avec un niveau similaire de rabattement sur l'ensemble de la surface concernée (environ 1 000 m²). Des palplanches autour du site ainsi que la réalisation d'un bouchon de fond sont les solutions retenues de façon à limiter les débits d'exhaure. En effet une des contraintes principales de ce projet réside dans des possibilités limitées de rejet de l'eau d'exhaure.

La question posée est de savoir quelles sont les caractéristiques de perméabilité du bouchon de fond que le promoteur doit spécifier à l'entreprise en charge de le réaliser pour que le débit d'exhaure soit inférieur ou égal à 250 m³/h.

En raison de la configuration des parkings et de la piézométrie de la nappe sur le secteur concerné, un modèle 2D vertical simulant les écoulements souterrains a été réalisé (code Feflow).

Ce modèle permet de simuler l'hydrodynamique des écoulements résultants à la fois des caractéristiques du projet (palplanches, bouchon de fond, pompages) et de celles de la nappe. Il est ainsi possible de tester l'impact sur les débits d'exhaure de différentes valeurs des caractéristiques du bouchon de fond et/ou des palplanches. Pour prendre en compte les variabilités des perméabilités de l'aquifère liées à un nombre restreint de mesures, l'impact de la variabilité de ce paramètre a également été testé.

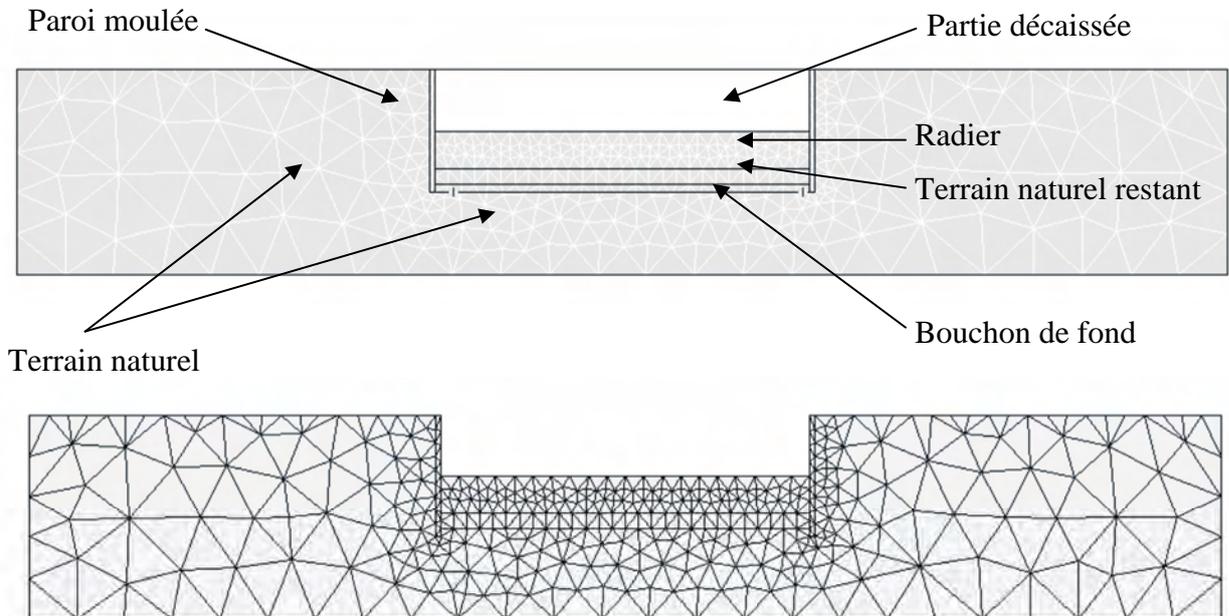


Figure 1 - Conception du système de limitation des débits d'exhaure et maillage du modèle

Plusieurs simulations ont été réalisées en faisant varier :

- la longueur des palplanches (13, 14 et 15 m) ;
- la perméabilité du bouchon de fond (10^{-6} , 2.10^{-6} , 5.10^{-6} et 10^{-5} m/s) ;
- la perméabilité de l'aquifère (2 à 8.10^{-3} m/s) ;
- la piézométrie (hautes eaux ou hautes eaux exceptionnelles).

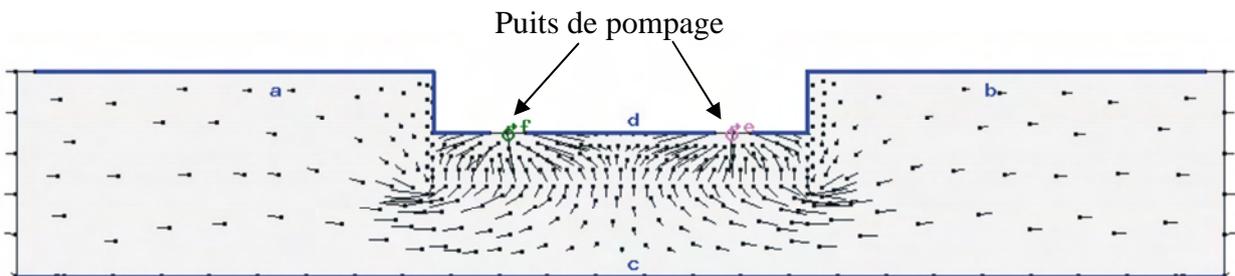


Figure 2 - Résultat du modèle réalisé (visualisation des vitesses d'écoulement)

La conclusion de l'ensemble de ces simulations est que le principal paramètre influençant le débit pompé est la perméabilité du bouchon de fond. Pour l'ensemble des parkings le débit devant être prélevé pour obtenir le rabattement requis varie entre plus de $1\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ pour une perméabilité de 10^{-5} m/s et environ $100\text{ m}^3/\text{h}$ pour une perméabilité de 10^{-6} m/s (pour un bouchon d'un mètre d'épaisseur).

Le promoteur souhaitant se limiter à un débit de 250 m³/h, le modèle a été testé de façon à obtenir ce débit. La perméabilité de bouchon de fond correspondante, résultant de la modélisation, est de l'ordre de 2.10⁻⁶ m/s.

II.3. Prédimensionnement d'un système d'exhaure pour un parking avec différents niveaux de radiers

Dans le cadre de ce projet, les niveaux des radiers devant être réalisés impliquent différentes cotes de rabattement. (Cf. figure 3).

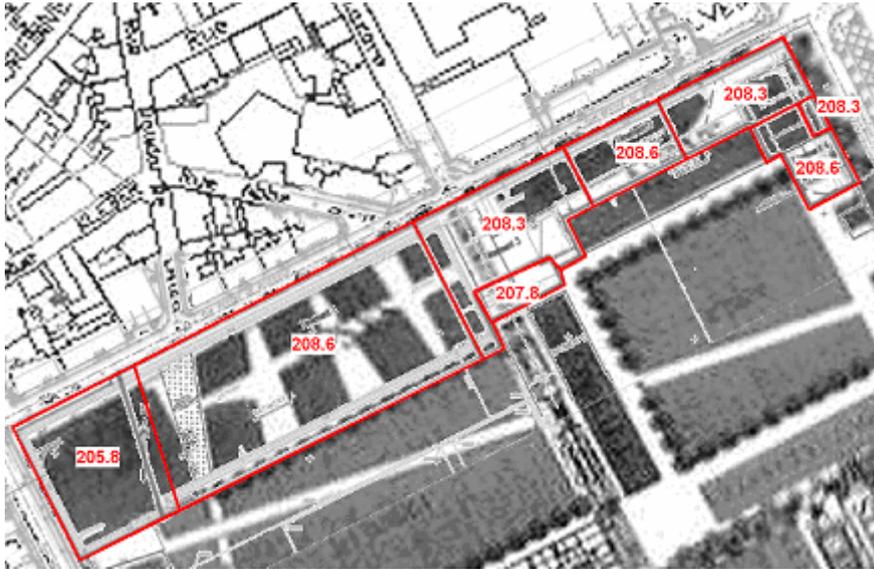


Figure 3 - Niveaux de rabattement envisagés (M. NGF)

Le niveau du terrain naturel est à environ 213 m NGF et celui de la nappe à environ 210 m NGF. La réalisation hors d'eau des sous-sols nécessite de rabattre la nappe d'un mètre à plus de 4 mètres. Les contraintes du projet résident dans la limitation des débits à prélever (et à rejeter).

L'importance des débits d'exhaure dépend de plusieurs facteurs dont :

- le contexte hydrogéologique (perméabilité des terrains, niveau de la nappe par rapport au sol...);
- les niveaux de rabattement qui dépendent du niveau initial de la nappe et des cotes de fond de fouille;
- les aménagements possibles pour limiter ces débits (palplanches, bouchon de fond...).

À l'inverse du cas précédent, la conception globale du système d'exhaure, et plus particulièrement des ouvrages destinés à limiter le débit nécessaire au rabattement, de la nappe, n'était pas arrêtée (présence ou non de palplanches, de bouchon de fond, casiers de palplanches...).

Par ailleurs, les eaux pompées doivent être évacuées. Pour cela deux solutions (non exclusives) étaient envisagées :

- le rejet en réseau (qui dépend de la capacité du réseau à accepter un débit supplémentaire);
- la réinjection dans la nappe souterraine.

Cette dernière solution est limitée à un certain débit. En effet, la réinjection d'eau dans la nappe entraîne la formation d'un dôme au niveau de la zone de réinjection. Ce dôme peut entraîner des inondations d'ouvrages enterrés situés à proximité (caves, etc.). Il convient donc d'évaluer également les capacités de la nappe à accepter un débit de réinjection sans que cela crée d'impacts négatifs.

Du fait de la configuration du projet, un modèle 3D a été réalisé à l'aide du logiciel Feflow. Le modèle a ensuite été calé en reproduisant correctement la piézométrie de la nappe (et avec des valeurs de perméabilités cohérentes avec celles mesurées sur le site).

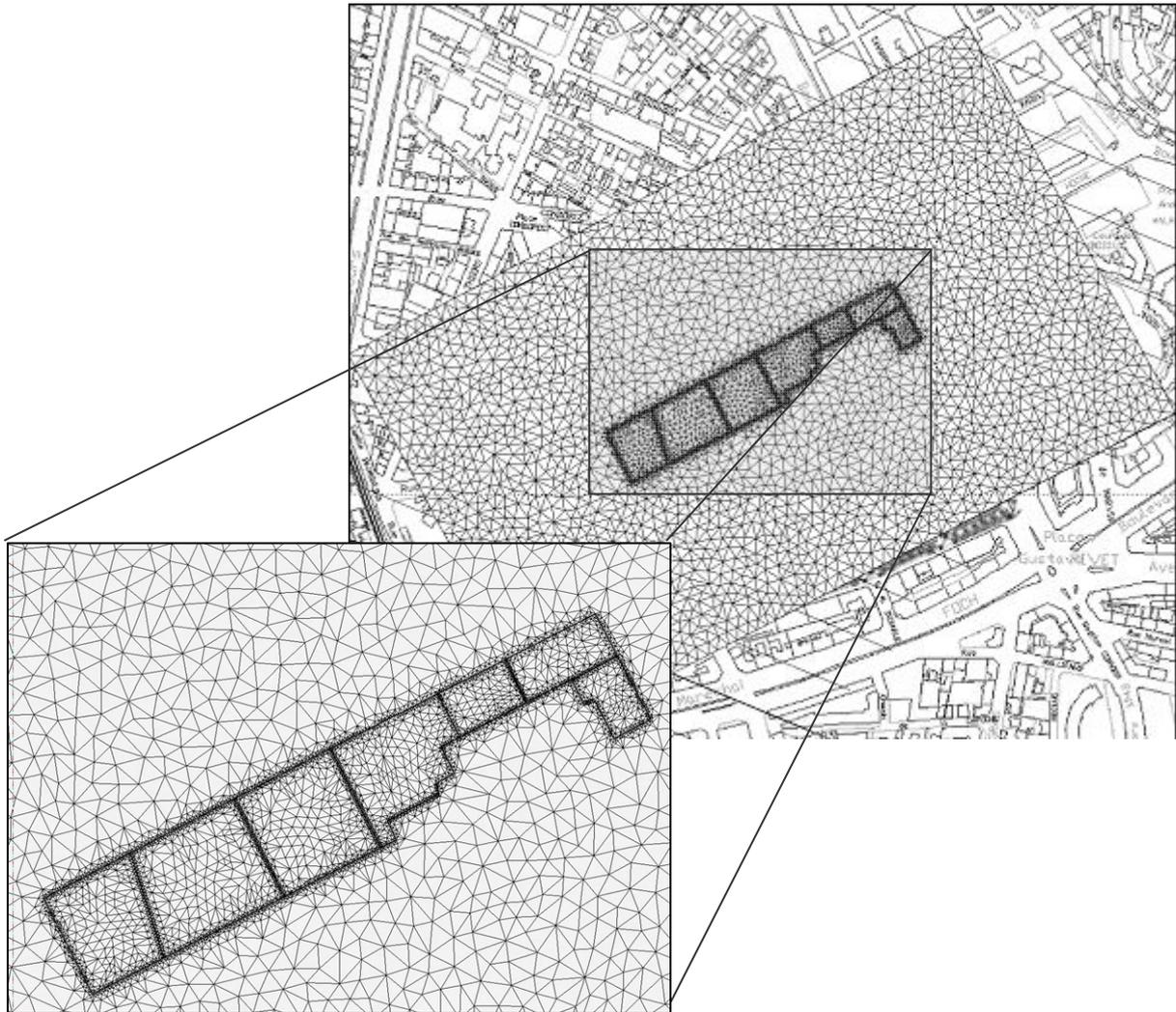


Figure 4 - Maillage du modèle intégrant la prise en compte de casiers de palplanches

Du fait de perméabilités relativement fortes des terrains au niveau du site ($K = 5.10^{-3}$ m/s), et d'après ce qui a pu être réalisé antérieurement sur Grenoble, il est nécessaire d'envisager des dispositifs de limitations des écoulements afin de réduire les débits à prélever (et donc à rejeter). Ces dispositifs sont potentiellement les suivants :

- utilisation de palplanches, en périphérie et/ou pour la réalisation de casiers. La réalisation de casiers permet notamment de réduire les débits à prélever ;
- utilisation d'un bouchon de fond. Ce dispositif s'utilise en plus de la mise en place de palplanches périphériques.

Pour le rejet des eaux d'exhaure deux dispositifs sont envisageables :

- un rejet limité dans le réseau géré par la Métro ;
- une réinjection du complément dans la nappe souterraine.

Ainsi, au global 3 options sont alors potentiellement envisageables pour réaliser les sous-sols prévus :

- **option 1a** : utilisation de palplanches (bouchon de fond exclusivement sur le secteur ouest) et rejet exclusivement dans le réseau ;
- **option 1b** : utilisation de palplanches (bouchon de fond exclusivement sur le secteur ouest) et rejet dans le réseau et réinjection en nappe ;
- **option 2** : utilisation de palplanches périphériques ainsi que d'un bouchon de fond sur l'ensemble de la zone.

Dans tous les cas, la zone ouest dispose d'un bouchon de fond. En effet, le niveau de fond de fouille est tel (205,8 m NGF soit un rabattement d'environ 4 m) qu'il est nécessaire de mettre en place un bouchon de fond pour pouvoir rabattre suffisamment la nappe.

Ces différentes options ont été étudiées de façon à déterminer une solution d'exhaure qui soit adaptée au contexte.

II.3.1. Option 1a - Mise en place de palplanches et réinjection de l'eau d'exhaure dans le réseau

L'option 1a correspond à l'utilisation exclusivement de palplanches, sauf au niveau de la zone ouest (casier 1 de la figure 5) où un bouchon de fond sera utilisé.

Sans casiers, le débit calculé à extraire est supérieur à 4 500 m³/h. Ce débit très important implique d'envisager des casiers de façon à réduire le débit d'exhaure. Ces casiers sont délimités par des palplanches. Dans un premier temps 7 casiers ont été modélisés (Fig. 5).

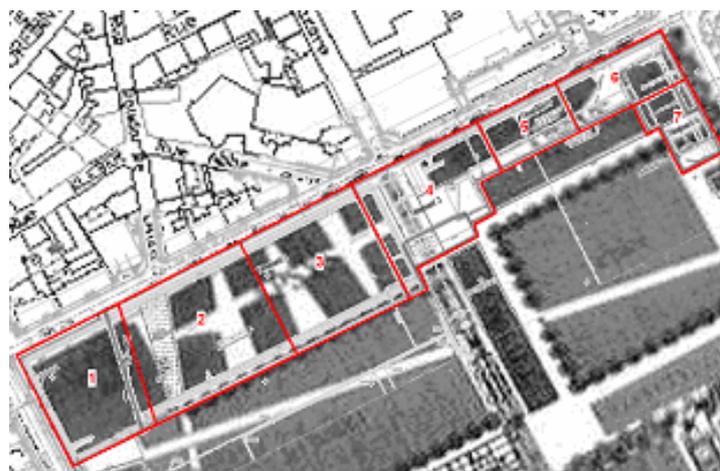


Figure 5 – Localisation des différents casiers considérés pour le scénario 1a

À titre d'illustration les rabattements simulés par le modèle dans un casier sont indiqués aux figures suivantes.

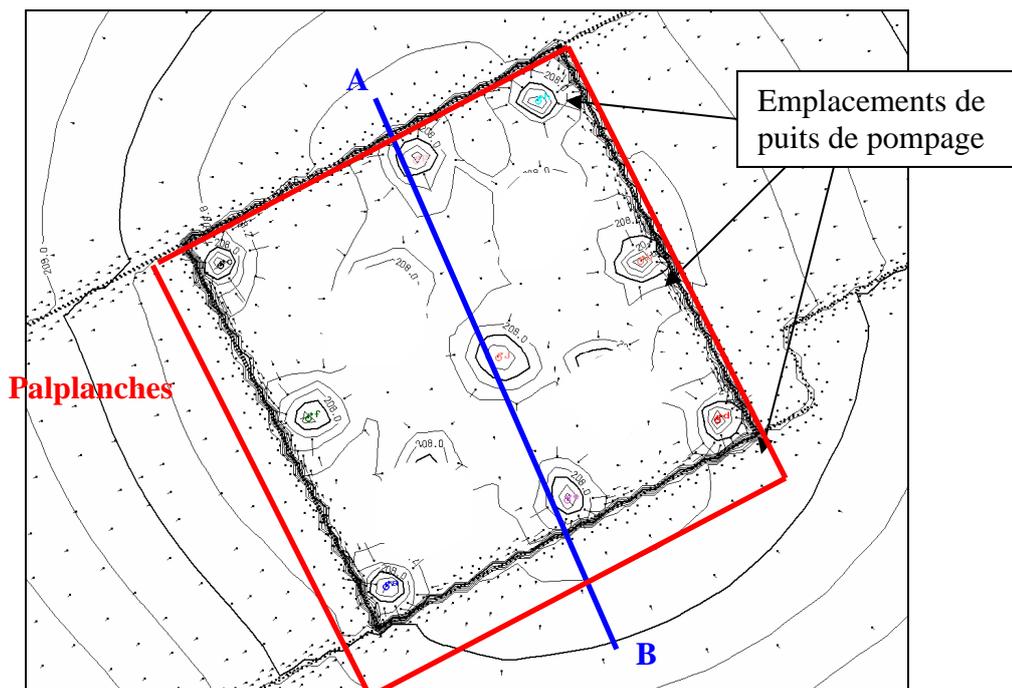


Figure 6 - Exemple de rabattements engendrés par le pompage sur la nappe

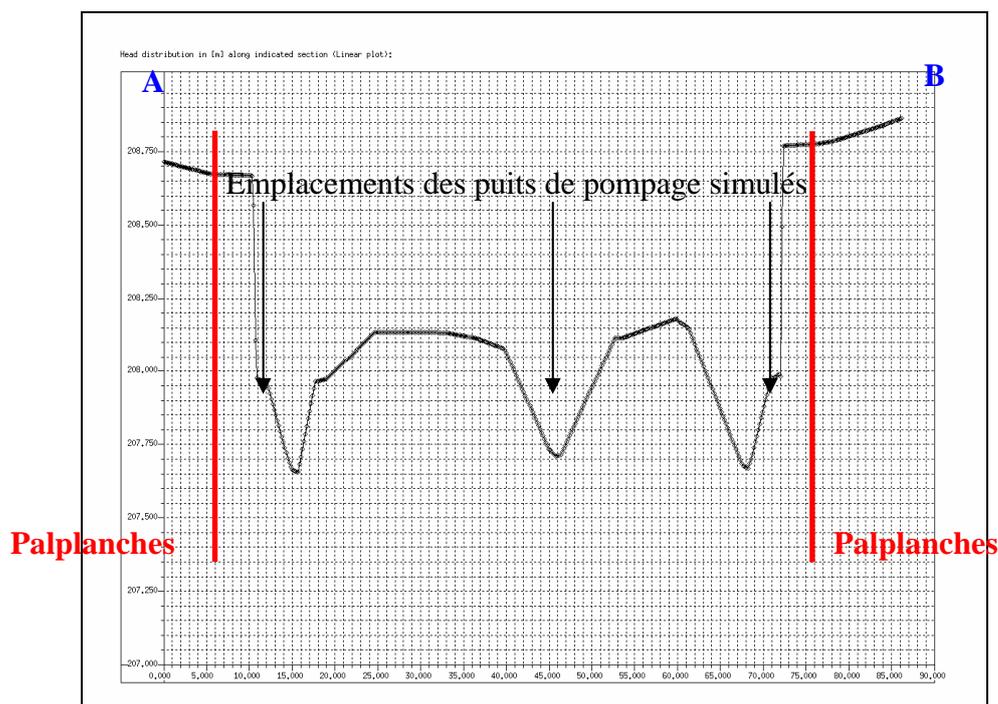


Figure 7 - Exemple de rabattements engendrés par le pompage sur la nappe (vue en coupe)

Pour l'ensemble du projet, les débits d'exhaure requis pour le rabattement de la nappe varient de 1 100 m³/h à 2 050 m³/h suivant le casier¹.

¹ à l'exception de la zone ouest – « casier 1 » – où la présence d'un bouchon de fond permet de réduire le débit d'exhaure à environ 100 m³/h.

Une seconde simulation a alors été réalisée en prenant en compte des casiers de taille plus réduite (figure 8).

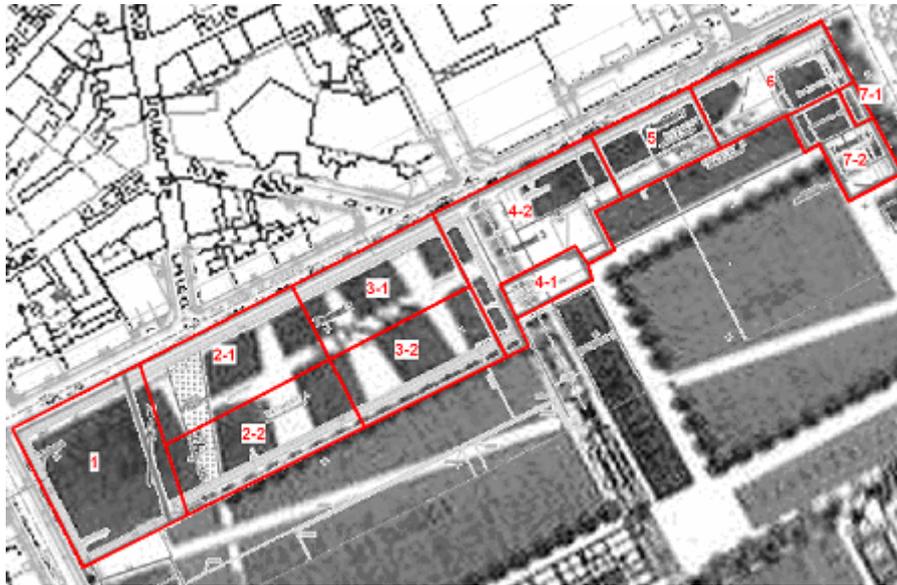


Figure 8 – Localisation des différents casiers considérés pour le scénario 1a (variante)

Malgré la sectorisation de la zone étudiée et la profondeur des palplanches, les débits à pomper pour rabattre suffisamment la nappe restent très importants (compris entre 250 et 1 600 m³/h)¹.

Du fait des contraintes de rejet dans le réseau cette solution n'est pas envisageable.

II.3.2. Option 1b – Mise en place de palplanches et réinjection de l'eau d'exhaure dans le réseau et dans la nappe

Les caractéristiques des dispositifs de limitation des écoulements de cette option restent les mêmes que celles de l'option 1a : palplanches en périphérie du site ainsi que des palplanches « intérieures » pour former des casiers. Le bouchon de fond n'existe que sur la zone du casier 1. La différence avec l'option 1a correspond au rejet des eaux pompées qui sont ici partiellement rejetées dans le réseau et réinjectées dans la nappe.

En prenant l'hypothèse que le débit maximum acceptable dans le réseau est de l'ordre de 350 m³/h, les débits restants à injecter dans la nappe varient entre 400 et 1 250 m³/h selon les casiers.

Or, une étude précédente de Sogreah réalisée sur ce site indiquait que le débit maximal pouvant être réinjecté dans la nappe était de l'ordre de 300-400 m³/h. Au-delà, les risques de perturbations étaient trop importants : inondations de caves ou inondation des terrains lors de hautes eaux exceptionnelles.

En effet, la réinjection d'eau en nappe entraîne une hausse locale du niveau d'eau dans la nappe qui peut être préjudiciable suivant son importance et la présence d'ouvrages enterrés à proximité. L'impact sur la nappe d'une réinjection de 400 m³/h a été modélisé (en même temps que le pompage du même débit). Les résultats sont présentés à la figure 9.

Cette réinjection induit en limite de site une hausse de la nappe pouvant varier entre 20 et 50 cm, ce qui correspond à une valeur limite de débit de réinjection du fait de la présence de caves à proximité du site.

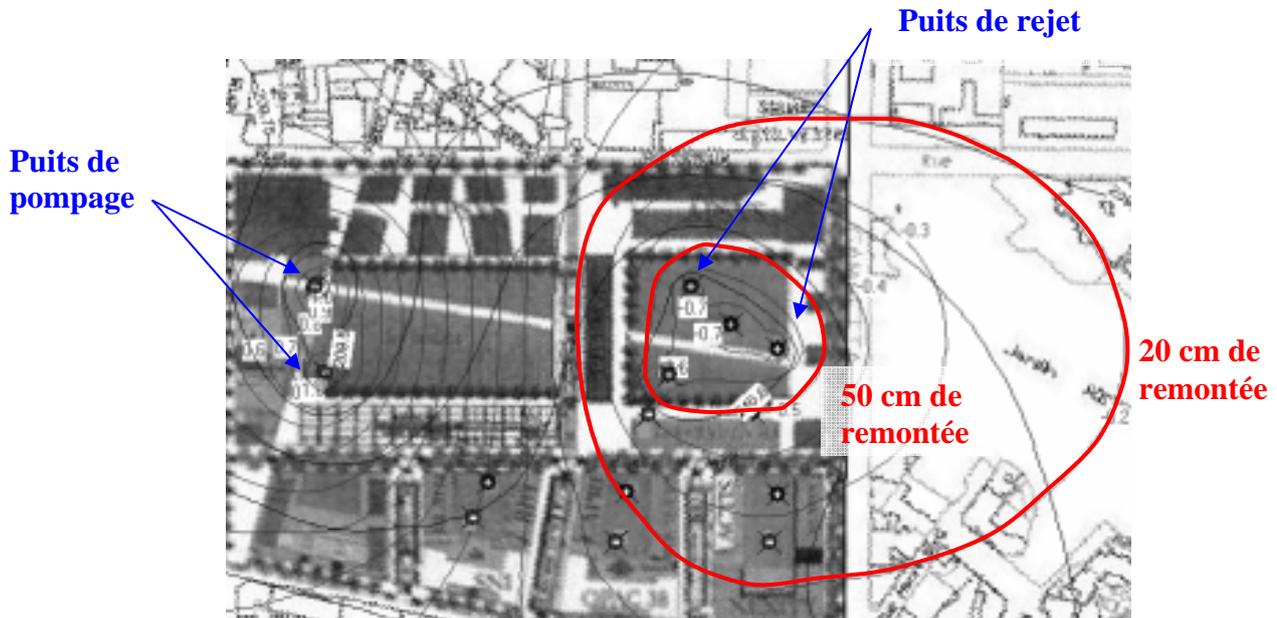


Figure 9 – Impact du doublet pompage – réinjection à 400 m³/h

En considérant une réinjection couplée réseau et nappe (soit un débit maximum de l'ordre de 650-750 m³/h), les solutions de réinjection ne seraient pas suffisantes pour la majorité des débits d'exhaure estimés pour chaque casier.

II.3.3. Option 2 – Mise en place de palplanches et d'un bouchon de fond

Les aménagements correspondant à cette option sont décrits par le schéma suivant (figure 10).

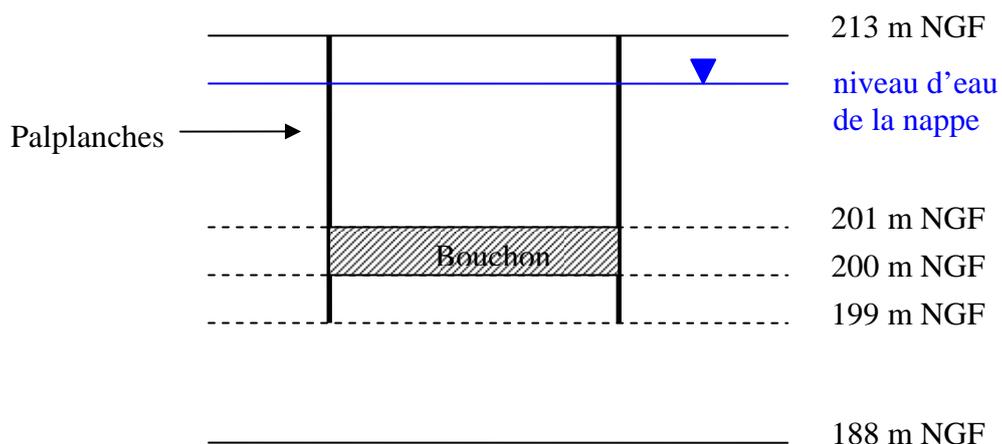


Figure 10 - Représentation schématique des aménagements de l'option 2 visant à limiter les débits d'exhaure

Cette option prend en compte des palplanches uniquement en périphérie du site ainsi qu'un bouchon de fond sur l'ensemble de la zone à excaver.

Deux simulations des écoulements souterrains dans ce contexte ont été réalisées :

- la première prend en compte une perméabilité de bouchon de fond de 2.10^{-6} m/s. Cette hypothèse est basée sur les résultats de bouchons de fond mis en place sur d'autres opérations immobilières dans le même secteur ;
- la seconde simulation considère une perméabilité de bouchon de 1.10^{-7} m/s. Cette perméabilité correspond aux spécifications d'une entreprise spécialisée qui a déjà réalisé plusieurs opérations avec mise en place de bouchon de fond.

Ces deux simulations donnent les résultats suivants :

- pour une perméabilité de bouchon de fond de 2.10^{-6} m/s le débit d'exhaure estimé par le modèle est de $400 \text{ m}^3/\text{h}$ pour l'ensemble du site ;
- pour une perméabilité de 1.10^{-7} m/s, le débit obtenu par la modélisation est d'environ $50 \text{ m}^3/\text{h}$ pour l'ensemble de la zone.

Ainsi, suivant les hypothèses prises en compte, le débit d'exhaure est compris entre 50 et $400 \text{ m}^3/\text{h}$.

Dans ce cas la solution de rejet mixte - dans le réseau et éventuellement le complément du débit d'exhaure réinjecté dans la nappe - serait suffisante. La gestion des eaux d'exhaure pourrait alors être la suivante :

- rejet dans les réseaux d'environ $350 \text{ m}^3/\text{h}$;
- rejet d'un éventuel surplus de débit dans la nappe avec la mise en place d'un système de réinjection à partir de puits ou d'une tranchée drainante couplée à des puits.

Il est important de préciser que les simulations effectuées considèrent que le bouchon de fond est homogène et que, lors des travaux, la mise en œuvre de celui-ci devra être effectuée dans les règles de l'art de façon à garantir sa continuité.

III. CONCLUSION

La conception d'un système d'exhaure adapté pour rabattre la nappe dans un contexte difficile (nappe peu profonde et très transmissive, contraintes fortes liées au rejet des eaux d'exhaure) implique de connaître non seulement les caractéristiques du contexte hydrogéologique mais également l'impact sur les écoulements souterrains des différents dispositifs de limitation des débits d'exhaure (palplanche, bouchon de fond).

Cet impact peut être simulé par une modélisation appropriée des écoulements souterrains.

Il est alors possible de caractériser les composantes d'une solution d'exhaure qui permette d'atteindre les rabattements de la nappe requis tout en respectant les contraintes de rejet. De cette façon un prédimensionnement d'une solution d'exhaure adaptée peut être obtenu.

Cette modélisation est plus ou moins élaborée suivant la problématique abordée et la complexité du projet. ■

Le projet Mozart à Paris (75) – Issy-les-Moulineaux (92) Hydrogéologie, fondations profondes et réglementation

Gérard Monnier

BURGEAP – 27, rue de Vanves - 92 772 Boulogne-Billancourt Cedex - g.monnier@burgeap.fr

À la frontière entre les communes de Paris et d'Issy-les-Moulineaux, la société BOUYGUES IMMOBILIER réalise un projet immobilier dénommé Mozart nécessitant la déconstruction d'un ensemble immobilier comprenant la tour EDF et le bâtiment SITI, premier site informatique de France, et laissant place à trois nouvelles opérations, un R+ 6, dénommé Farman, un R+7, Eqwater et une nouvelle tour de grande hauteur (23 étages) nommée Mozart.



Figure 1 - Le projet Mozart dans son contexte urbanistique

Ce projet vient terminer la rénovation complète, sur 20 ans environ, de la plaine d'Issy-les-Moulineaux, initialement industrielle, aujourd'hui tertiaire ou à usage d'habitations. Le projet représente environ 90 000 m² de SHON (5 500 utilisateurs). Trois niveaux de sous-sols à usage de parking sont existants sur la partie isséenne (essentiellement, une petite partie sur Paris). Compte tenu du fait que le radier de ces sous-sols devra être intensément percé pour la réalisation des fondations du projet et que la nappe se trouve environ trois mètres au-dessus du radier existant, la nécessité de réaliser un rabattement de nappe en phase travaux est apparue immédiatement. Or, le projet se trouve dans un contexte hydrogéologique très productif (alluvions sur craie ; la transmissivité est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-2}$ m²/s, voire plus).

En conséquence, il a donc été nécessaire de créer une enceinte périmétrique aux trois niveaux de sous-sols existants au moyen de techniques diverses (paroi molle, jet grouting et injections) en fonction des ouvrages « névralgiques » voisins et qui devaient rester en fonctionnement (alimentation en électricité d'une partie du sud de Paris). Sur Paris, le projet comporte 6 niveaux de sous-sol qui seront réalisés ultérieurement sous protection de parois moulées.

I. L'OUVRAGE EXISTANT, AVANT INTERVENTION

La parcelle objet du présent article est délimitée par la rue Bara au sud-ouest, la rue Farman au sud-est, le périphérique et un terrain de la société SYCTOM au nord et un terrain EDF à l'ouest (Figure 1). En 1864, une usine de fabrication de gaz de houille (usine à gaz) y est construite. Elle fonctionnera jusqu'en 1908, date de sa démolition. En 1911, une centrale thermique prend le relais jusqu'en 1961. En 1965, les services financiers d'EDF-GDF s'installeront sur le site. En 1971, un ensemble de bâtiments, dont une tour, est construit. Cet ensemble comporte trois niveaux de sous-sols, qui sont réalisés sous pompage général dans les alluvions et la craie (Figure 2), sans enceinte périphérique limitant le débit. Celui-ci est de l'ordre de 5 000 m³/h. Lors des reconnaissances géologiques effectuées en 2006 et 2007, il est apparu que les alluvions anciennes étaient particulièrement crues (pauvres en fines) alors que classiquement, une teneur de 20 % d'éléments fins de granulométrie inférieure à 0,1 mm est mesurée. Cette observation peut vraisemblablement être rapprochée de ce débit de pompage très important mis en œuvre dans les années 1970 : lessivage des fines ? phénomène de suffosion ?

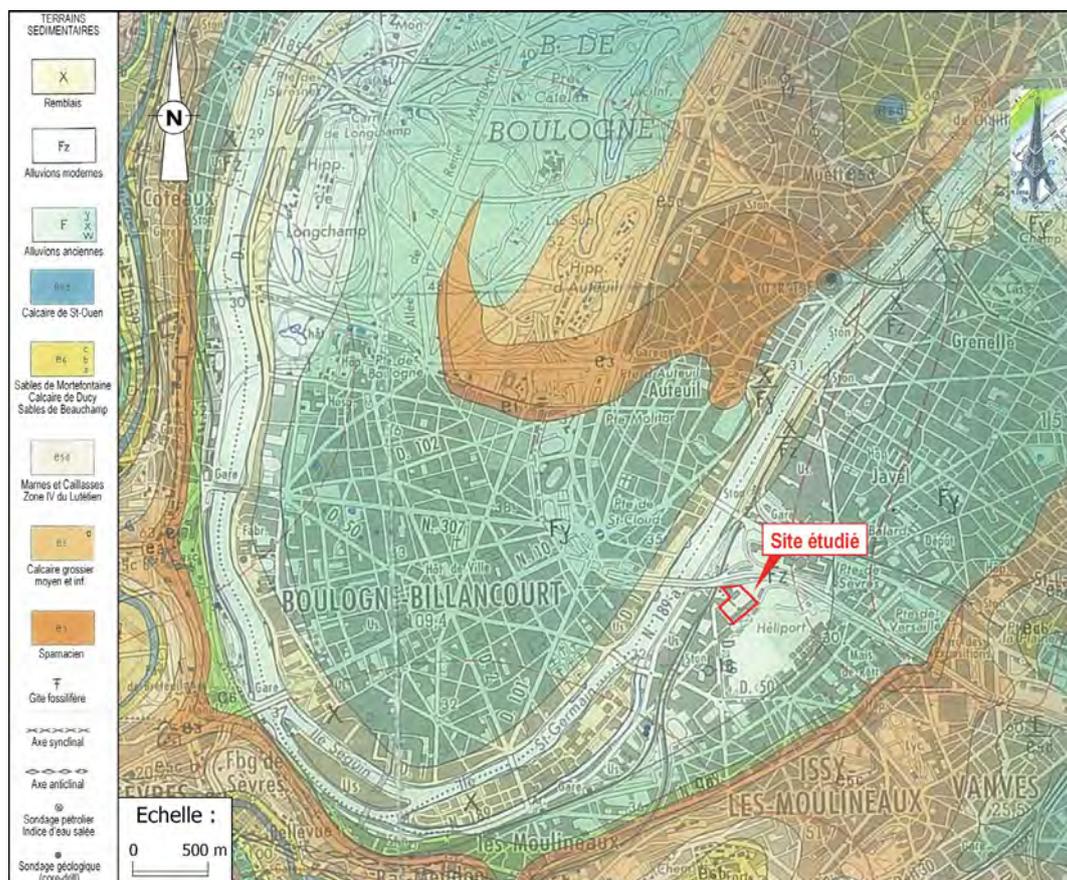


Figure 2 - Localisation du site Mozart sur la carte géologique de Paris

II. LE PROJET

Dans cet article, nous ne nous intéresserons qu'aux infrastructures actuellement en cours de réalisation (octobre 2007), c'est-à-dire, pour l'essentiel, les infrastructures isséennes, les travaux du secteur Farman ouest n'ayant pas encore débuté.

Autour des trois niveaux de sous-sols existants et de manière à limiter autant que possible le débit global de pompage de façon à ne pas se retrouver dans la configuration des années 1970 (environ 5 000 m³/h), il a donc été nécessaire de réaliser une enceinte très peu perméable. Parallèlement aux rues Bara et Farman, et au terrain SYCTOM, ce sont des parois molles (parois au coulis, non armées) qui ont été construites (Figure 3).

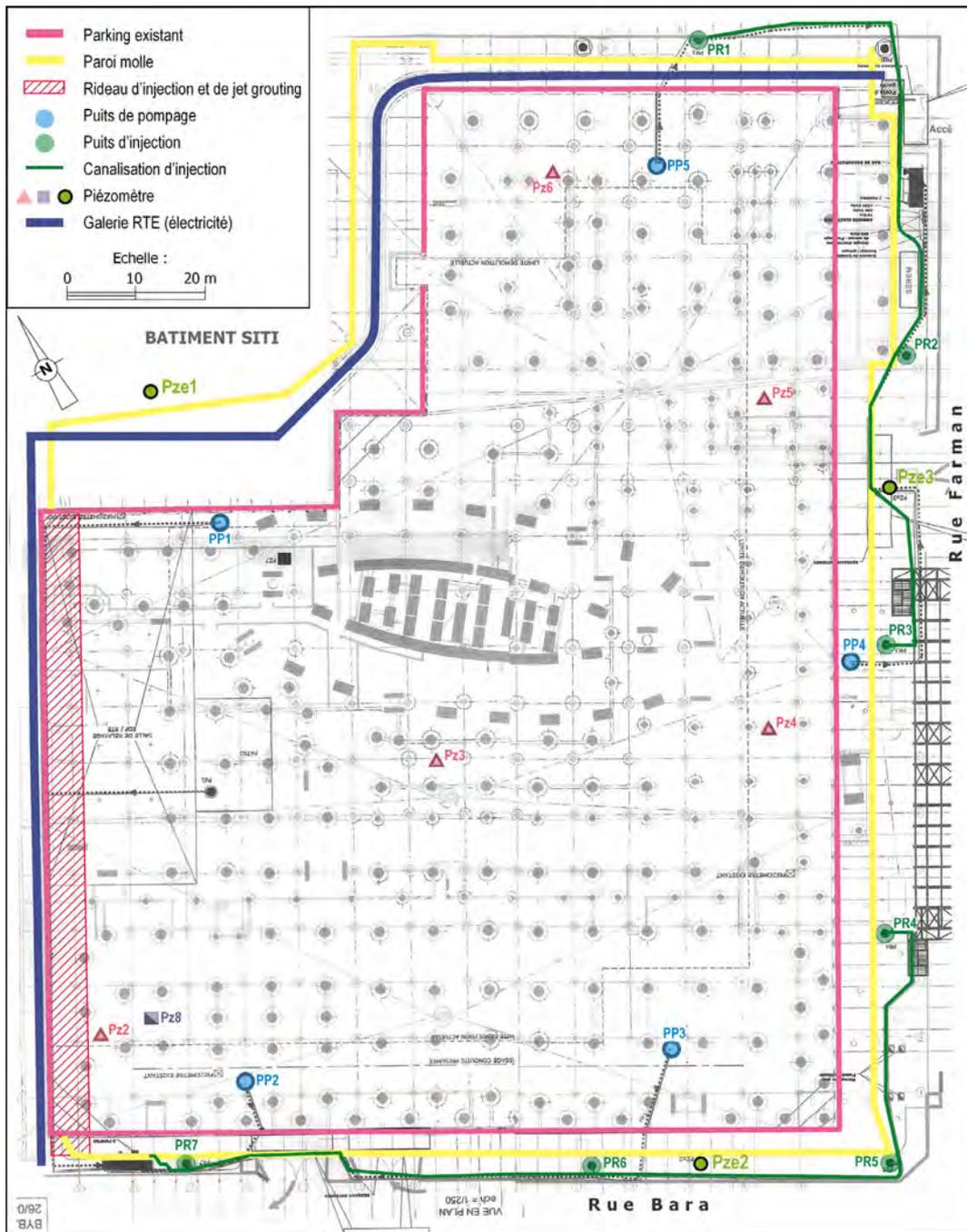


Figure 3 - Localisation des sous-sols existants, de la galerie RTE (distribution d'électricité) et des puits de pompage - réinjection

Pour « fermer le fond de la boîte », la réalisation d'un fond injecté (horizontal) n'était pas envisageable car cette technique aurait conduit à la création d'un très grand nombre de forages d'injection au travers du radier du 3^e sous-sol, avec tous les problèmes d'apports d'eau mentionnés en tête d'article, le sous-sol le plus profond pénétrant de 3 mètres environ dans la nappe. En conséquence, il a donc été retenu de descendre les parois molles jusque dans la craie peu perméable (fiche hydraulique). En effet, dans sa partie supérieure, sur 25 mètres environ, la craie est intensément fissurée et fracturée (c'est la frange d'altération). Plus en profondeur, elle devient très peu perméable. Lorsqu'elle ne s'avère pas trop profonde, on peut donc ancrer les parois molles (ou autres structures) dans cette couche de craie peu perméable. La profondeur de la craie peu perméable a été déterminée au moyen d'essais au micromoulinet (cf. infra).

Coté ouest des trois sous-sols existants, la réalisation de parois molles s'est avéré impossible en raison de l'existence d'une galerie souterraine dans laquelle chemine des câbles électriques d'importance névralgique pour l'alimentation du sud de Paris. En conséquence, pour ce secteur, c'est un rideau d'injections qui a été envisagé au stade études. Par la suite, l'entreprise SOLETANCHE BACHY, attributaire du marché fondations profondes et travaux de mise hors d'eau, a proposé et mis en œuvre une solution mixte constituée d'une part, de colonnes de jet grouting dans les alluvions modernes et anciennes ainsi que dans la partie sommitale de la craie, et d'autre part, de plusieurs lignes d'injection dans le reste de la craie (Figure 4).

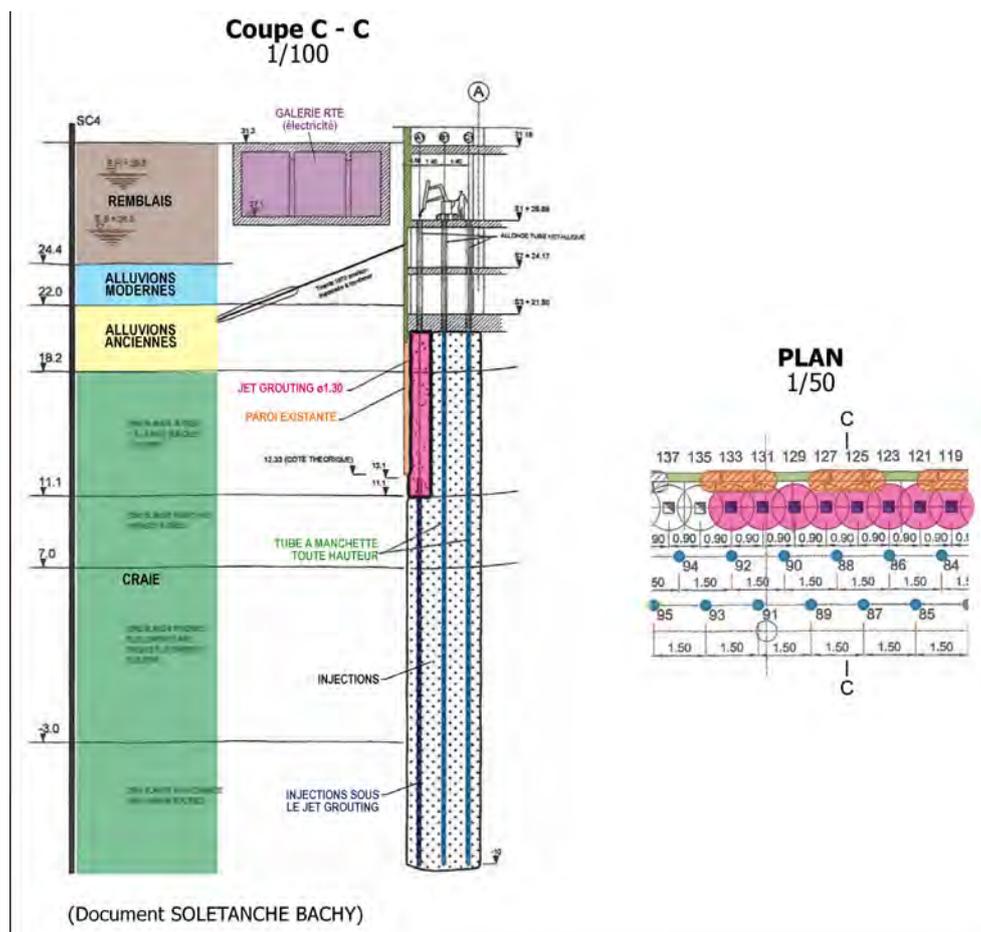


Figure 4 - Écran d'injection et de jet grouting coté ouest de la fouille

III. LES ÉTUDES PRÉALABLES ET LA PRÉVISION

Les études hydrogéologiques qui ont été réalisées pour ce projet sont les suivantes : évaluation prévisionnelle des niveaux des plus hautes eaux souterraines, définition des cotes de nappe dimensionnantes, réalisation d'essais au micromoulinet afin d'identifier la base de la craie perméable, optimisation des fondations profondes (fiche hydraulique), étude de la réinjection des eaux en périphérie extérieure de l'enceinte (1), évaluation du débit résiduel (effectuée au moyen d'une modélisation mathématique), impact à proximité et à distance du site du pompage et de la réinjection, pour les besoins de la rédaction du dossier Loi sur l'eau. Un certain nombre d'essais et de moyens ont été mis en œuvre pour répondre à ces différents points. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux essais au micromoulinet et au modèle mathématique.

III.1 Les essais au micromoulinet

Le micromoulinet de forage a été originellement développé pour localiser, dans des puits d'approvisionnement en eau, les couches de terrain productrices. À l'opposé, pour le génie civil, ce ne sont pas les couches perméables qui sont recherchées mais plutôt les terrains peu à très peu perméables dont on pourrait se servir comme « horizons résistants aux écoulements » pour limiter le débit résiduel (2).

Un micromoulinet est un outil qui permet de mesurer des vitesses ascendantes ou descendantes dans un forage soumis à un pompage. Sur un tronçon donné, la pente d'un segment de vitesses renseigne sur la perméabilité d'une couche. Si la vitesse ne varie pas, cela signifie que la couche ne produit pas d'eau, ou en tout cas, pas suffisamment d'eau pour permettre une augmentation mesurable de la vitesse de la turbine du micromoulinet. Dans le cas du projet Mozart, trois essais ont été réalisés. On trouvera en figure 5 les graphes de ces essais (en ordonnée, les cotes NGF ; en abscisse, le pourcentage du débit maximum pompé, de 0 à 100 %). Les graphes montrent des épaisseurs de craie pour lesquelles les débits (ou vitesses) ne varient pas : les mesures s'alignent sur la verticale « 0 % du débit maximum ». Ces couches correspondent à la craie peu perméable. On constate que la limite supérieure de la craie peu perméable est variable : -8,5 NGF sur MM1, -7,5 NGF sur MM2 et -3,5 NGF sur MM3. La comparaison de ces valeurs avec celles d'autres essais faits sur un site voisin (EOS GENERALI ; figure 5) confirme le caractère aléatoire de cette limite et ne permet pas d'identifier un facteur influençant prédominant tel que par exemple, la proximité du fleuve. En fait dans le lit majeur du fleuve, la limite supérieure de la craie peu perméable montre des variations, parfois importantes, qui résultent de facteurs tels que la dissolution, la relaxation des contraintes ou la tectonique, variations qu'il est difficile de prévoir.

Toutefois, sur la base des trois essais réalisés sur le site Mozart, il apparaît que la limite supérieure de la craie peu perméable est plus profonde à l'ouest qu'à l'est. En conséquence, les profondeurs des fiches hydrauliques suivantes ont donc été préconisées : pour le rideau d'injection, coté ouest, fiche hydraulique jusqu'à -10 NGF ; pour la paroi molle côté rue Bara, fiche hydraulique à -10 NGF (soit une pénétration dans la craie peu perméable comprise entre 2 et 6 mètres) ; pour la paroi molle côté rue Farman, fiche hydraulique à -8 NGF (soit une pénétration de 4 mètres) ; pour la paroi molle côté nord-est, fiche hydraulique à -10 NGF (soit une pénétration comprise entre 1 et 6 mètres).



Figure 5 - Essais au micromoulinet réalisés sur site et hors site :
identification de la limite supérieure de la craie, peu perméable

III.2 La modélisation

Afin d'évaluer le débit résiduel de la fouille et les impacts à proximité et à distance du pompage, un modèle mathématique a été réalisé (Figure 6). L'extension du modèle résulte d'une analyse du contexte géologique et hydrogéologique régional. L'extension en plan du modèle est de l'ordre de 30 km² avec un linéaire de 12 km de Seine. Il couvre une partie des VII^e, XV^e et XVI^e arrondissements de Paris ainsi que la quasi-totalité de Boulogne-Billancourt, une partie d'Issy-les-Moulineaux (et des surfaces limitées d'autres commune des Hauts de Seine). En profondeur, sept unités géologiques ont été définies : les alluvions modernes et anciennes, les Marnes de Meudon, l'Yprésien, les formations géologiques sus-jacentes à l'Yprésien et les craies perméable et peu perméable.

Le calage du modèle a été réalisé en particulier grâce à quatre suivis d'ondes de crue de Seine (Figure 7) en nappe qui ont permis de définir des valeurs de colmatage du fleuve (3), K/e avec K, perméabilité de la couche colmatante et e, son épaisseur : $3 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ pour le tronçon de fleuve au droit d'Issy-les-Moulineaux et, sur le reste du linéaire, pas de colmatage (contact hydraulique parfait entre la nappe et le fleuve). Afin d'optimiser ce paramètre, un recensement complet des modes de confortement des berges du fleuve a été fait (palplanches, mur de quais, état naturel, etc.).

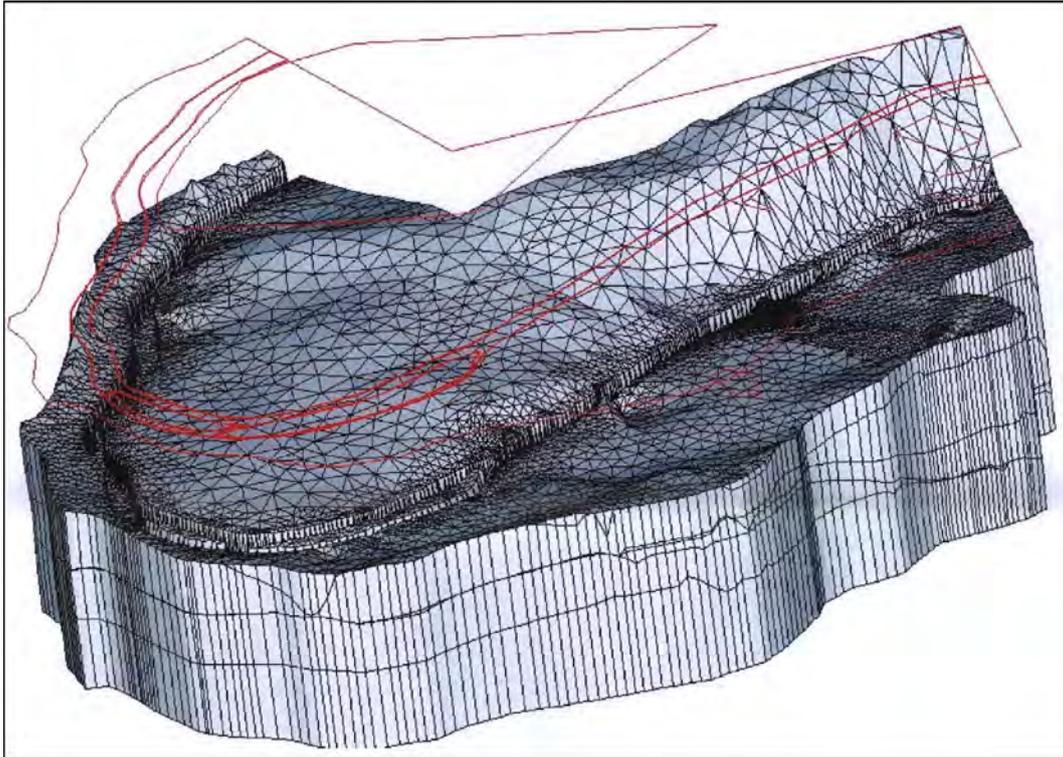


Figure 6 - Vue en 3D du domaine du modèle

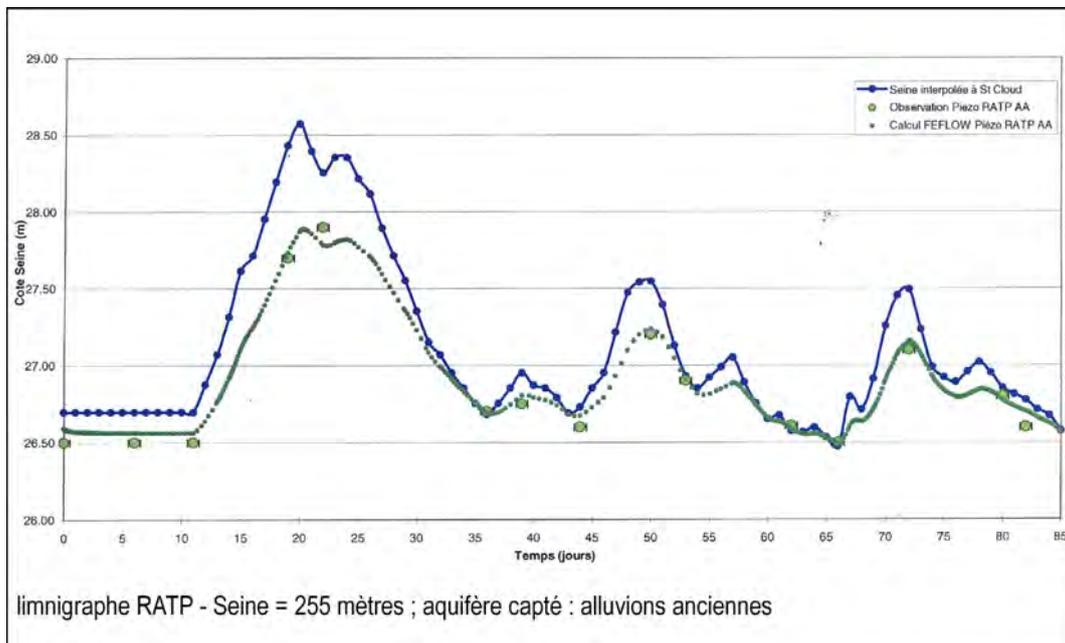


Figure 7 - Site Rhin et Danube à Boulogne-Billancourt
Onde de crue effectivement mesurée et onde de crue restituée par le modèle

Les perméabilités horizontale et verticale des parois molles ont été fixées à 10^{-9} m/s et celles du rideau d'injection respectivement de $5 \cdot 10^{-6}$ m/s et 10^{-6} m/s, pour une épaisseur de 2 mètres. Les perméabilités horizontale et verticale de la craie peu perméable (en base de modèle) ont été fixées à $5 \cdot 10^{-6}$ m/s, valeur issue des mesures faites sur le chantier EOS GENERALI ($3 \cdot 10^{-6}$ m/s ; Figure 1) en y ajoutant un coefficient de sécurité.

Les perméabilités des différentes formations géologiques ont été déterminées sur la base d'un essai de pompage réalisé sur site et sur bases bibliographiques :

- K_h craie perméable = 10^{-3} m/s, avec $K_v = K_h$
- K_h alluvions anciennes = 3.10^{-3} m/s et $K_v = 10^{-4}$ m/s
- K_h alluvions modernes = 10^{-5} m/s et $K_v = 5.10^{-7}$ m/s, etc.

III.3 Les résultats de la modélisation

Dans un premier temps, la modélisation a permis de définir les cotes des niveaux des plus hautes eaux souterraines, cotes dimensionnantes pour le projet. La cote de protection de 30 NGF a été retenue pour la partie Mozart Issy-les-Moulineaux. Cette cote correspond à la conjonction d'une crue de Seine cinquantennale, d'un battement saisonnier de nappe de 0,2 mètre et de l'arrêt de tous les pompages existant dans les environs du site (Figure 8).

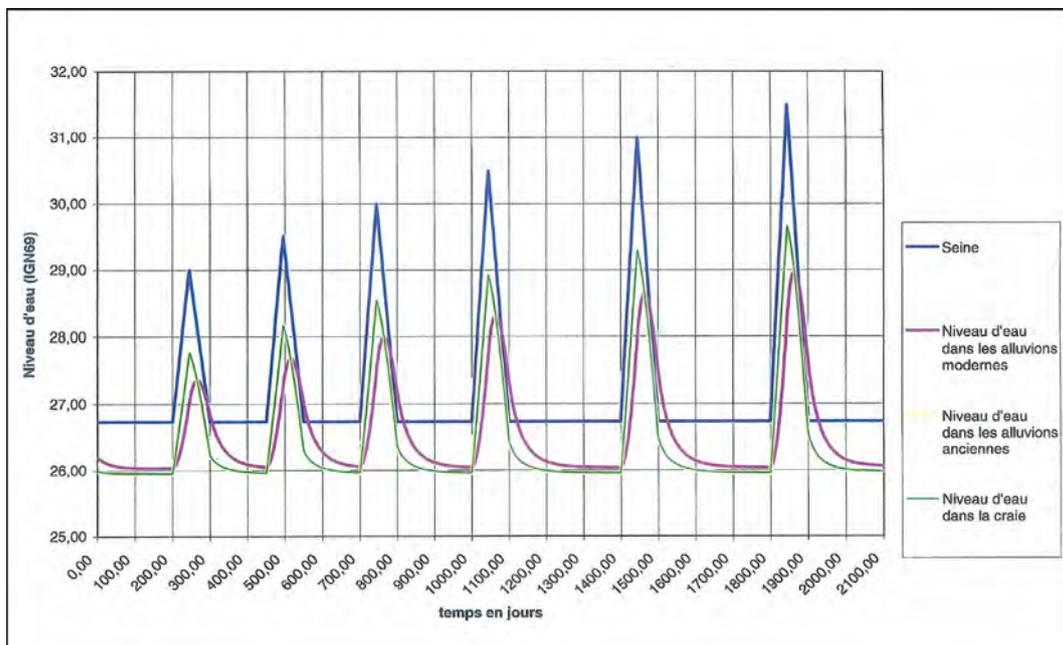


Figure 8 - Réalisation de six tests de propagation d'ondes de crue de Seine
Hauteur de crue : 29, 29,5, 30, 30,5, 31 et 31,5 NGF ; durée des crues : 100 jours
(coté Farman, à 400 mètres de la Seine)

Le débit résiduel attendu dans la fouille limitée par les parois molles et le rideau d'injection a été évalué également grâce au modèle : en nappe « normale » (26 NGF), $230 \text{ m}^3/\text{h}$ et en crue quinquennale (28,5 NGF ; crue « chantier ») : $330 \text{ m}^3/\text{h}$. La modélisation a montré qu'une grande partie de l'apport d'eau (environ 50 %) se faisait au travers du seul rideau d'injection, de perméabilité beaucoup plus élevée que les parois molles. Le modèle a également permis de définir les impacts hydrogéologiques, à proximité et à distance de l'enceinte, du pompage et de la réinjection (Figure 9).

IV. LA RÉGLEMENTATION

Initiées pour certaines en début 2006, les démarches administratives, rendues complexes en particulier parce que le projet se trouve à cheval sur deux départements (Hauts-de-Seine et Paris), se sont terminées par la prise d'un arrêté préfectoral au troisième trimestre 2007, précédant le démarrage du pompage de rabattement de nappe.

On note bien là toute l'importance qu'il y a d'anticiper autant que faire se peut, si possible dès les premières esquisses, les aspects réglementaires de ces grands projets. Ces démarches réglementaires ont porté dans un premier temps sur la rédaction des notices PPRI des différents lots (Plan de Prévention du Risque Inondation) qui furent annexées aux demandes de permis de construire (code de l'urbanisme).

Ces notices portaient essentiellement sur les cotes des planchers fonctionnels, les hauteurs sous poutre des sous-sols, les volumes de compensation et les moyens d'inondation en cas de crue centennale. Par la suite, les démarches réglementaires ont porté sur le dossier Loi sur l'eau proprement dit (code de l'environnement) qui traitait essentiellement du pompage et de la réinjection en phase travaux et des surfaces de remblais créés dans le lit majeur du fleuve sur le pourtour du projet Mozart.

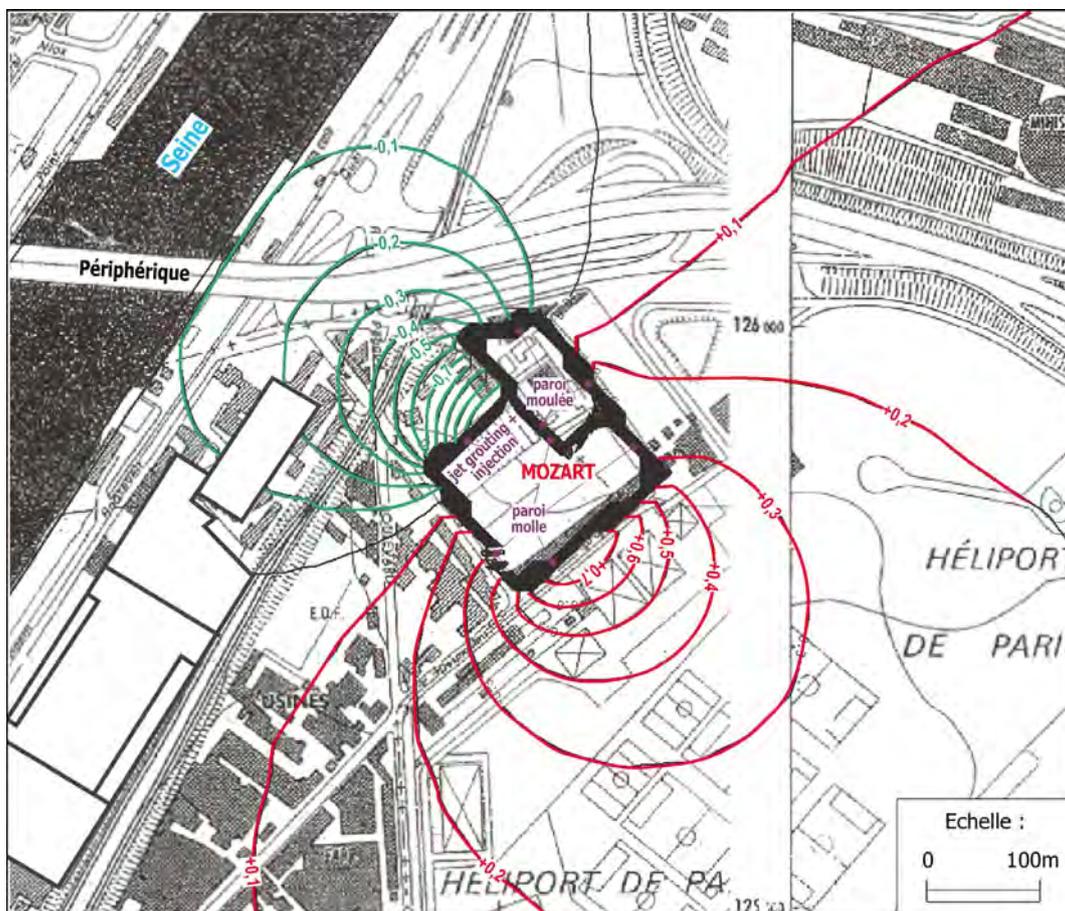


Figure 9 : courbes d'isorabattements et d'isorelevements dans la nappe de la craie, en mètres

V. LE DÉMARRAGE DU CHANTIER ET LA VÉRIFICATION DES OBJECTIFS FIXES

Les fondations profondes ainsi que le dispositif de pompage ont été réalisées par la société SOLETANCHE BACHY en milieu d'année 2007.

Les caractéristiques des puits de pompage étaient les suivantes :

- 16,5 mètres de craie captée ;
- diamètre intérieur : 300 mm ;
- fente de crépine 2 mm ;
- pas de massif filtrant ;
- nettoyage à l'air lift puis à la pompe ;
- 7 puits de réinjection réalisés (Figure 3) ;
- nettoyage très important des puits (air lift d'abord puis pompe) ;
- puits crépiné sur 19 m dans la craie en diamètre 350 mm acier ;
- ouverture de crépine = 4 mm, pas de massif filtrant.

D'après les informations transmises par les foreurs et compte tenu du fait que certains puits étaient très proches des parois molles, il est apparu que les alluvions anciennes étaient envahies de coulis de paroi ou de boue de forage plus ou moins indurés. Cette observation est vraisemblablement à relier avec le caractère très cru des alluvions anciennes (suffosion lors du pompage de 5 000 m³/h, vers les années 1970 ?). Par contre, il n'a été constaté que peu de pénétration de coulis (ou de boues de forage) des parois molles dans la craie. En définitive, la surconsommation de coulis pour la réalisation des parois molles a été évaluée par la société SOLETANCHE BACHY à environ 50 %, ce qui est assez élevé.

L'essai de débit résiduel a permis de mesurer un débit de 97,3 m³/h pour 5,93 m de rabattement moyen soit 16,4 m³/h/m (pour une fouille de 16 500 m²), soit 107 m³/h pour le rabattement contractuel (26,1 / (« Eaux Basses ») – (20,3 NGF – 0,75 m) = 6,55) et 146 m³/h en nappe haute (EH) pour (28,5 (EH) – (20,3 NGF – 0,75) = 8,95 m ; le facteur 0,75 m correspond à l'épaisseur du radier et à une marge de sécurité de rabattement). On constate donc que le débit résiduel réel représente approximativement la moitié évaluée initialement, qui était par ailleurs le débit contractuel.

VI. CONCLUSION

Le projet Mozart, à la frontière des communes de Paris et d'Issy-les-Moulineaux, consiste en la déconstruction d'un ensemble datant des années 1970 et la construction de deux opérations en R+6 et R+7 et d'une tour. Les trois niveaux de sous-sols existants sont conservés mais le radier va être intensément percé pour la réalisation des fondations des futurs bâtiments, ce qui a conduit à la réalisation d'une enceinte périmétrique permettant de maîtriser le débit d'exhaure de la fouille. Cette enceinte « composite » est constituée, sur les quatre-cinquièmes du périmètre, par des parois molles et sur le reste, de colonnes de jet grouting et d'injections.

Parce que la réalisation d'un fond injecté n'était pas techniquement faisable, c'est la prolongation verticale des structures de l'enceinte qui a été retenue. Le problème était donc alors de définir la cote d'ancrage des structures, c'est-à-dire de rechercher la limite supérieure de la craie peu perméable. Les essais réalisés (micromoulinet) ont clairement fait apparaître cette limite mais également ses variations : de -3,5 à -8,5 NGF sur le site. Les bases des structures ont été définies en fonction de ces résultats.

Le débit d'exhaure attendu dans cette enceinte a été évalué au moyen d'une modélisation mathématique. Ce débit, réinjecté sur le pourtour de l'enceinte, a été évalué à 230 m³/h en nappe normale. Après réalisation d'un essai de débit résiduel, ce débit fut mesuré à 107 m³/h, ce qui représente environ la moitié de ce qui était prévu. Cet écart a vraisemblablement deux origines : d'une part, une surévaluation – modérée – de la perméabilité de la craie peu perméable et d'autre part, la qualité de la réalisation des structures de l'enceinte, en particulier des colonnes de jet grouting et des injections qui constituaient la partie la plus vulnérable de l'enceinte.

On notera que ces réalisations et essais se sont déroulés dans un contexte de calendrier très serré en raison de la nécessité impérieuse que la nappe soit rabattue lorsque la déconstruction de la tour atteindrait le 7^e étage. En effet, à partir de ce moment, l'ensemble n'était plus suffisamment chargé pour résister aux sous-pressions.

En dernier lieu, la progression de l'étude a comporté parallèlement, dès début 2006, l'élaboration des dossiers administratifs (notices PPRI et dossier Loi sur l'eau) et leur instruction par l'administration. Il convient de ne pas sous-estimer le temps nécessaire de réalisation de ces démarches et les initier dès les premières esquisses du projet. ■

Remerciements à Laurent Pyot, Jean-François Béraud (BURGEAP) et Paul-Michel Roy (BOUYGUES IMMOBILIER) pour la relecture du document et Marion Miglioretti (BURGEAP) pour la réalisation des figures.

Bibliographie

- (1) **Bize J., Bourguet L., Lemoine J.** – L'alimentation artificielle des nappes souterraines. Masson 1972
- (2) **Monnier G.** – Optimisation hydrogéologique des fondations profondes ; intérêt des essais au micromoulinet. *Revue française de géotechnique*, N° 99, 2^e trimestre 2002 : 81-85
- (3) **Béraud J.F., Clouet d'Orval M.** – Détermination du colmatage du lit d'une rivière en relation avec une nappe souterraine. *Bulletin BRGM* (2), III, 3/4, 1976

Grandes infrastructures souterraines en site urbain : impact sur les écoulements de nappe

Christine ONDEL

EGIS Rail - 25, cours Émile Zola - 69625 Villeurbanne Cedex - christine.ondel@egis.fr

Un inventaire des procédés de construction utilisés dans les villes françaises ou étrangères depuis quelques décennies, pour la construction de métros et autres infrastructures de transport public, est effectué avec une mise en lumière des évolutions et des innovations sur cette période. La prise en compte de l'impact sur les écoulements de nappe et sur la stabilité des sols aquifères dès la conception est illustrée par quelques exemples d'expériences.

Un schéma décisionnel montre le traitement des considérations fonctionnelles et économiques dans la conception du projet, l'impact sur la nappe étant analysé secteur par secteur en parallèle avec le projet, et l'effet global du projet ainsi que les évolutions du contexte (extension du réseau, modifications dans la gestion des nappes, etc.) étant vérifié in fine.

I - INTRODUCTION

Les grandes infrastructures de transport public ont connu un développement important à partir des années soixante-dix, essentiellement en régions, l'Ile-de-France ayant déjà une infrastructure extrêmement dense à cette époque.

C'est ainsi que les grandes métropoles connaissent un essor phénoménal de la voiture particulière qui les conduit à développer les trémies routières, mini-tunnels, sauts de mouton ou autoponts ; en parallèle la nécessité de construire des infrastructures de transport en commun apparaît évidente dans ces métropoles mais aussi dans les villes nouvelles où la notion de TCSP (transport en commun en site propre) prend naissance.

En France trois grandes métropoles vont successivement décider la construction de métros : Lyon, Lille et Marseille.

À Lyon, la trémie routière Garibaldi, puis la trémie et les viaducs Vivier Merle sont construits.

À Marseille le tunnel sous le Vieux Port est décidé puis construit en caissons immergés.

La construction de ces grandes infrastructures de transport posait pour la première fois dans ces métropoles la question de leur impact sur l'écoulement de la nappe.

II - LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

L'engorgement de la voirie de surface, à une époque où il n'était pas encore question de diminuer la part de la voiture particulière, conduisait tout naturellement à développer des transports en commun souterrains, synonyme à l'époque de métro.

Plus tard on verra apparaître le tramway qui, contrairement à ses ancêtres disparus entre-temps, pouvait aussi comporter des tronçons souterrains, comme le tramway de Strasbourg.

Les trois grandes métropoles citées ci-dessus ont en commun de posséder cours d'eau et nappes phréatiques. Leurs différences résident dans le relief et la géologie :

- à Lyon la majeure partie de la cité se trouve dans la plaine alluviale du Rhône et de la Saône. Les collines de l'Ouest lyonnais sont majoritairement composées de gneiss et de granite recouverts de moraines. Dans la plaine les alluvions recouvrent la molasse du côté Est de la faille Nord-Sud, et le substratum granitique du côté Ouest ;
- à Marseille la plaine côtière occupe une surface relativement faible et le relief est très proche du littoral. Les collines sont nombreuses et sont constituées de marnes, calcaires et sables du Stampien. La nappe (on devrait dire les nappes) est étagée sur les alternances de couches plus ou moins perméables ;
- Lille est située sur les formations du bassin parisien. Son substratum est majoritairement constitué de craie, surmonté de couches d'argiles, de sables et de limon avec une nappe qui atteint presque le niveau du terrain naturel dans certains points. Son relief est très faible.

III - COMMENT CONSTRUIRE UN SOUTERRAIN EN TERRAIN MEUBLE ET AQUIFÈRE ?

III.1 - Les tranchées couvertes

Dans les années soixante-dix, en terrain meuble et aquifère ? une seule solution déclinée en de multiples variantes permettait de construire un ouvrage linéaire souterrain à un coût acceptable, en sécurité et avec des matériels relativement simples et amortissables sur des chantiers de faible longueur : **la tranchée couverte**.

Le procédé de tranchée couverte consiste à construire entre deux rideaux de soutènements autostables, ou butonnés ou tirantés, un cadre en béton armé qui, soit est indépendant des soutènements, soit intègre les soutènements.

Ces soutènements comprennent essentiellement :

- des palplanches ;
- des pieux jointifs ;
- des parois moulées ou des parois préfabriquées.

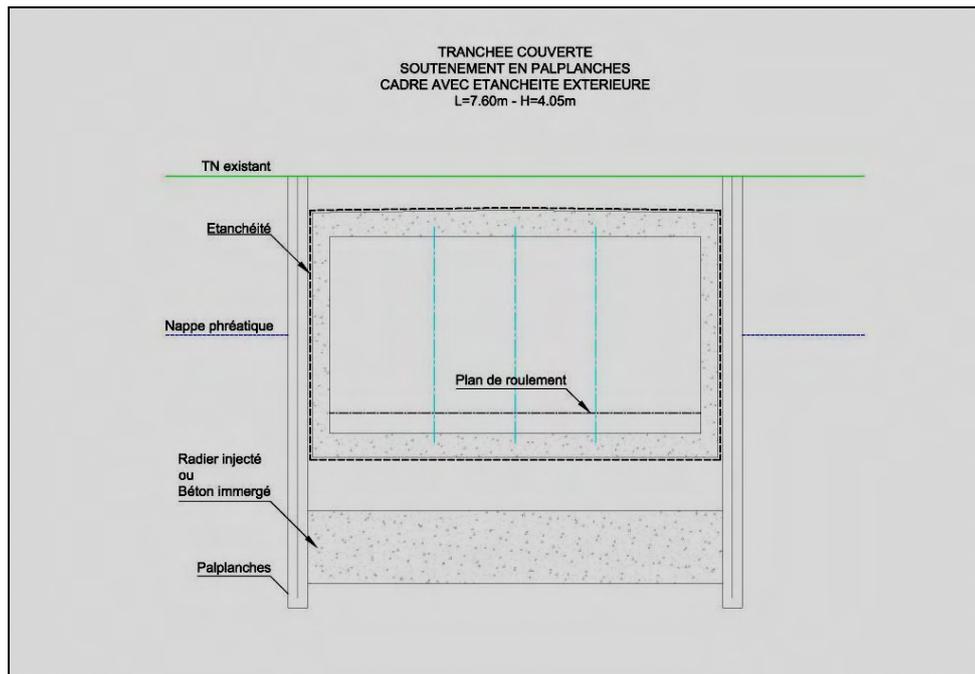


Figure 1 - Tranchée couverte, soutènement par palplanches

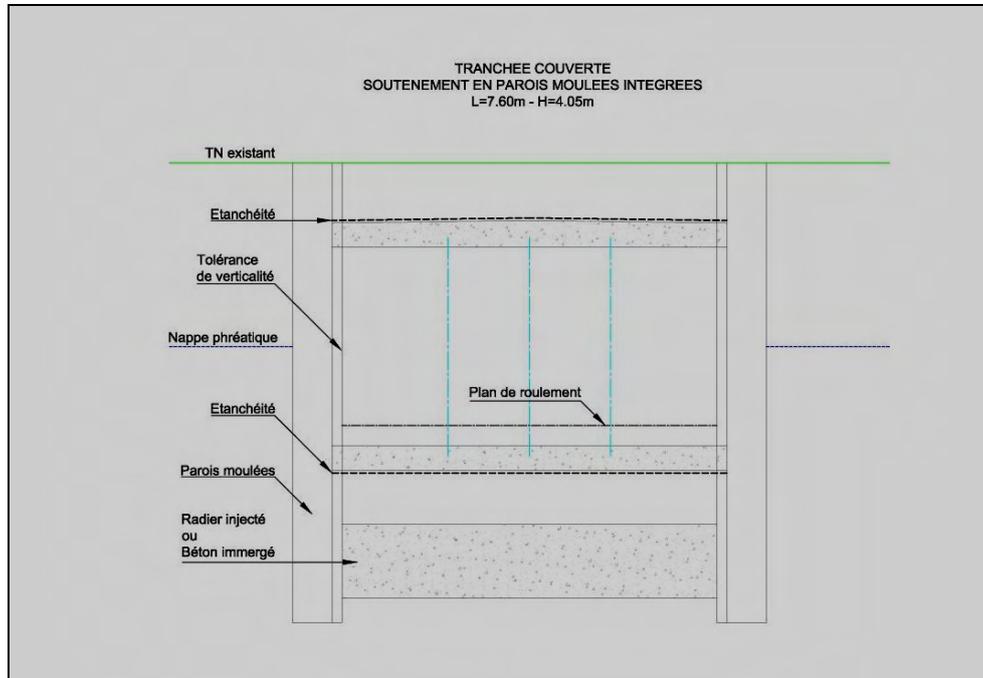


Figure 2 - Tranchée couverte, soutènement par parois moulées

Plus tard sont apparus d'autres procédés qui permettent une adaptation plus aisée aux sites exigus et encombrés. Le *jet grouting* en est un bon exemple.



Figure 3 - Dégarnissage d'une zone traitée par jet grouting

Tous ces soutènements constituent sur leur hauteur des barrières étanches à l'écoulement de la nappe, leur incidence sur l'écoulement dépendant de la hauteur d'interception, du pourcentage de coupure que représente le soutènement par rapport à la hauteur d'écoulement de la nappe, de la longueur de l'ouvrage, de son orientation par rapport à l'écoulement de la nappe, etc.

Les premières lignes de métro en région ont été construites le plus superficiellement possible, d'une part pour des raisons économiques et de facilité d'exécution, et d'autre part pour permettre une bonne accessibilité aux usagers et donner un aspect clair et aéré aux stations. Cella est surtout vrai en plaine et dans les terrains aquifères, meubles à Lyon, plus rocheux à Lille, stratifiés avec alternance de couches meubles et de couches dures à Marseille.

Ce caractère superficiel, permis par un tracé essentiellement sous voirie, a évité de créer des coupures totalement étanches dans ces trois métropoles, le passage sous la fiche des soutènements ayant globalement conservé à la nappe sa capacité d'écoulement.

Dans certains cas, quelques aménagements réalisés sur les soutènements permettent d'accroître les capacités d'écoulement soit sous la fiche des soutènements, par introduction de décalages dans les profondeurs de fiches appelées « jambes de pantalon », soit au-dessus du cadre métro, par aménagement de fenêtres permettant le passage de la nappe aux hautes eaux.

Une autre problématique de cette construction en **tranchée couverte** est la stabilité du fond de fouille en phase de construction vis-à-vis des renards solides ou liquides sous une forte pression hydrostatique. Outre le dimensionnement de la fiche des soutènements pour assurer leur stabilité mécanique, il faut prévoir un bouchon étanche ou à faible perméabilité sous le fond de fouille pour permettre de mettre la fouille à sec avec un drainage résiduel très faible en phase de construction.

Deux techniques sont utilisées, qui ont des domaines d'application différents en termes de profondeur :

- la première technique consiste à terrasser sous l'eau, entre les soutènements, jusqu'à une profondeur supérieure à celle du fond de fouille définitif, puis à combler cet espace en **coulant sous l'eau un béton qui constituera après prise un bouchon étanche** assurant par son poids sa stabilité à la sous-pression.
Limite : La limite d'application de ce procédé est assez vite atteinte, un mètre de béton équilibrant 2 m d'eau mais nécessitant un approfondissement du fond de fouille provisoire donc de la fiche de soutènement en phase de construction. Du point de vue de la stricte stabilité du soutènement avec le niveau du fond de fouille théorique, on ne conduit guère ce procédé au-delà de 2 m d'épaisseur ;
- la relève est prise par le **radier injecté** qui permet de créer aussi un bouchon à faible perméabilité mais sans déstabiliser le soutènement par un approfondissement du fond de fouille. Les injections peuvent être faites depuis la surface entre les soutènements, mais on préfère généralement effectuer un préterrassment de 2 à 3 m pour limiter le coût des forages d'injection mais aussi pour éviter les salissures en voirie et la dissémination des produits d'injection dans l'environnement.
Limite : Ce radier injecté a lui-même une limite d'application, vers 5 m d'épaisseur, ce qui correspond à une fiche de soutènement importante et nécessairement continue pour assurer l'encagement de l'injection, sans compter le coût de l'injection qui est très important.

Lorsque la profondeur du fond de fouille croît encore ainsi que sa dénivelée avec la nappe à l'extérieur, la seule possibilité en tranchée couverte devient **l'ancrage du soutènement** dans un substratum « étanche » tel qu'à Lyon le granite ou la molasse.

Ces dispositions constituent un barrage complet à l'écoulement de la nappe.

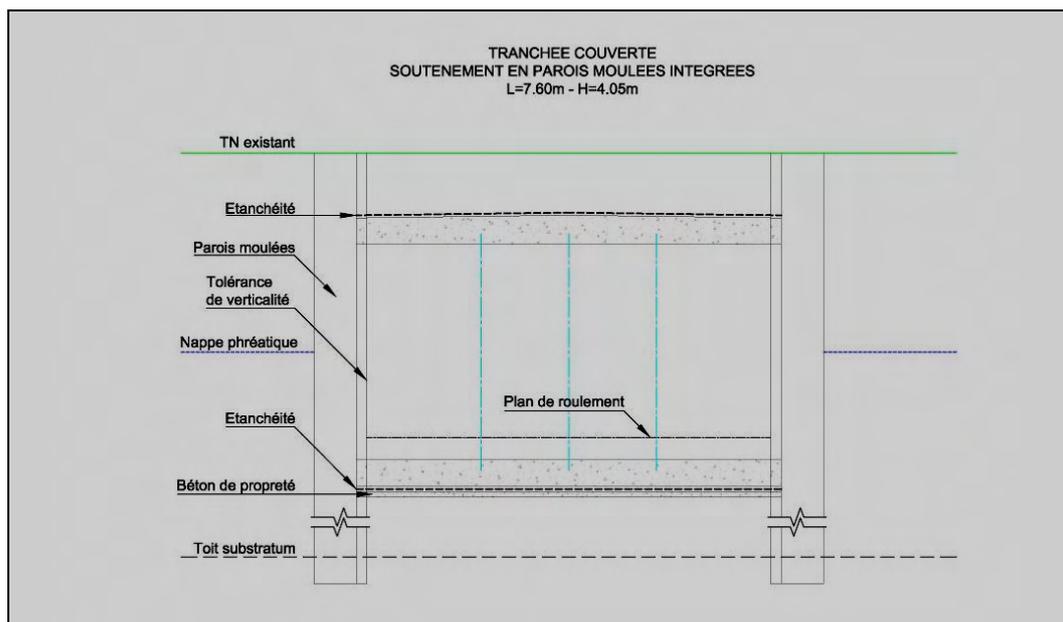


Figure 4 - Ancrage du soutènement d'une tranchée couverte par des parois moulées intégrées

Le seul cas rencontré à Lyon s'est produit sur la première ligne Hôtel de Ville, parce qu'à cet endroit c'est le granite qui remonte à la rencontre du soutènement. Heureusement, cette application est restée ponctuelle et elle n'entraîne aucune incidence sensible sur l'écoulement général de la nappe.

Dans les autres villes évoquées plus haut la construction en zones basses a revêtu à peu près les mêmes aspects en termes de procédés de construction et de prise en considération des écoulements de nappe.

III.2 - Les tunnels

À Lyon comme ailleurs, dès que le relief s'élève, la tranchée couverte inscrite en voirie est le plus souvent abandonnée au profit du **tunnel**, qui est libéré dans une certaine mesure des contraintes de surface. La construction des tunnels en méthode traditionnelle ne peut se faire que dans des terrains rocheux ou de faible perméabilité.

La transition entre la tranchée couverte en milieu aquifère et le tunnel dans un sol compatible avec le procédé de construction nécessite des traitements de confortement et d'étanchement complexes et délicats à réaliser, qui peuvent perturber la nappe localement.

L'inscription du tube constitué par un tunnel dans les nappes et écoulements apporte peu de perturbations, grâce à sa forme. Les problèmes induits par sa construction sont ponctuels dans le temps et ont des répercussions sur le bâti essentiellement (tassements), assez peu sur les terrains aquifères eux-mêmes. On notera cependant que le souci de ne pas engendrer de fontis, d'éboulements ou de glissements de terrain par des modifications importantes de l'état initial sol-eau est au premier plan des préoccupations dès la phase d'études préliminaires.

Les campagnes de reconnaissance hydrogéologique pour des projets de tunnel sont toujours de grande complexité à cause du relief, de l'accessibilité et de l'hétérogénéité fréquente des sols sur la longueur d'un tracé, mais aussi à cause du nombre et de la diversité des informations recherchées pour limiter les risques et choisir les méthodes de creusement.

De nombreux exemples illustrent ces difficultés ; à Lyon le tunnel d'arrière gare à Saint-Jean ou le tunnel de Croix-Paquet :

- à Saint-Jean, la présence non détectée en phase d'études d'arène granitique plus perméable que prévu et gorgée d'eau en toit de voûte a nécessité des injections préalables au percement (effectuées par forages inclinés depuis une voirie parallèle) ainsi que des injections à l'avancement en auréoles en voûte ;
- le tunnel de Croix-Paquet, *a priori* classique par son contexte hydrogéologique, a connu un fontis, fort heureusement situé sous une zone de voirie, et rencontré des difficultés liées à l'eau et à la stabilité des pentes à son débouché à Croix-Paquet. Cette dernière zone, en particulier, étroitement surveillée par la Commission des Balmes, comporte des galeries de drainage qui par leur action garantissent la stabilité des pentes de la Colline de la Croix-Rousse. La réalisation de la ligne de métro interceptait ces canalisations dont il a fallu étudier le rétablissement de la continuité, mais aussi tous les terrains perméables de pied de pente qui contribuaient à la stabilité de ces pentes. Un soutènement général en pieux forés a été construit pour garantir la conservation de conditions les plus proches possibles des conditions initiales.

IV - CAS DE LA PREMIÈRE LIGNE DU MÉTRO DE LYON

IV.1 - Étude de l'incidence de la ligne A sur la nappe

À Lyon, dès les premières études (1964 – 1970), un modèle de la nappe a été établi par le BRGM pour étudier l'influence de la construction de la première ligne sur son écoulement.

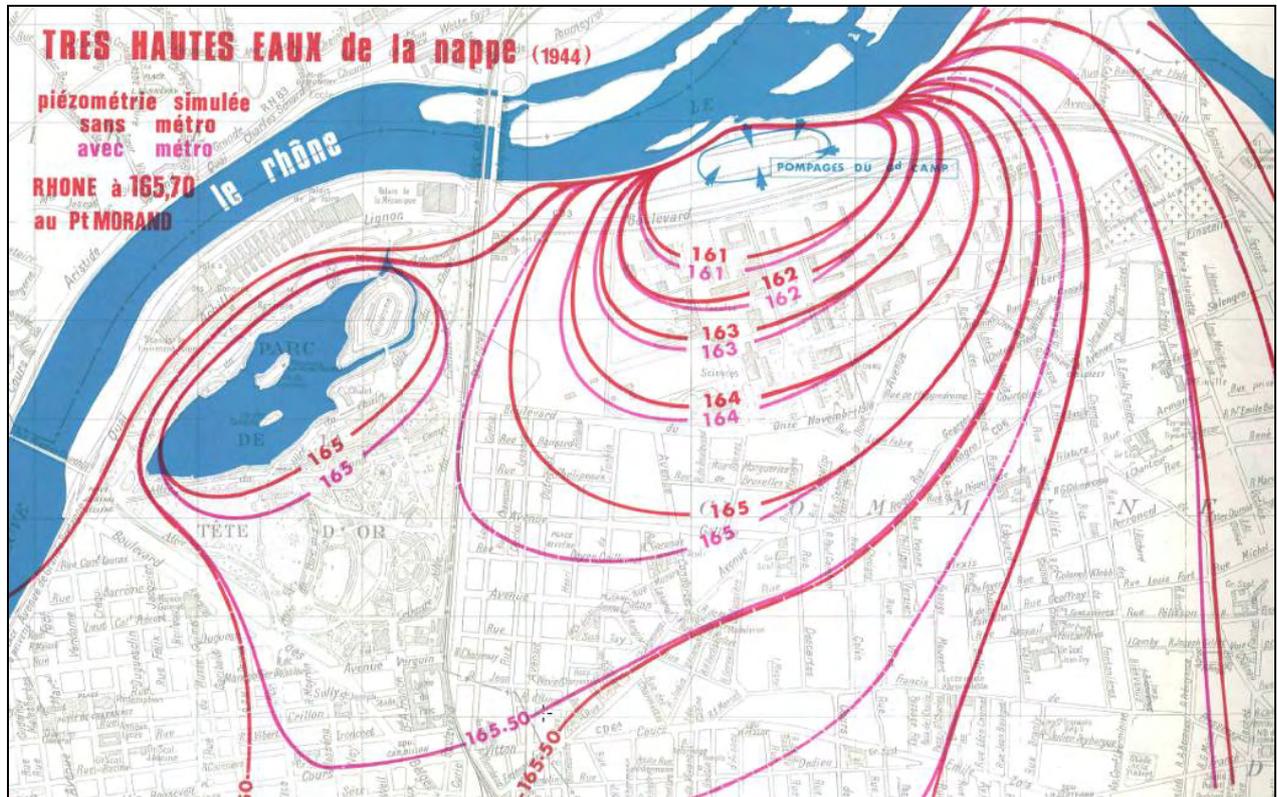


Figure 5 - Carte piézométrique générale de la partie Nord-Est de la ville de Lyon, modélisation de l'impact du métro

Ses lignes de flux ont été analysées vis-à-vis de leur interférence avec le métro et pour la ligne A, la prévision d'incidence sur la hauteur de la nappe est quasiment nulle sur le secteur de Villeurbanne et présente une hausse de l'ordre de 10 cm sur le secteur compris entre Charpenne et le Pont Morand. Cela est lié à l'écoulement quasi parallèle au tracé du métro sur Villeurbanne et au partage des flux principaux entre la direction Sud-Ouest et la direction du Rhône sur le secteur de Charpenne au Rhône. Dans la presqu'île l'écoulement majoritairement Nord-Sud n'est pas contrarié par le métro qui lui est sensiblement parallèle. Des simulations d'impact d'autres événements tels que l'arrêt des pompages de Grand Camp ont aussi été effectuées pour vérifier leur compatibilité avec l'effet déjà induit par le métro. Une étude piézométrique après la construction de la ligne A, menée en février 1978, a permis de confirmer les prévisions des simulations de 1970.

IV.2 - Cas particulier du Pont Morand

À cette époque la question principale a été de choisir le type de franchissement du Rhône entre les stations Foch et Hôtel de Ville.

Deux possibilités techniques existaient : réaliser une traversée en caissons immergés dans le Rhône ou faire un pont.

Outre les grandes difficultés techniques que présentait le passage en caissons immergés, cette technique nécessitait de créer sur les deux rives des tranchées couvertes dont les fiches atteignaient de grandes profondeurs et auraient constitué de vraies coupures étanches à l'écoulement de la nappe.

Seules des palplanches provisoires arrachées après la construction du cadre métro auraient permis de rétablir des sections d'écoulement de la nappe au-dessus et au-dessous du cadre. Or les palplanches, dans toutes les constructions lyonnaises de cette époque, ont été laissées en place après construction de la structure définitive soit parce qu'elles étaient directement intégrées à cette structure (dans le cas de la trémie Garibaldi par exemple), soit que leur arrachage aurait été dommageable pour l'enveloppe d'étanchéité plaquée contre elles par l'intermédiaire d'un contrebajoyer bétonné dans les ondes.

Quelques palliatifs auraient pu être appliqués - comme la création de fenêtres sous le cadre, par moindre enfoncement de certaines palplanches - mais les questions de stabilité d'ensemble et d'encagement du fond de fouille étanche en phase travaux auraient limité les possibilités.

De même des fenêtres auraient pu être réservées au-dessus du cadre par découpage des palplanches, mais les mêmes problèmes de faisabilité se seraient posés : stabilité du sol aquifère pendant l'enlèvement des palplanches recépées et coût de ces interventions qui auraient nécessité des rabattements importants.

En définitive c'est un pont en caissons précontraints qui a été décidé et le profil en long de l'ouvrage fait sortir le cadre courant de terre sur les deux rives faisant apparaître deux dos-d'âne en voirie mais laissant en dessous l'écoulement de la nappe totalement libre le long du Rhône.

V - ÉVOLUTION DES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION

À Lyon, avec la ligne D dans le début des années quatre-vingt, sont apparues à nouveau quelques difficultés de même nature que celles rencontrées avec la ligne A, à savoir la traversée du Rhône et celle de la Saône.

L'étude préalable cette fois comportait une solution en caissons immergés. La consultation des entreprises s'est faite sur cette base mais sous la forme d'un concours, en laissant ouverte la possibilité de larges variantes.

Pour la première fois en France, et même en Europe, une solution entièrement au tunnelier a été proposée par plusieurs candidats, en 1982. L'offre qui a été retenue prévoyait un creusement au tunnelier à pression de boue bentonitique, à l'abri d'une première enveloppe construite par extrusion à l'arrière de la jupe du tunnelier d'un béton armé de fibres métalliques. Une seconde enveloppe en béton faiblement armé assurait le revêtement définitif du tunnel. Le principe retenu était celui d'un bitube, chaque tube permettant un seul sens de circulation.

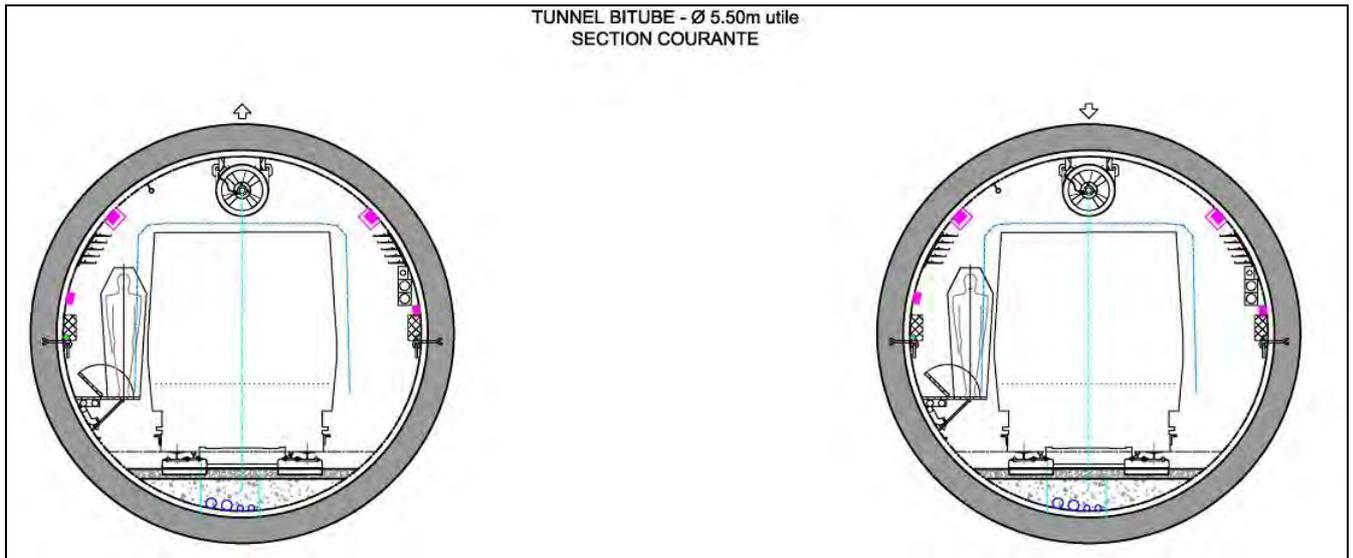


Figure 6 - Tunnel bitube

Le marché a été attribué en janvier 1983 et les travaux se sont achevés en 1988.

La section choisie consistait en deux tubes de diamètre extérieur de 6,1 m.

Ce choix a constitué à l'époque une vraie avancée dans les méthodes de construction en souterrain. Pour la première fois on pouvait construire dans un terrain meuble et aquifère à forte perméabilité sans avoir à traiter le sol ou à l'encager.

De plus, les sections circulaires présentant l'obstacle minimal à l'écoulement de la nappe quelle que soit la direction de celui-ci, le tracé de l'infrastructure se trouvait libéré de contraintes hydrauliques.



© egis rail-l.picquand

Figure 7 : Tête de tunnelier

Depuis cette grande première, le développement des projets au tunnelier a connu une progression constante. Les techniques ont progressé à divers points de vue. Le revêtement provisoire en béton extrudé a été remplacé par un revêtement définitif monocoque constitué d'anneaux successifs composés de voussoirs préfabriqués en béton armé.



© egis

Figure 8 - Acheminement des voussoirs, détail de voussoir

Sur la lancée de Lyon, Lille a opté pour la construction au tunnelier avec voussoirs définitifs du lot n° 3 de la ligne 1 bis au cours de l'année 1984.

Puis Rennes et Toulouse ont entrepris des travaux au tunnelier en système VAL, comme Lille. Marseille n'a pas lancé de nouvelle ligne à cette époque et il a fallu attendre 2003 pour qu'une extension de la ligne 1 du métro soit décidée avec une exécution au tunnelier à pression de terre en section monotube (deux sens de circulation).

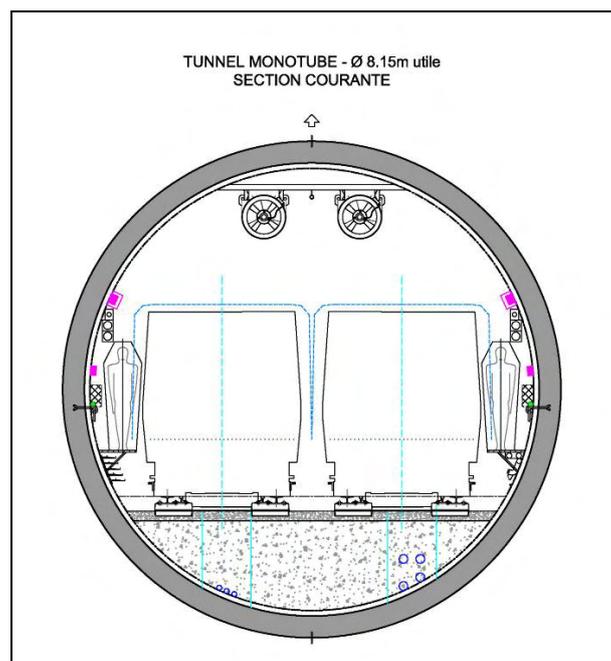


Figure 9 - Tunnel monotube

VI - SCHÉMA DÉCISIONNEL

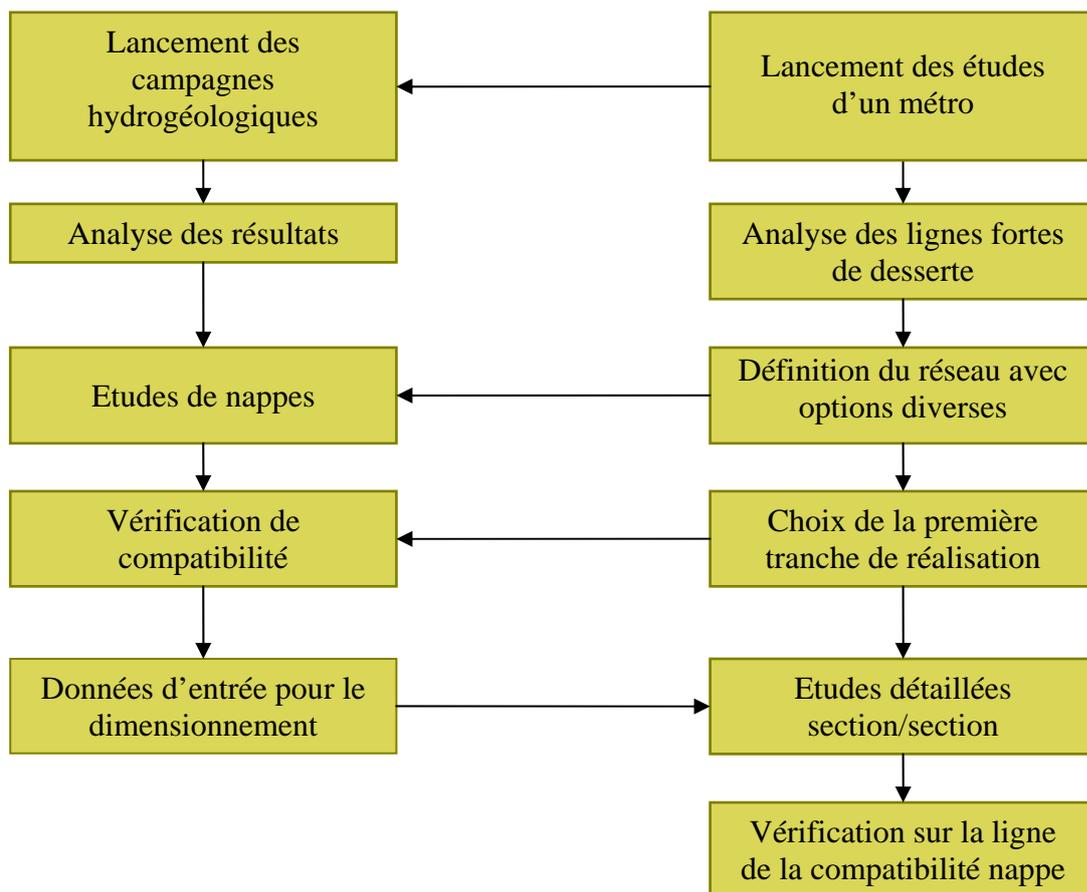
Lorsqu'une ville comme Lyon prend la décision de créer *ex nihilo* un réseau de métro, les premières réflexions portent sur les lignes fortes de clientèle. À Lyon il était aisé de repérer la ligne du bus n° 7 comme la plus fréquentée de tout le réseau de surface.

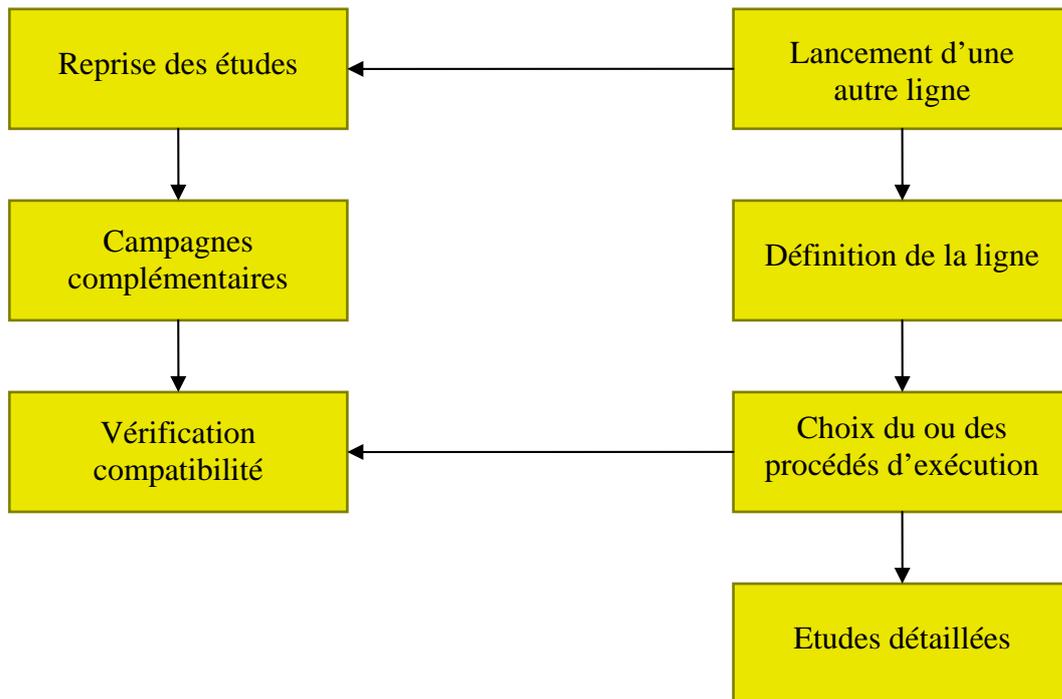
C'est ce tracé qui a été choisi pour la ligne A, avec des projections pour les lignes futures impliquant quelques amorces de lignes et des réservations pour leur réalisation future.

La seconde préoccupation est, en langage d'ingénieur, l'insertion de la ligne dans le bâti, ce qui fait immédiatement entrer en considération les procédés d'exécution.

À ce stade, le concepteur doit disposer de toutes les données hydrogéologiques, ce qui implique une anticipation dans la campagne de reconnaissance des sols, dans la mise en œuvre et le suivi d'une campagne piézométrique et dans les études préliminaires.

Les étapes ultérieures vont consister en un certain nombre d'itérations aux fins d'optimiser, pour chaque zone de caractéristiques homogènes en hydrologie, géologie et insertion, les procédés d'exécution, le tracé et le profil en long.





À chaque nouvelle étape de prolongement de ligne ou de création d'une nouvelle ligne un processus similaire est conduit mais cette fois sur une base intégrant les ouvrages déjà construits et les évolutions intrinsèques de l'environnement comme par exemple l'arrêt des pompes de Grand Camp à Lyon. ■

BIBLIOGRAPHIE

Archives EGIS RAIL (SEMALY) SYTRAL.

Rapport géotechnique et hydrologique – juillet 1970.

Rapport géotechnique et hydrologique – juin 1971.

Dossier d'incidence du métro sur la nappe phréatique – G. Picod – février 1978.

Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise

Jacques Coudert⁽¹⁾, Jérôme Nicolas⁽²⁾,
Nadia Amraoui⁽³⁾, Jean-Jacques Seguin⁽³⁾

⁽¹⁾ Communauté urbaine de Lyon, Mission écologie – 20, rue du Lac
BP 3103 – 69399 Lyon Cedex 03 – jcoudert@grandlyon.org

⁽²⁾ BRGM – Service Géologique Régional Rhône-Alpes – 151, boulevard de Stalingrad
69626 Villeurbanne Cedex – j.nicolas@brgm.fr

⁽³⁾ BRGM – Service eau – 3, avenue Claude Guillemin - BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2
jj.seguin@brgm.fr

I. CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

I.1 Objectif

L'amélioration de la prévention et de la protection vis-à-vis du risque inondation est une priorité du Grand Lyon. En effet, ce risque est complexe car il résulte de la combinaison d'une vulnérabilité forte (générée par une zone urbaine particulièrement développée), et d'un aléa hydraulique engendré par des causes multiples (débordements du Rhône et de la Saône, ruissellement pluvial urbain, remontées de nappes).

Les écoulements souterrains sur l'agglomération lyonnaise sont localement difficiles à appréhender du fait du compartimentage du sous-sol (fondations des bâtiments, métro, parkings...), de l'existence de prélèvements et de rejets dans les eaux souterraines (pompes à chaleur, captages divers, eaux pluviales...), et bien sûr de la variabilité du contexte hydrogéologique.

C'est dans ce contexte, que la communauté urbaine de Lyon – 1 400 000 habitants - a voulu se doter de moyens de connaissance du fonctionnement de ses fleuves et des nappes qui y sont hydrodynamiquement connectées. Les actions de prévention et de protection envisagées par la Communauté Urbaine doivent être précédées par l'amélioration de la connaissance de ces écoulements. C'est dans cette optique et après signature en 2004 d'une Convention pluriannuelle de Recherche et Développement partagés avec le Grand-Lyon, que le BRGM s'est engagé à développer un modèle géologique, une modélisation hydrodynamique des eaux souterraines et un réseau de surveillance piézométrique sur l'agglomération lyonnaise.

L'étude a été structurée en quatre phases successives de 12 mois chacune, les 3 premières étant achevées à la date de rédaction de cet article. La première phase a été consacrée à l'acquisition des données nécessaires à la construction d'un modèle géologique 3D (avec intégration des ouvrages souterrains). Ce modèle géologique a servi de base au modèle hydrodynamique construit et calé durant les deuxième et troisième phases du projet. Un réseau de surveillance piézométrique composé de 29 ouvrages a aussi été mis en place.

I.2 Situation géographique, géologique et géomorphologique

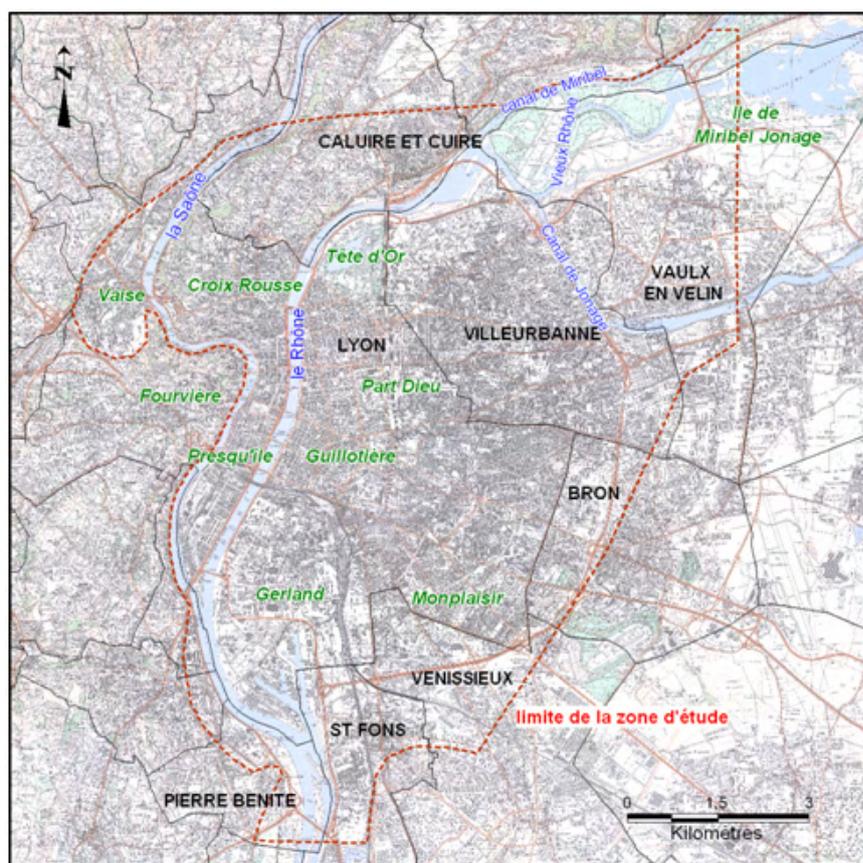


Figure 1 - Plan de situation

La zone d'étude recouvre approximativement les communes de la communauté urbaine de Lyon (Figure 1). Elle suit les limites naturelles du secteur : à l'ouest, la bordure orientale du Massif Central, au sud le barrage de Pierre-Bénite. À l'est, la limite passe par les collines morainiques de Saint-Fons et de Bron avant de couper la plaine alluviale au niveau de Vaulx-en-Velin et de l'île de Crépieux-Charmy. Au nord elle rejoint le Massif Central au niveau de l'île Barbe.

L'agglomération lyonnaise est construite sur la confluence du Rhône et de la Saône. À l'ouest, elle s'étend en partie sur les pentes des Monts du Lyonnais et sur les coteaux de la Saône et du Rhône. Le relief de la zone est relativement marqué. Les Monts-d'Or culminent à 625 m d'altitude, alors que les collines (Fourvière et Croix-Rousse) ne dépassent pas les 250-350 m. La plaine alluviale se situe quant à elle à environ 160-170 m d'altitude en moyenne. L'est de l'agglomération est caractérisé par un paysage de plaine (dite Plaine de l'Est lyonnais) façonné par les différentes glaciations et les dépôts de terrasses fluvioglaciaires. Le relief se traduit par la présence de collines morainiques d'une altitude moyenne de 250 m. Ces collines séparent des couloirs bien délimités géomorphologiquement (Décines-Chassieu, Meyzieu, Vénissieux-Saint-Priest).

Pour une description complète de la géologie lyonnaise, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages de Noël Mongereau « La géologie de Lyon » et « La géologie du Grand-Lyon » (réf. 4 et 5) ainsi qu'aux notices des cartes géologiques de Lyon, Montluel, Givors et Bourgoin-Jallieu.

II. MODÉLISATION GÉOLOGIQUE

II.1 Méthode

La modélisation géologique a permis de définir les caractéristiques géométriques et géologiques des formations présentes dans la zone d'étude. Le modèle géologique résultant a été exploité pour construire le modèle hydrodynamique 3D. Pour atteindre cet objectif, différentes phases ont été nécessaires :

- définir un référentiel des formations géologiques homogènes vis-à-vis des caractéristiques hydrauliques et caractériser ces formations. Il s'agit de construire une « pile » lithostratigraphique des différents faciès (sables, argiles, etc.), qui se sont successivement déposés suivant un ordre chronologique ;
- rechercher les données de sondages disponibles en archives, en particulier dans la BSS. L'analyse de ces données a permis de darder **2 940 sondages** directement exploitables sur les 4 500 retenus initialement, soit environ 65 % des ouvrages recensés sur la zone à couvrir. Le positionnement des sondages retenus est présenté en figure 2 ;
- préparer les données nécessaires à la modélisation : numériser et coder, dans le référentiel préalablement défini, les ouvrages de reconnaissance pertinents pour la zone d'étude, numériser les cartes géologiques existantes et les rendre cohérentes avec le référentiel ;
- acquérir un MNT (Modèle Numérique de Terrain) précis. L'altitude des têtes de sondage par rapport à ce MNT a été vérifiée pour assurer une cohérence topologique et construire par interpolation les surfaces de bases des différentes formations géologiques du référentiel. Pour cela, il a été nécessaire de faire appel aux outils géostatistiques. Ces surfaces se présentent sous forme de grilles de valeurs, calées sur le MNT, mais dont le Z exprime la cote correspondante de la formation en chaque point.

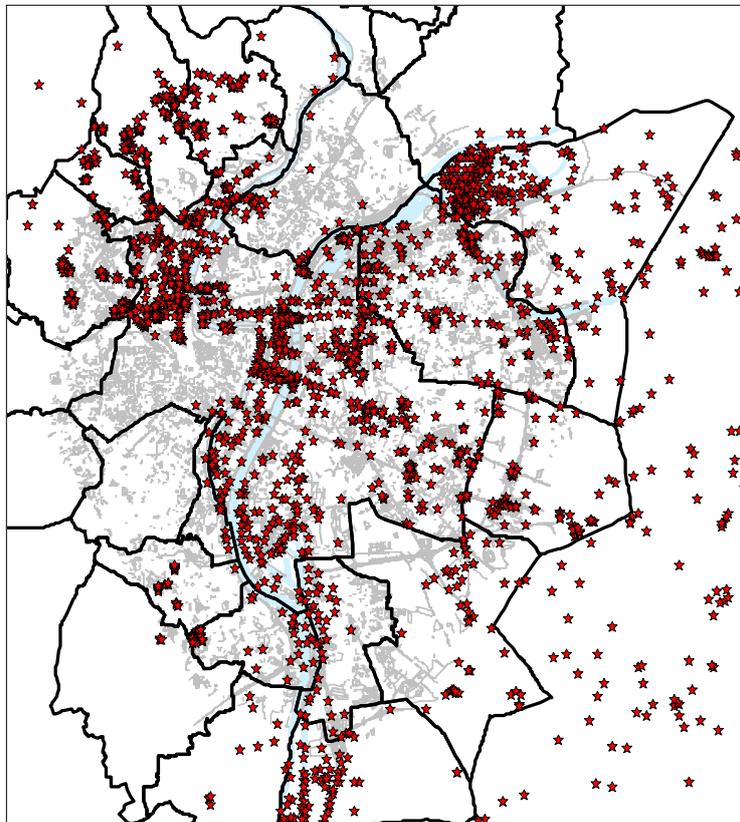


Figure 2 - Positionnement des ouvrages retenus pour construire le modèle géologique

À l'issue de ces différentes étapes, la cohérence topologique entre les surfaces calculées et les différentes sources de données est vérifiée (mais la précision du modèle reste dépendante de la densité et de la qualité de l'information disponible).

Les travaux de modélisation (gestion des données, interpolations par krigeage, détection des conflits topologiques...) ont été réalisés à l'aide du logiciel GDM, développé par le BRGM.

II.2 Résultats

Le modèle géologique 3D est composé de 12 couches superposées représentant les formations rencontrées. Il est possible de le visualiser, soit au travers de coupes soit avec un visualiseur 3D. Un aperçu de la disposition générale des formations est fourni par la figure 3.

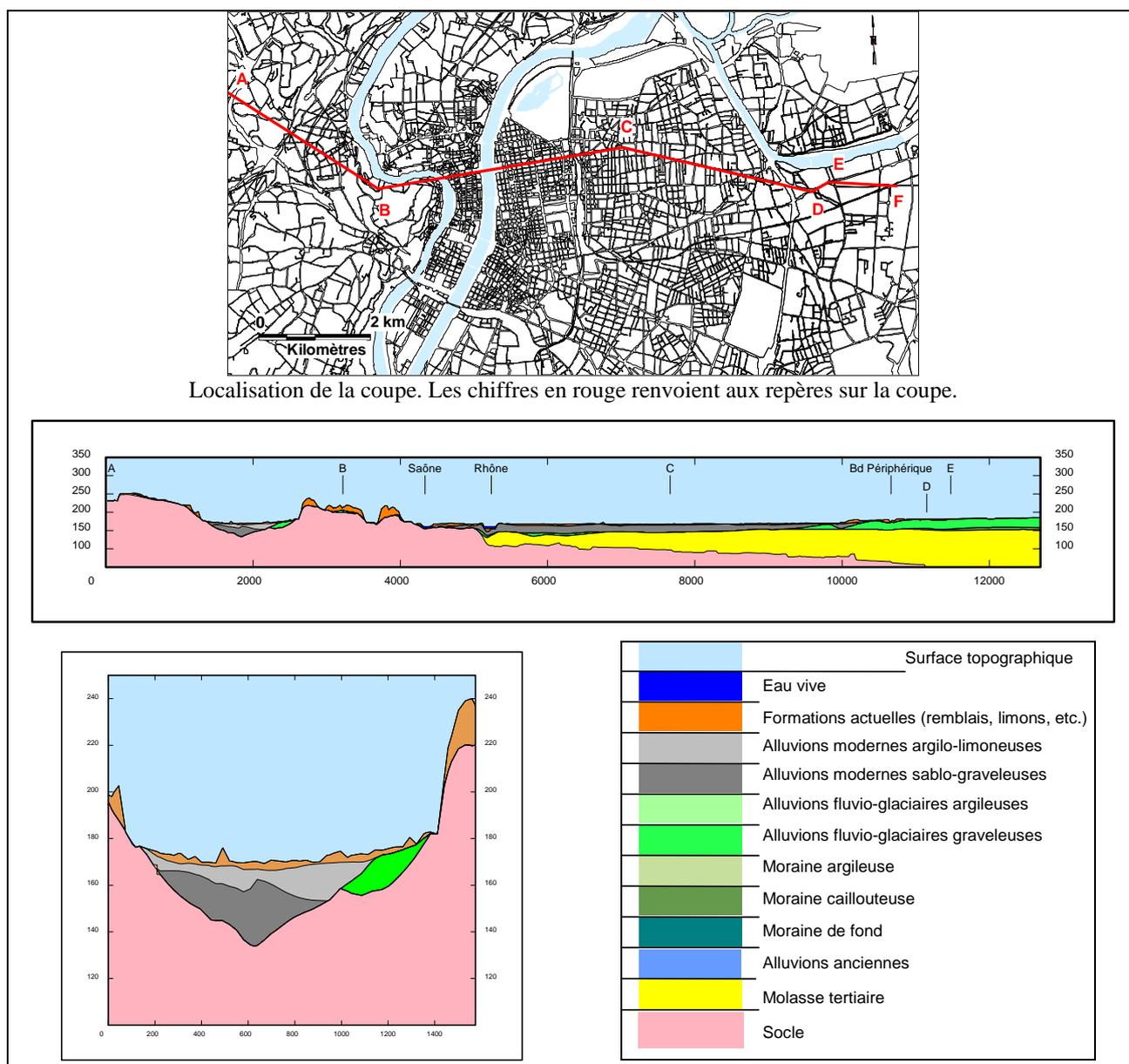


Figure 3 - Coupe géologique EW au centre de la zone d'étude et zoom sur le secteur de Vaise

Dans la partie Est de la coupe, les alluvions fluvio-glaciaires à l'est et les alluvions fluviales modernes à l'ouest, reposent sur un substratum molassique datant du Miocène.

Dans la dépression de Vaise (entre les repères A et B), le log lithologique-type rencontre depuis la surface : des remblais, des alluvions modernes d'abord argilo-limoneuses puis sablo-graveleuses qui reposent sur un substratum cristallin.

II.3 Barrières hydrauliques

Les différents ouvrages souterrains existants dans une grande agglomération sont autant d'obstacles potentiels aux écoulements souterrains dans leur voisinage.

C'est pourquoi, une partie du travail de la première phase de cette étude a consisté à recenser et décrire précisément (dimension, emplacement) tous les grands ouvrages souterrains pouvant perturber l'écoulement de la nappe (parkings, lignes de métro, tunnels, trémies routières...).

Ces données ont été informatisées. La plupart d'entre d'elles étaient déjà disponibles en représentation bidimensionnelle (X et Y), il a donc fallu y ajouter la composante verticale (Z). La figure 4 représente une vue des parkings et sous-sols.

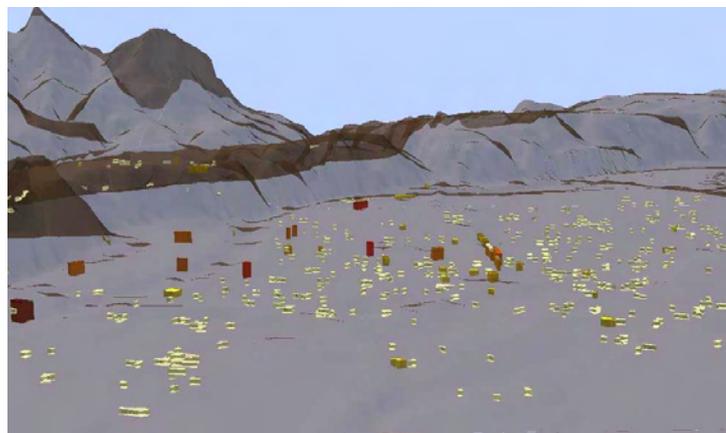


Figure 4 - Vue 3D des sous-sols depuis le sud avec une exagération verticale de 5

III. RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE

D'un point de vue géographique, ce réseau concerne les secteurs de Vaise, la Presqu'île et la rive gauche du Rhône. Il a été construit à partir des points inventoriés qui présentaient des possibilités d'accès, de protection et donc de pérennité (12 ouvrages au total) ; il a été complété par 17 piézomètres supplémentaires réalisés début 2006 dans le cadre de ce programme.

L'ensemble des piézomètres couvre la totalité de la zone d'étude : les secteurs les plus sensibles aux inondations, mais aussi les limites de la zone modélisée. Le suivi de ces ouvrages permet également de vérifier et d'affiner le calage du modèle, celui-ci ayant été réalisé sur un "ancien" réseau de piézomètres avec des mesures jusqu'en 2004.

La sélection des points de mesure a consisté à privilégier les ouvrages existants, pour des raisons évidentes d'économie, puis à proposer les nouveaux piézomètres à forer dans les secteurs les moins densément couverts. L'existence d'historiques de mesures était aussi un critère supplémentaire dans le choix d'un ouvrage.

Actuellement, 29 points sont surveillés (figure 5). Tous les ouvrages sélectionnés ou réalisés sont situés sur des terrains appartenant au domaine public (communes de la zone d'étude ou Diocèse). En effet, la difficulté lors de la mise en place d'un réseau de surveillance en milieu urbain, est d'assurer sa pérennité. Tous les ouvrages ont été inscrits sur les documents d'urbanisme pour les prévenir d'éventuels dommages ou destructions lors de travaux.

Les 17 ouvrages réalisés ont été placés dans des regards en béton recouverts par des tampons en fonte. Ainsi, la tête du tubage et le matériel en place sont protégés.

Tous les ouvrages de surveillance sont équipés d'appareil de mesure numérique, 13 d'entre eux sont équipés de matériel permettant la télétransmission des données en temps réel, 1 avec un modem RTC (Réseau Téléphonique Commuté), les 12 autres avec des modems GSM (Global System for Mobile). Ce matériel pourra, à terme, permettre la mise en place d'un réseau d'alerte. L'utilisation de la technologie GSM est là encore un choix délibéré ; aucun travail supplémentaire n'est nécessaire, et le site de mesure est sécurisé, tout le matériel se trouvant dans le regard.

Ce réseau a été installé en octobre 2006, les premières données ont pu être utilisées cette année pour affiner et valider le calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire.

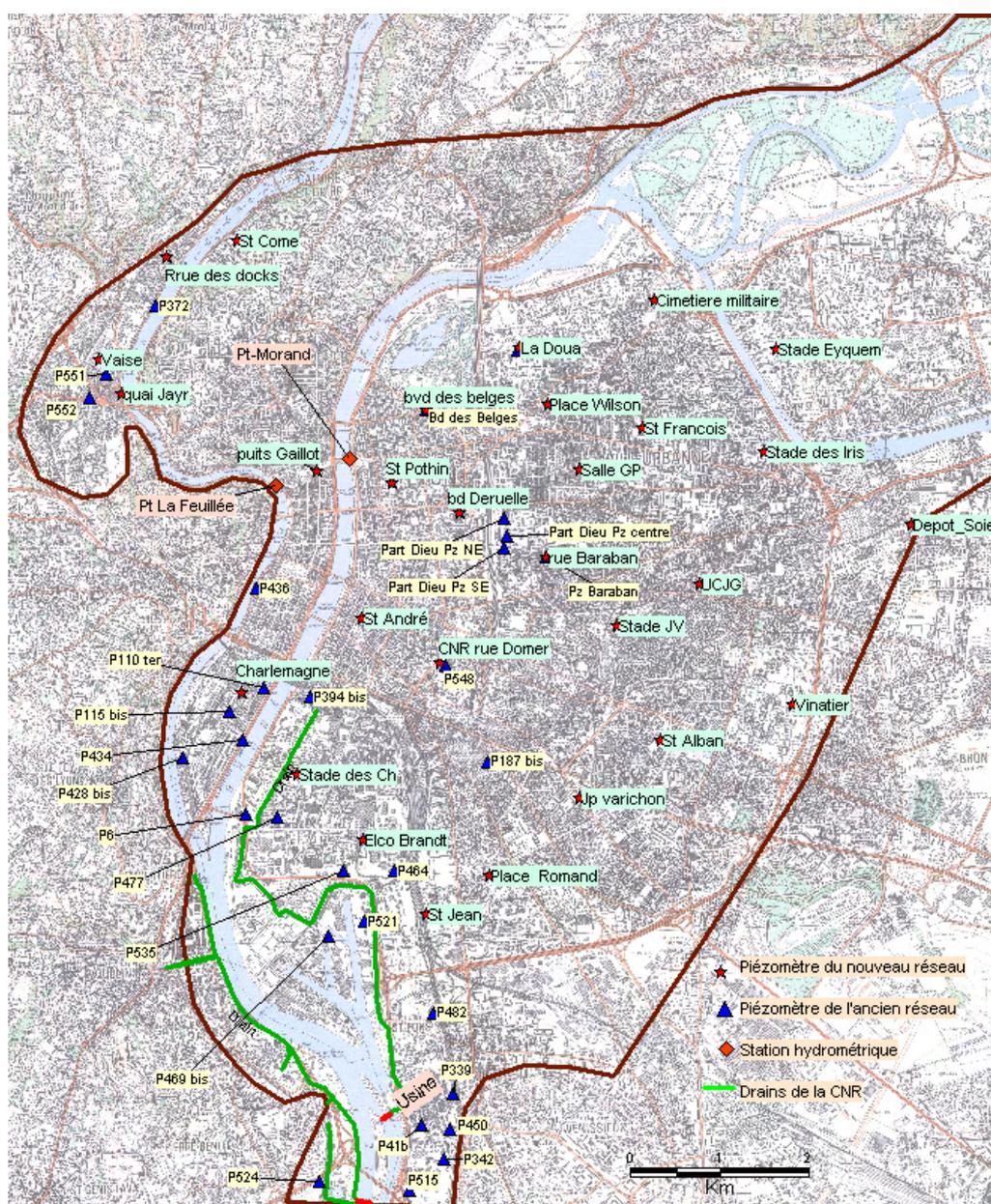


Figure 5 – Carte de localisation des ouvrages de surveillance piézométrique

Par ailleurs, le matériel installé sur 26 des points de ce réseau permet l'acquisition de données de température. Les chroniques en cours d'acquisition pourront être utilisées dans le cadre d'études concernant la problématique de variation de température dans les aquifères de l'agglomération.

IV. MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE

IV.1 Type de modèle et logiciel utilisé

Le modèle construit est un modèle de nappe tridimensionnel couplé au Rhône et à la Saône ; il permet donc d'évaluer l'impact sur la nappe d'éventuelles crues de ces deux cours d'eau. Il tient compte aussi du drainage de la nappe par les drains de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). Il intègre les principaux ouvrages souterrains pouvant influencer les écoulements souterrains : fondations de bâtiments, parkings, lignes de métro, canalisations de grand diamètre.

Le code de calcul utilisé pour la modélisation est le logiciel WinMarthe développé par le BRGM. Il s'agit d'un logiciel de modélisation hydrodynamique utilisant un schéma aux différences finies. Il permet de simuler dans un même "continuum" les écoulements souterrains tant dans la zone non saturée que dans la zone saturée. Le logiciel permet de réaliser des simulations en 2D (plan ou coupe), en 3D et en multicouches (prise en compte du toit et du mur de chaque formation aquifère et d'épentes intercalées). L'intégration d'un réseau hydrographique connecté à la nappe est possible, avec échanges de flux entre les cours d'eau et la nappe. Il est aussi possible d'introduire un réseau de drains souterrains.

IV.2 Limites du modèle

Le choix des limites (figure 1) et du type de condition appliqué à ces limites a été déterminé par la géologie locale et des considérations hydrogéologiques.

Limite Ouest

Les alluvions viennent au contact des formations granitiques du Massif Central. Les apports d'eau en provenance de ces formations sont généralement faibles car les écoulements se font essentiellement en surface et à faible profondeur, avec reprise rapide des eaux infiltrées par le réseau hydrographique de surface. Une condition de flux nul a donc été appliquée.

Pour tenir compte des échanges de flux entre nappe et Saône une condition « mixte » (type « nappe-cours d'eau ») a été introduite au niveau des couches du modèle qui sont en contact avec la Saône.

Limite Nord

Au niveau de la Saône, la limite s'appuie sur le verrou de granite de l'île Barbe qui bloque les flux en provenance des alluvions en amont. Elle se prolonge vers l'est au bas de la colline de Caluire-et-Cuire constituée de matériaux très peu perméables.

Au Nord-Est, la limite du modèle longe le canal de Miribel (le domaine modélisé intègre le champ captant de Crépieux-Charmy).

Une condition de type « flux nul » a été appliquée sur cette limite ainsi qu'une condition mixte (type nappe-cours d'eau) au niveau des couches du modèle qui sont en contact avec le canal de Miribel. Sur cette limite, pour les couches non connectées au canal, la condition de flux nul est aussi appliquée.

Limite Est

Cette limite est parallèle aux isopièzes jusqu'au canal de Jonage ; à partir de celui-ci elle rejoint le canal de Miribel suivant un tronçon rectiligne arbitraire. Sur cette limite une "condition de potentiel" (niveaux de nappe imposés) a été provisoirement introduite (des compléments d'information sont nécessaires). Les valeurs imposées sont déduites des cotes piézométriques relevées en 2004.

Remarque - Dans le régime transitoire, les niveaux imposés varient dans le temps : ils fluctuent en fonction des variations de niveau observées sur quelques piézomètres situés à l'est de la limite.

Limite Sud

Cette limite de 2 km de large environ est franchie par le Rhône juste à l'amont du barrage de Pierre Bénite. La nappe est drainée par le Rhône et la limite correspond à une ligne de courant. C'est donc aussi une limite à flux nul.

IV.3 Maillage

Dans un plan horizontal, le maillage est constitué par des mailles carrées de 100 m de côté (la grille englobant le domaine modélisé comprend 150 lignes et 120 colonnes, soit 18 000 mailles). Cette taille conduit à un nombre de mailles de calcul raisonnable tout en permettant d'assurer une bonne représentation des différentes structures souterraines.

La discrétisation verticale s'est appuyée sur le modèle géologique en préservant le plus possible les différents niveaux géologiques identifiés et les variations de faciès.

Le maillage 3D a donc été construit en définissant 16 plans horizontaux intersectant le modèle géologique (de la cote + 130 m à la cote + 205 m) et délimitant 15 couches de 5 m d'épaisseur chacune (figure 6). La couche supérieure (couche 1 du modèle) est comprise entre la surface topographique et la cote + 205 m.

Un programme de calcul d'intersections du modèle géologique avec les 16 plans de coupe a été écrit pour repérer automatiquement les formations géologiques incluses entre 2 plans de coupe (de cotes Z_i et Z_{i+1}) et pour calculer, dans chaque maille de chaque plan de coupe :

- les épaisseurs des 3 formations géologiques principales contenues dans le volume de la maille, données nécessaires pour calculer une perméabilité globale dans la maille (perméabilité équivalente), compte tenu des perméabilités affectées à chaque formation ;
- le volume (en %) représenté par ces 3 formations, par rapport au volume total de la maille (à titre d'information).

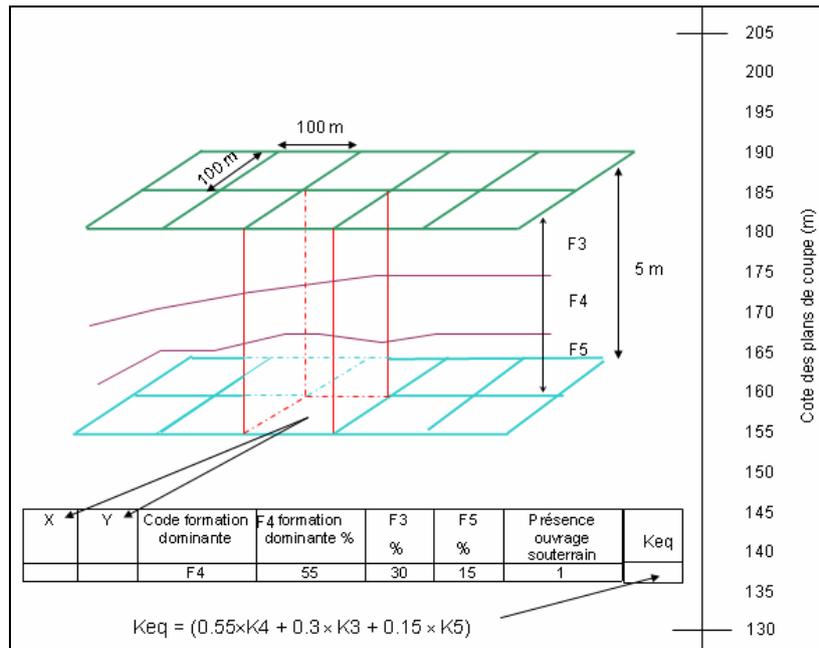


Figure 6 - Principe de la discrétisation verticale

Simultanément, lorsqu'un ouvrage souterrain est repéré dans la maille, un code « présence d'ouvrage » est affecté à la maille (valeur 1, sinon 0).

Pour introduire une perméabilité dans chaque maille du modèle, les valeurs du tableau 1 ont été utilisées. Elles sont a priori globalement représentatives de chaque unité lithologique identifiée dans le modèle géologique (les perméabilités de la molasse ont été réajustées localement lors du calage en régime permanent en raison de l'hétérogénéité de cette formation).

Formation	Caractéristiques	Perméabilité (m/s)
Formations actuelles	Remblais, limons, ...	10^{-6}
Alluvions modernes	à dominante argilo-limoneuse	10^{-3}
	à dominante sablo-graveleuse	4.10^{-3}
Alluvions fluvio-glaciaires	Argileuses	2.10^{-3}
	graveleuses	8.10^{-3}
Formations morainiques	argileuses	10^{-4}
	caillouteuses	5.10^{-4}
Molasse	(hétérogène)	5.10^{-5}

Tableau 1 - Valeurs de perméabilités utilisées pour calculer une perméabilité équivalente dans chaque maille du modèle

Une maille comprise entre 2 plans de coupes peut contenir plus d'une formation. Le repérage automatique de ces formations permet aussi de calculer leur épaisseur dans la maille. La perméabilité équivalente dans la maille est alors une moyenne arithmétique des perméabilités K_i affectée à chaque formation F_i pondérée par les épaisseurs E_i .

Par exemple, pour 3 formations : $K_{eq} = (K_1E_1 + K_2E_2 + K_3E_3) / E$ $E = E_1 + E_2 + E_3 = 5$ m

Compte tenu des cotes de la nappe (inférieures à 175 m), les 8 premières couches ont été fusionnées en une seule, correspondant à la couche supérieure du modèle (couche notée 1 dans la suite), comprise entre la cote + 170 m et la surface topographique.

Le modèle comprend donc au total 9 couches. La grille 3D englobant le modèle comprend donc 162 000 mailles, dont 65 327 mailles de calcul.

IV.4 Couplage avec le Rhône et la Saône

Rhône-Saône et nappe forment un système hydraulique en interaction : les deux cours d'eau drainent ou alimentent la nappe en fonction des différentiels de charge hydraulique (différences entre la cote de l'eau dans le cours d'eau et le niveau de la nappe sous jacente).

Dans chaque maille du modèle traversé par un tronçon de cours d'eau (au nombre de 767), ont été introduits :

- la longueur et la largeur du tronçon ;
- la cote du fond du cours d'eau ;
- l'épaisseur de colmatage du lit et sa perméabilité (estimation a priori pour celle-ci, qui est un paramètre de calage) ;
- la cote du plan d'eau, variable dans le temps (§ 4.8.1.).

Quand le tronçon n'occupe pas toute la surface de la maille, la longueur du tronçon est calculée à partir de son intersection avec les frontières de la maille qui le contient.

La largeur est quant à elle calculée à partir du tracé du réseau fourni par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). La cote du fond de chaque tronçon a été calculée à partir des données de la bathymétrie.

IV.5 Intégration des drains de la CNR

Les drains de la CNR ont été introduits dans le modèle comme des drains classiques (ils ne peuvent que drainer la nappe).

Pour le calcul des débits drainés, les données nécessaires dans chaque maille contenant un tronçon de drain (au nombre de 140) sont :

- longueur L_d et largeur l_d du tronçon de drain ;
- altitude du fond du drain Z_d ;
- coefficient de perméabilité d'échange du drain K_d .

Le débit de la nappe vers le drain est calculé comme suit :

$$Q_{\text{échange}} = K_d \cdot L_d \cdot l_d (H_N - Z_d) ; H_N \text{ étant la charge de la nappe}$$

La cote du fond de chaque tronçon de drain a été calculé par interpolation à partir des valeurs ponctuelles disponibles (au nombre de 55). Selon la cote de leur fond, les tronçons se trouvent soit dans la couche 4 soit dans la couche 5 du modèle.

Un calcul de la longueur du tronçon de drain dans chaque maille a été réalisé à l'aide du logiciel MAPINFO.

On ne dispose pas de données sur le coefficient de perméabilité des drains. Celui-ci sera donc un paramètre de calage.

IV.6 Ouvrages souterrains

1) Sous-sols de bâtiments et parkings

De nombreux sous-sols de bâtiments et de parkings souterrains traversent la nappe alluviale. Leur ancrage, pour les plus profonds, peut atteindre la molasse Miocène.

La localisation (X, Y) des nombreux sous-sols a été facilitée par l'utilisation des bases de données du Grand Lyon. Au total, 621 ouvrages avec sous-sols de plusieurs niveaux ont été répertoriés lors de la première phase.

Les parkings de moins de 3 niveaux, dispersés et peu profonds, ne constituent pas des obstacles significatifs et seuls les ouvrages de 3 niveaux et plus, au nombre de 61, ont été retenus *a priori*.

2) Lignes de métro

L'agglomération lyonnaise comporte quatre lignes de métro. Seules les lignes A, B et D sont à prendre en compte. La ligne C, circulant dans les pentes de la Croix-Rousse, n'atteint pas le toit de la nappe.

L'emprise en surface de ces lignes, était déjà disponible. Les données mises à disposition par le SYTRAL, sous forme de plans, ont permis de compléter celles fournies par les services du Grand Lyon.

3) Tunnels et trémies routières

Seules les trémies situées sur le secteur de la Part-Dieu et implantées dans les alluvions modernes et/ou fluvioglaciaires peuvent représenter un obstacle à l'écoulement. Il s'agit des ouvrages suivants : trémie des Brotteaux, trémie de la Part Dieu, tunnel de Garibaldi.

4) Réseaux d'assainissement

Le tracé des conduites et leurs caractéristiques ont été fournis par le Grand Lyon. Dans le modèle n'ont été introduits que les collecteurs dont le diamètre dépasse 4 m.

IV.7 Calage du modèle

En régime permanent, le modèle a été calé sur les mesures de niveaux effectuées en 2004 aux mois de mai et de novembre sur 73 piézomètres. Les niveaux utilisés pour le calage sont une moyenne des valeurs relevées en mai et novembre.

Les débits moyens à l'exutoire des drains de la CNR, en rive gauche et rive droite, pour l'année 2004 ont été utilisés comme données de contrôle pour vérifier le calage sur les niveaux.

Les paramètres qui ont fait l'objet d'un ajustement sont les coefficients de colmatage du lit des 2 fleuves et des drains. Compte tenu du mode d'affectation des perméabilités en liaison avec la lithologie des formations (§ IV.3) le champ de perméabilité a été très peu retouché, sauf localement, au niveau de la molasse, formation très hétérogène.

Le diagramme de la figure 7 (diagramme de dispersion) permet d'évaluer la qualité du calage.

Les écarts entre valeurs observées et valeurs mesurées sont indiqués dans le tableau 2.

Écart entre niveaux calculés et niveaux mesurés	Nombre de points de mesures concernés par cet écart (sur un total de 73)
$e < 0,5$ m	41 (56%)
$0,5 < e < 1$ m	16 (22%)
$1 < e < 1,5$ m	12 (16.5%)
$1,5 < e < 3$ m	3 (4 %)
$E > 3$ m	1

Tableau 2 - Écarts de calage en régime permanent

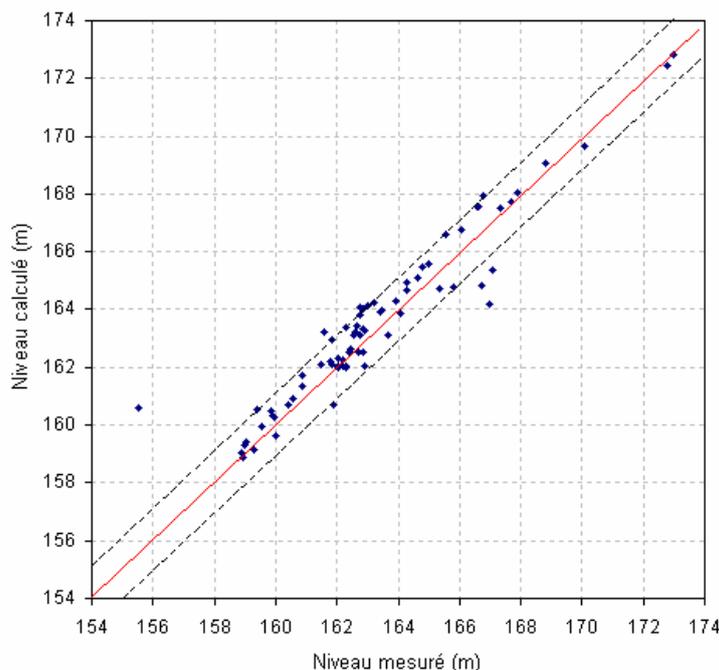


Figure 7 – Diagramme de dispersion après calage en régime permanent

Hormis pour le point où l'on note un écart important (5 m), correspondant vraisemblablement à une anomalie (peut-être colmatage du piézomètre), la plupart des écarts sont faibles, 78 % sont inférieurs à 1 m et 95 % sont inférieurs à 1,5 m.

Les statistiques globales calculées (tableau 3) confirment la bonne qualité du calage (en particulier moyenne des écarts proche de 0 et droite de régression voisine de la diagonale, 2 critères montrant qu'il n'existe pas de biais systématique).

Moyenne des valeurs observées (m)	163,3
Moyenne des valeurs calculées (m)	163,5
Écart-type des valeurs observées (m)	2,99
Écart-type des valeurs calculées (m)	2,92
Moyenne des écarts (m)	-0,26
Écart type des écarts (m)	0,71
Équation de la droite de régression	$H_{cal} = 0,995 H_{obs} + 0,62$

Tableau 3 - Statistiques calculées sur 72 points

Le débit à l'exutoire des drains CNR calculé par le modèle est de 1 658 l/s. Ce débit est très proche du débit moyen mesuré à l'exutoire des drains pour l'année 2004 qui est de 1 641 l/s (composé d'un débit moyen de 509 l/s pour le drain rive droite et de 1 132 l/s pour le drain rive gauche). Le débit calculé par le modèle à l'exutoire du Rhône est de 998 m³/s.

IV.8 Calage en régime transitoire

La modélisation en régime transitoire a été réalisée au pas de temps mensuel de janvier 2000 à décembre 2006.

Le calage a été effectué sur la période 2000-2004 à partir des chroniques piézométriques disponibles sur cette période (sur les piézomètres utilisés, au nombre de 30, il n'y avait pas de mesures postérieures à cette date).

Le nouveau réseau piézométrique, comprenant 29 piézomètres, a été mis en service début octobre 2006 : les données journalières fournies ont été utilisées uniquement sur les 3 derniers mois de 2006 (les données de l'année 2007 seront utilisées pour la phase 4 du projet) et ont surtout permis de valider le calage sur 2000-2004.

Le modèle fonctionne néanmoins de façon continue de janvier 2000 à décembre 2006, soit 84 pas de temps mensuels.

1) Données

• Niveaux du Rhône et de la Saône

Les cotes de la ligne d'eau ont été introduites pas de temps par pas de temps à partir des mesures journalières faites au Pont Morand pour le Rhône et au pont de la Feuillée pour la Saône.

La figure 8 montre l'évolution des niveaux du Rhône de 1985 à 2006 (aux courbes d'évolution journalière ont été superposées, pour comparaison, les courbes tracées à partir des moyennes mensuelles de ces valeurs journalières).

Le passage aux moyennes mensuelles, utilisées pour la modélisation (puisque celle-ci est conduite au pas de temps mensuel), amortit nettement les amplitudes. Une modélisation au pas journalier sera donc nécessaire pour estimer plus précisément l'impact sur la nappe d'une crue du Rhône et de la Saône.

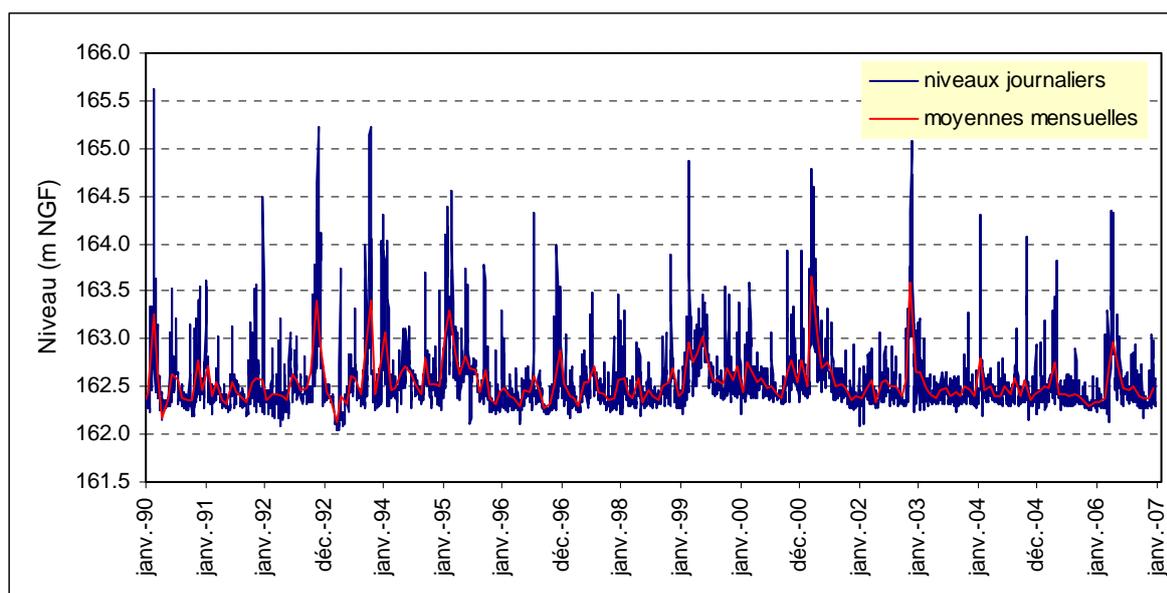


Figure 8 - Niveaux du Rhône au pont Morand, de 1990 à 2006

• *Recharge par les pluies*

En raison de l'imperméabilisation quasi-totale des zones urbanisées, seuls les parcs et jardins situés dans la zone d'étude constituent des zones de recharge de la nappe (11 % de la surface totale du modèle).

Les pluies efficaces ont été calculées sur la période d'Octobre 1999 à décembre 2006 à partir des données décennales de pluviométrie et d'ETP enregistrées à la station de Bron et en prenant une valeur de réserve en eau des sols de 100 mm.

Le modèle fonctionnant au pas de temps mensuel, la pluie efficace mensuelle a été obtenue par cumul des valeurs décennales du mois.

La valeur moyenne annuelle calculée sur 7 ans (2000 à 2006) s'établit à 167 mm.

• *Prélèvements dans la nappe*

L'inventaire des prélèvements le plus complet concerne l'année 2002. Il a été constitué à partir du fichier des redevances de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, des données fournies par la DDAF du Rhône, de la consultation d'études du BURGEAP et du Grand Lyon (cf. rapport de la phase 2 de l'étude).

Malgré les recoupements effectués, ce recensement présente des lacunes ou des imprécisions pouvant être dues à des ouvrages non déclarés, des localisations erronées ou approximatives ou encore des prélèvements non actualisés.

Pour les années 2000, 2001, 2003, 2004, 2005 on ne dispose que des données venant de l'Agence de l'Eau RMC : elles ne représentent qu'une partie des prélèvements effectués et, comme pour l'année 2002, il y a des imprécisions (localisation et volumes). De plus, d'une année à l'autre, les dénominations changent (par exemple, le type d'usage) ou bien certains prélèvements apparaissent une année mais pas la suivante, ce qui rend difficile la comptabilité et le suivi. Le tableau 4 dresse une comptabilité globale faisant apparaître ces variations.

Remarque :

1) Pour l'année 2006, aucun inventaire n'existant, les prélèvements de l'année 2005 ont été reconduits.

2) Pour la plupart, les prélèvements pour pompes à chaleur sont réinjectés dans la nappe. Ne sont donc pris en compte comme prélèvements effectifs que ceux pour lesquels il est précisé "restitution superficielle ou restitution à l'égout".

Usage	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Industrie et pompes à chaleur	50 064 700 (53)	47 480 300 (49)	50 990 900 (63)	44 223 200 (44)	42 014 400 (50)	37 946 021 (55)
Autres (usage non précisé)	?	88 900 (1)	2 263 620 (12)	44 100 (1)	41 400 (1)	68 900 (1)
Irrigation	387 100	330 400	454 200	408 800	816 162	1 077 638
Drainage parkings	11 574 500	14 701 500	13 458 189	11 957 900	14 770 200	13 579 300
Champ captant de Crépieux-Charmy	99 585 490	102 816 370	107 291 980	113 232 000	108 431 000	108 431 000
TOTAL	161 611 790	165 417 470	174 458 889	169 866 000	166 073 162	161 102 859

Les chiffres entre () correspondent au nombre de forages concernés par les prélèvements.

Tableau 4 - Prélèvements annuels (en m³) sur la période 2000 à 2005

Le recensement des prélèvements variant d'une année à l'autre, les points de prélèvements ayant été recensés pour l'année i-1 et ayant « disparu » l'année i sont reconduits avec les valeurs de l'année i-1.

La moyenne annuelle sur les 7 ans s'établit alors à 176.6 millions de m³.

2) Résultats du calage : comparaison avec les mesures piézométriques

Comme il n'est bien sûr pas possible d'intégrer dans cet article tous les graphiques de comparaison entre mesures et calculs, deux graphiques de comparaisons seulement sont présentés : la figure 9 propose un exemple de calage sur le piézomètre 110 ter (secteur Presqu'île) et la figure 10 un exemple de validation avec le piézomètre « Stade Eyquem » du nouveau réseau.

Pour la plupart des piézomètres, les mesures sur la période 2000-2004 ont été faites à des pas de temps espacés, et 3 à 5 mesures par an seulement sont disponibles sur ces piézomètres.

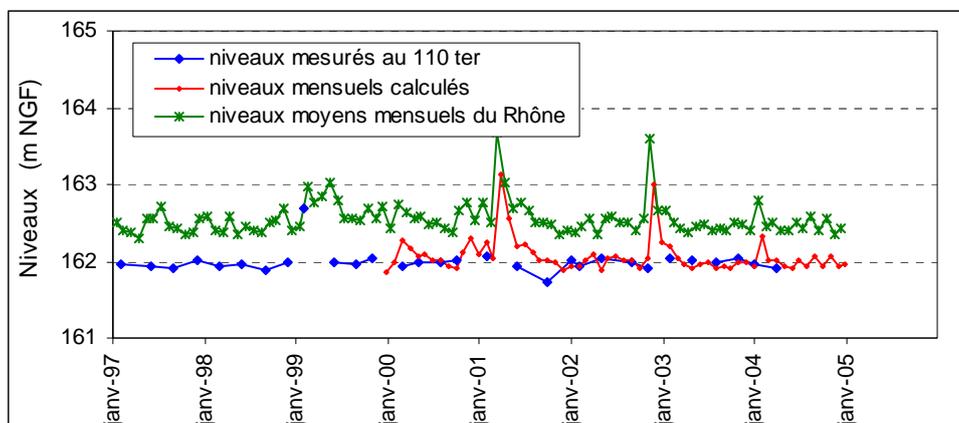


Figure 9 – Exemple de calage sur le piézomètre 110 ter (Presqu'île)

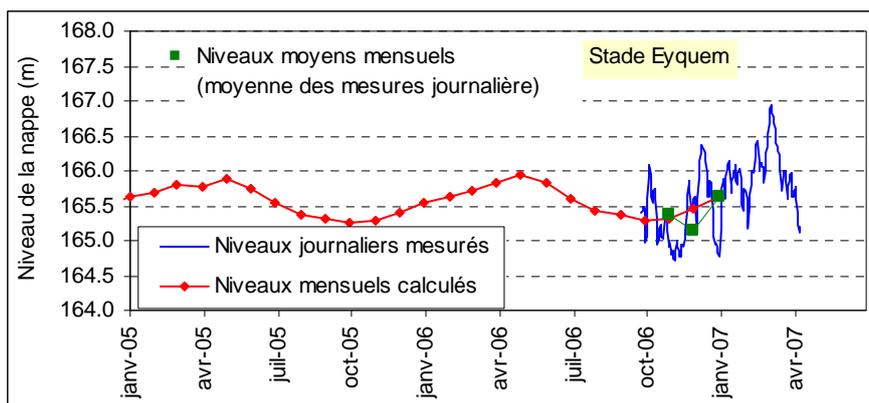


Figure 10 – Exemple de validation sur le piézomètre « Stade Eyquem » du nouveau réseau

De plus, très généralement, les mesures manquent au moment où les niveaux du Rhône et de la Saône sont au plus haut, ce qui introduit des lacunes de comparaison dans l'appréciation du calage : les niveaux hauts piézométriques calculés, en relation avec les "pics" de niveaux du Rhône et de la Saône, ne peuvent donc être comparés à des mesures (figure 9).

Les écarts moyens entre mesures et calculs sont généralement inférieurs à 50 cm. Ils ne sont nettement supérieurs à 1 m que pour 2 piézomètres (P464 avec +1,58 m et P515 avec -1,42 m) et proches de 1 m pour 2 piézomètres (P339 avec un écart égal à - 1,01 m et P187 avec un écart de 0,97 m). Une appréciation quantitative globale du calage a été faite en calculant par piézomètre la moyenne des valeurs mesurées et celle des valeurs simulées puis en calculant les écarts entre ces moyennes (sachant qu'une comparaison date à date n'est pas possible, compte tenu de l'irrégularité temporelle des mesures sur la période 2000-2004). Les caractéristiques statistiques de cet échantillon de 30 écarts sont rassemblées dans le tableau 5.

Nombre de valeurs	30
Minimum	-1,42
Maximum	1,58
Moyenne	-0,02
Écart-type	0,57

Tableau 5 - Statistiques globales sur le calage en régime transitoire

La moyenne des écarts, proche de 0 (2 cm) montre qu'il n'y a globalement ni surestimation ni sous estimation des niveaux calculés.

3) Résultats du calage : restitution des paramètres

Le calage sur la piézométrie a été effectué :

- en modifiant localement les champs de perméabilités ;
- en retouchant les valeurs de "perméabilité de colmatage" des cours d'eau issues du régime permanent ;
- en réglant par couche les coefficients d'emmagasinement.

• Champs de perméabilité

La gamme de valeurs s'étend de $5 \cdot 10^{-5}$ m/s (formations molassiques) à 810^{-3} m/s (alluvions).

• Coefficients d'emmagasinement

Une première zonation a été établie sur la base des zones de perméabilité. Après quelques essais, 3 valeurs ont été retenues, 5 % (molasse), 10 % et 15 %, en accord avec les quelques valeurs disponibles issues de l'interprétation des pompages d'essai.

• Perméabilités de colmatage des cours d'eau

La perméabilité est de 10^{-6} m/s à $5 \cdot 10^{-6}$ m/s sur la plus grande partie du cours du Rhône et de la Saône, de 10^{-9} m/s le long du canal de Jonage (très peu perméable), de 10^{-8} m/s sur 1,5 km juste à l'amont de la limite Sud et de 10^{-4} m/s à l'aval de l'écluse (valeur peu plausible qu'il conviendra sans doute de diminuer).

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le travail se poursuit actuellement. Il s'agit de mieux prendre en compte les variations brusques de niveaux du Rhône et de la Saône, des simulations au pas de temps journalier doivent encore être réalisées, le pas de temps mensuel ayant un effet amortissant. Des simulations des crues du Rhône et de la Saône suivant différents scénarios de fréquence fournis par le Service Navigation Rhône Saône (travail réalisé par la Compagnie Nationale du Rhône) sont également prévues.

Les modèles réalisés et le réseau de surveillance piézométrique mis en place permettront à la communauté urbaine et à ses services de conduire leur politique d'aménagement urbain. Les besoins en matière de connaissances géologiques et hydrogéologiques étant de plus en plus importants, les outils mis en place répondent en partie à cette demande.

Le Grand-Lyon souhaite pérenniser ces travaux grâce au maintien du réseau de surveillance, à l'alimentation et la mise à jour régulières du modèle hydrodynamique.

Les données piézométriques seront mises à disposition du public via ADES (7), le site Internet d'accès aux données sur les eaux souterraines.

De même, l'acquisition de chroniques de température pourra permettre la mise en place d'études sur la problématique de variation de température dans les aquifères de l'agglomération. ■

Références bibliographiques

- (1) **Nicolas J., Petit V., Thierry P., Besse A., Longet A., 2004** – Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise. Rapport d'étape – Phase 1. BRGM/RP-53569-FR
- (2) **Amraoui N., Tuffet E., Nicolas J., Seguin J.-J., 2005** – Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise - Rapport d'étape - Phase 2. Construction du modèle hydrodynamique et calage en régime permanent – BRGM/RP- 54379-FR
- (3) **Seguin J.-J., Nicolas J., 2006** – Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise - Rapport d'étape - Phase 3. Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire et suivi du réseau piézométrique – BRGM/RP-55065-FR
- (4) **MONGEREAU N., 2001** – Géologie de Lyon. Éditions Lyonnaises d'Art et d'Histoire
- (5) **MONGEREAU N., 2004** – Géologie du Grand-Lyon. Édition de la communauté urbaine du GRAND-LYON
- (6) **BSS – Banque des données du Sous-Sol** – Base de données La (BSS) des informations brutes géologiques et techniques relatives à des ouvrages souterrains (localisation, objet, description géologique, équipement technique des forages) résultant de l'application du code minier qui rend obligatoire la déclaration de certains ouvrages. Le BRGM est chargé de gérer cette banque et de la mettre à disposition du public <http://infoterre.brgm.fr>
- (7) **ADES - Accès aux Données sur les Eaux Souterraines** – banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines rassemblant sur un site Internet public des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines <http://www.ades.eaufrance.fr>

Variations de la nappe phréatique et cartographie de l'infiltrabilité des sols sur le territoire de la Seine-Saint-Denis

Olivier Fouché ⁽¹⁾, Alain Hirschauer ⁽²⁾

(1) Conservatoire National des Arts et Métiers - 2, rue Conté - 75141 Paris Cedex 03
olivier.fouche@cnam.fr

(2) Direction régionale de l'Équipement d'Île-de-France - Laboratoire de l'Est Parisien
319, avenue Georges Clémenceau - 77015 Melun Cedex –
alain.hirschauer@equipement.gouv.fr

I - INTRODUCTION

Cet article traite des différentes nappes influençant l'urbanisme sur le territoire de la Seine-Saint-Denis. Il s'appuie sur une étude réalisée au LREP qui a eu pour objet l'évaluation du niveau actuel des nappes phréatiques et son analyse par comparaison avec les niveaux de 1997 et de 1862 (carte Delesse). Ceci offre un cadre pour conditionner le développement des techniques d'injection et d'infiltration dirigée en assainissement pluvial. Cette démarche est motivée par divers phénomènes affectant le patrimoine bâti et les réseaux :

- inondation de parkings par remontée de nappe dont l'origine paraît liée à l'abandon de pompes industrielles et à des périodes pluviométriques exceptionnelles ;
- intrusion d'eaux claires parasites permanentes (ECP) dans les réseaux mettant en évidence le fait que certains drainent la nappe.

Nous avons dressé une carte isopiézométrique de la nappe phréatique au 1/25 000 (équidistance des courbes : 2 m) qui couvre en grande partie le département, mais pas totalement car on manque de données, en particulier sur les plateaux. Nous avons procédé également à un « état des lieux » relatif à l'emploi des eaux souterraines pour des besoins industriels et l'alimentation en eau potable, dans la mesure où ces prélèvements ne sont pas sans conséquence sur le niveau des nappes superficielles.

Diverses sources ont été exploitées. Nous disposons de piézomètres :

- issus d'études de reconnaissance effectuées par le LREP pour le compte de divers maîtres d'œuvre ;
- réalisés par la SNCF, RATP, BRGM. et ADP : nous avons consulté ces grands maîtres d'ouvrage publics et obtenu des données historiques ou contemporaines ;
- réalisés par les communes de la Seine-Saint-Denis.

Ce département d'une superficie de 236 km² se caractérise par l'existence de deux bassins versants séparés par le massif de l'Aulnaye. Les exutoires de ces bassins sont : au nord-ouest, la Seine, et au sud, la Marne.

Plusieurs entités géomorphologiques sont distinguées (Figure 1).

Les buttes témoins : elles constituent les points hauts du relief du département ; elles sont issues de l'érosion différentielle des horizons gypseux du Ludien qui forment leur ossature. Leur fonctionnement hydrogéologique est autonome.

Le Pays de France : ce plateau est situé au nord-est du département.

Le plateau de Brie : il concerne uniquement la commune de Noisy-le-Grand qui se distingue des buttes témoins par le faciès marno-calcaire du Ludien.

La vallée de la Marne : cette plaine alluviale actuelle s'est développée entre le plateau de Brie et les buttes formées par le plateau d'Avron et le massif de l'Aulnaye. Au sud de Montreuil, des dépôts alluviaux sont issus d'un tracé ancien de la rivière.

La plaine de France : cette plaine peu pentue intéresse la partie centrale du département ; elle est drainée par un chevelu hydrographique dense qui converge vers la Seine.

Les deux dernières unités, vallée de la Marne et plaine de France, sont liées au fonctionnement du multicouche. Ces entités géographiques se superposent à une géologie spécifique qui sera un facteur majeur dans l'étude des aquifères.

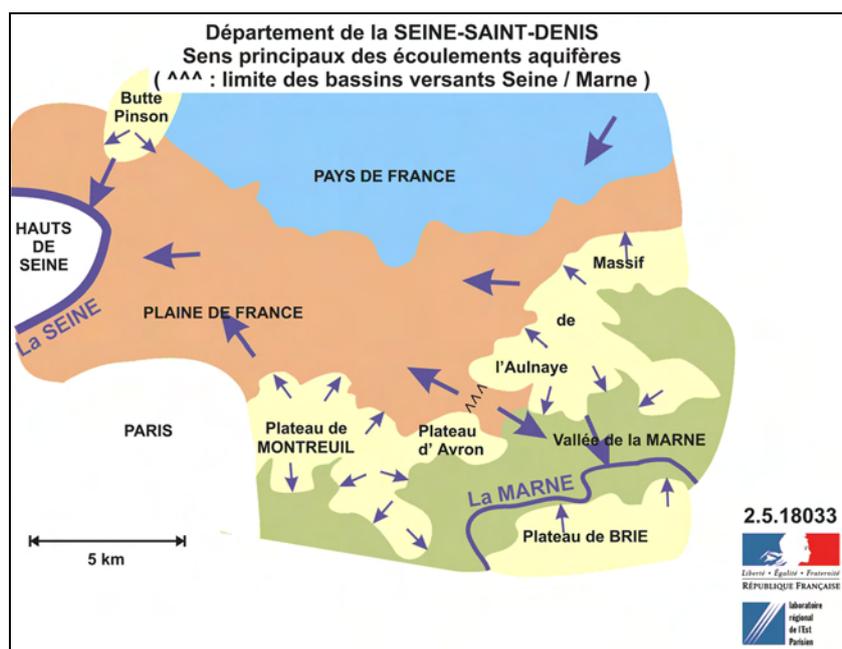


Figure 1 - Géomorphologie du département 93 et sens principaux des écoulements dans les aquifères superficiels contenant les nappes phréatiques.

Le département de la Seine-Saint-Denis est situé au cœur du Bassin de Paris dont la structure en cuvette bien connue détermine l'existence d'importants aquifères profonds. À une échelle restreinte, ce type de structure intéresse l'aquifère multicouche du Tertiaire qui seul concerne notre étude. L'épaisseur de roches sédimentaires qui se sont formées durant l'ère Tertiaire atteint seulement 150 m. Si les terrains des ères Primaire et Secondaire sont très épais et monotones sur le plan lithologique, les horizons du Tertiaire seront peu épais (10 m en moyenne) et de pétrographie très contrastée. Dans ce qui suit, le découpage stratigraphique respecte celui retenu par le BRGM dans l'établissement de sa carte géologique à 1/25 000. La complexité et les variations de faciès et d'épaisseur des différentes formations n'en permettent pas une approche rigoureuse et exhaustive ; seules seront abordées les formations les plus représentatives de l'Île-de-France. Leur épaisseur et leur répartition sont liées aux structures tectoniques locales (fortes épaisseurs dans les zones synclinales).

Du point de vue des principales structures tectoniques, le département est concerné par :

- au nord, la ride de Louvres ;
- au centre, le synclinal de la Seine et son phénomène associé : la Fosse de Saint-Denis ;
- au sud, l'anticlinal de Meudon influence légèrement la structure des couches.

Ces structures tectoniques jouent un rôle majeur dans l'écoulement au sein des aquifères, qui s'effectue en général des zones anticlinales vers les zones synclinales. La description des terrains va éclairer le rôle et les caractéristiques des couches sur le plan hydrogéologique.

II – LE QUATERNAIRE

Depuis 20 millions d'années, aucun sédiment ne s'est déposé dans le bassin de Paris ; cette période très longue de l'ère Tertiaire correspond à des phases d'érosion importantes, rythmées par l'évolution du niveau des mers et du climat qui ont mené au relief actuel. L'érosion et son corollaire, la remobilisation de sédiments, ont cependant engendré des dépôts, dont l'épaisseur excède rarement 10 m. Globalement, les terrains superficiels naturels sont hétérogènes : leur faciès et leur épaisseur sont sujets à une forte variabilité. Dans la Plaine de France en particulier, les sols se sont mélangés sous l'effet de cycles de gel/dégel (phénomène de solifluxion). Des plus récents aux plus anciennes, on distingue les formations suivantes.

II.1 - Les remblais

Toutes les zones urbaines comportent une épaisseur superficielle de remblais non négligeable ; ces derniers seront de plusieurs types :

- des remblais employés pour aplanir les terrains ;
- de grandes quantités de mâchefer issus de la houille employée pour le chauffage durant plus d'un siècle ; ce type de remblai est surtout rencontré dans les « vieilles » zones urbaines et plus spécialement à la périphérie de Paris ; leur épaisseur peut varier entre 1 et 2 m ;
- les remblais de carrières situés essentiellement sur les versants gypseux ; il s'agit de sols à dominante marno-argileuse imperméables et peu portants (épaisseur 15 m à Livry-Gargan) ;
- les remblais de surélévation : ils sont présents essentiellement sur l'île Saint-Denis (cote NGF : 30) et sur les berges de Seine en rive droite ; leur épaisseur peut atteindre 5 à 7 m afin de relever le terrain au-dessus du niveau de la crue de 1910 (29,30 NGF).

II.2 - Les Limons des plateaux

Ces dépôts éoliens recouvrent les terrains du Tertiaire érodés. On y observe de haut en bas le Lehm – limon décalcifié peu perméable – et le Löss moins argileux et qui peut contenir des éléments de sables fins. La base de cette couche est peu perméable ($K < 10^{-6}$ m/s) mais les eaux zénithales peuvent s'y infiltrer selon un débit faible. Ils représentent l'horizon superficiel le plus fréquemment rencontré dans le département :

- sur les buttes témoins où leur épaisseur n'excède pas 1 à 2 m ;
- sur le plateau du Pays de France (nord-est du département) où leur puissance peut atteindre 4 à 6 m ;
- dans les vallées où ces limons ont été transportés par le vent, ils sont moins homogènes et reposent sur les alluvions anciennes.

II.2.3 - Les Éboulis et les Colluvions

L'intense érosion qui a décapé l'ensemble des terrains (des Sables de Fontainebleau aux Masses et Marnes du Gypse) a modelé des versants tapissés de sédiments issus des horizons sus-jacents. Ces éboulis sont formés d'un mélange hétérogène de marnes, de meulière, d'argile et de sable dont l'épaisseur s'accroît avec l'éloignement de la tête du versant (15 m d'épaisseur en pied de versant à Clichy-sous-Bois). Des eaux souterraines issues des plateaux y circulent : ces écoulements de coteaux, peu importants en débit, peuvent néanmoins générer des glissements en cas d'ouverture de fouille mal étudiée. Un cas particulier est à noter sur le versant de Noisy-le-Grand où les couches se sont étirées et ont conservé leur apparence de structure.

II.4 - Les alluvions modernes

Le réchauffement post-glaciaire a eu un double rôle :

- montée du niveau des mers avec, en corollaire, un net ralentissement de la vitesse d'écoulement des cours d'eau (sédiments plus fins) ;
- sols non gelés et, par conséquent, plus érodables.

Les dépôts alluviaux les plus récents seront des limons plus ou moins organiques, des vases, des tourbes. On y trouve également de la *Falaize*, tuf calcaire d'origine biologique, cohérent mais très peu dense, abondant dans les Alluvions Modernes de la Marne au contact avec les Alluvions Anciennes. L'épaisseur de ces dépôts est très variable (3 à 10 m) pour la Seine et la Marne ; ils sont en général plus épais à proximité du lit mineur et aux abords des parties convexes des méandres.

Les Alluvions Modernes des cours d'eau secondaires (Vieille Mer, Morée...) sont peu épaisses (< 5 m) mais contiennent des niveaux tourbeux aux zones de confluence avec la Seine et la Marne.

II.5 - Les Alluvions anciennes

Elles sont de deux types bien différenciés : les Alluvions Anciennes du réseau hydrographique principal, et celles du réseau hydrographique secondaire.

II.5.1 - Les Alluvions anciennes du réseau hydrographique principal

On observe que les Alluvions Anciennes de la Seine sont pratiquement absentes en raison de la situation en rive concave du méandre de Gennevilliers (le fleuve érode le Marno-Calcaire de Saint-Ouen au nord de la commune du même nom).

II.5.1.1 - Moyenne terrasse de la Marne (F_x)

On ne la rencontre qu'au sud de la commune de Montreuil : son épaisseur est de 5 à 10 m et on distingue des éléments silico-calcaires avec de nombreux silex et galets à la base. Cette couche, située 30 m au-dessus de la rivière, n'est pas aquifère.

II.5.1.2 - Les Alluvions anciennes de la Marne (F_y)

C'est la basse terrasse, dans le lit majeur de la rivière. Elles sont présentes au sud-est du département. Leur épaisseur est de 5 m en moyenne mais dans certaines zones elle peut être très irrégulière (1 à 10 m sur un même site). Ces dépôts sont plus sableux et plus calcaires que ceux de la Seine. On y trouve à la base des dalles calcaires ou siliceuses qui auraient été transportées par les glaciers. Des poudingues y sont aussi rencontrés.

Cette couche peut être extrêmement perméable comme l'indiquent les essais de pompage réalisés à Neuilly-sur-Marne (Pointe de Gournay : $T = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; collecteur dit du Plateau d'Avron : $T = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$).

II.5.2 - Les Alluvions anciennes du réseau hydrographique secondaire

La Plaine de France se caractérise, sur le plan hydrographique, par l'existence d'un chevelu dense. Cette zone est longue de 20 km et large de 1,5 à 4,5 km vers sa terminaison. Avant les aménagements, les eaux convergeaient vers un « delta » sillonné par la Vieille Mer, le Croult et le Rouillon, qui ont engendré une zone marécageuse et humide entre Dugny et Saint-Denis, avant de se jeter dans la Seine. La topographie quasi horizontale a déterminé l'existence de nombreux rus, affluents de la Vieille Mer. À l'inverse des Alluvions de la Marne déposées sur l'ensemble de son lit majeur, les Alluvions Anciennes du réseau hydrographique secondaire sont peu épaisses (< 5 m) et la largeur de leurs dépôts ne dépasse pas 500 m.

La nature lithologique des dépôts est liée à celle du bassin-versant :

- Alluvions de la Vieille Mer : cette rivière coule sur le marno-calcaire de Saint-Ouen et produit une grave +/- marneuse avec éléments calcaires anguleux et sable fin issu des Sables de Monceau ; épaisseur de 3 m à Dugny. Lorsque la phase marneuse est peu abondante, ces sables et graviers peuvent être très perméables (essai de pompage : $K = 5.10^{-4}$ m/s à Saint-Denis) ;
- Alluvions du Rouailler : elles sont formées essentiellement de sables fins (grain moyen de 0,1 mm) issus des Sables de Fontainebleau. Les essais Lefranc réalisés dans ce type de terrain indiquent des valeurs de perméabilité assez étendues (10^{-7} m/s < KL < 10^{-5} m/s) selon la teneur en argile de ces sables.

III – LES TERRAINS DU TERTIAIRE

Dans le log litho-stratigraphique (Figure 2), on distingue de haut en bas.

III.1 - Stampien

- Les Sables de Fontainebleau (g2b)

On ne rencontre ces sables fins (taille médiane de grain : 150 μ m) qu'au sud du département (Les Lilas, Le Pré Saint-Gervais). Initialement épaisse de 30 m environ, la couche est érodée et son épaisseur résiduelle est inférieure à 20 m. Ces terrains sont très perméables tant qu'ils ne sont pas argileux. Le mur imperméable de la nappe peu puissante qui circule dans ces derniers est constitué par un horizon peu épais (2 m), les Marnes à Huîtres (g2a).

III.2 - Sannoisien

- Le Travertin de Brie (g1b)

Hormis sous le Plateau de Brie, cet horizon marno-calcaire se présente en général sous la forme d'une surface d'érosion : il couronne les buttes témoins et son épaisseur est donc irrégulière (2,5 m à 8 m). Là où elle apparaît sous son faciès calcaire franc et fracturé, cette couche est très perméable comme l'indiquent des essais Lefranc effectués récemment à Montreuil dans le quartier Saint-Antoine (5 essais, valeur moyenne $K = 3,3.10^{-4}$ m/s). Le mur imperméable de la nappe est constitué par un ensemble argileux compact et continu dont la puissance totale est comprise entre 6 m et 7 m : Argiles Vertes et Marnes à Cyrènes (g1a).

III.3 - Bartonien supérieur

III.3.1 - Les Marnes supragypseuses (e7b)

Les Marnes de Pantin, épaisses de 4 à 5 m, franches et compactes, sont le siège d'une nappe libre peu productive ($K < 10^{-5}$ m/s) qui peut devenir localement captive sous l'effet d'une mise en charge par les Argiles Vertes sus-jacentes (sous les versants). Elles sont plus argileuses dans leur partie inférieure et passent aux Marnes d'Argenteuil qui présentent un faciès homogène de marnes très argileuses indurées. Dans une épaisseur de 12 m environ, on relève la présence discontinue d'interlits silteux et de fins niveaux de calcite cristalline en grains. Le tiers inférieur est constitué par l'alternance de marnes franches et de petits bancs décimétriques de gypse saccharoïde (« bancs de chien »).

III.3.2 - Les Masses et Marnes de Gypse (e7a)

Sensibles à l'érosion en raison de la solubilité du gypse (2,4 g/l) on ne les trouve dans leur intégralité qu'au droit des buttes témoins dont elles forment l'ossature. L'épaisseur cumulée de ces horizons croît de l'ouest vers l'est : 23 m à Montreuil, près de 40 m à Livry-Gargan. Cette série gypseuse a fait l'objet de nombreuses exploitations à ciel ouvert et en galeries souterraines creusées à partir du versant. L'alternance de couches perméables (gypses) et

impermeables (marnes) peut engendrer l'existence de poches d'eau locales alimentées par les aquifères sus-jacents et la pluviométrie.

Dans la Plaine de France il subsiste quelques reliquats de la 3^e Masse de gypse (qui atteint au maximum 3 m d'épaisseur sous les buttes) ; c'est une couche en phase de dissolution active en raison de sa faible profondeur et de son contact avec la nappe phréatique. C'est ainsi que des fontis remplis d'alluvions sableuses peuvent apparaître en surface. En dessous, les Marnes à Pholadomies forment en fait l'horizon du Tertiaire le plus récent qui se rencontre largement dans la Plaine de France, bien que totalement érodée dans son quart nord-ouest. Cette couche de marne épaisse de 2 à 3 m, très peu perméable, joue le rôle de toit de la nappe sous-jacente du marno-calcaire de Saint-Ouen. Appelée aussi « Marnes infragypseuses », elle porte localement une nappe superficielle séparée de la nappe du Saint-Ouen.

III.4 - Bartonien inférieur (e6d)

On y distingue :

- la 4^e Masse de gypse, peu épaisse (1 m) et qui n'est pas présente sur tous les sites (lacunes de sédimentation) ;
- les Sables de Monceau, couche épaisse de 3 m environ formée de marne compacte et de sable fin et pulvérulent dont l'érosion et le transport participent à l'alluvionnement de la partie aval de la Plaine de France.

III.4.1 - Le Marno-calcaire de Saint-Ouen (e6c)

C'est une assise épaisse d'une dizaine de mètres qui constitue le substratum des plaines alluviales et du Pays de France, et qui présente un intérêt particulier dans le cadre de cette étude. Le calcaire de Saint-Ouen est largement érodé dans la Plaine de Saint-Denis : c'est pourquoi la phase rocheuse de cet horizon est présente dans les dépôts alluviaux dans le lit mineur des rus (graviers calcaires anguleux, grave marneuse des alluvions de base).

La formation du Saint-Ouen « stricto sensu » est constituée des niveaux suivants :

- la couronne, épaisse de 1 m formée de calcaire dur et de sépiolite ;
- un horizon épais de 2 m formé de calcaire marneux et de marnes hydrophiles très peu perméables ;
- une alternance de marnes, de calcaires et d'argile magnésienne d'une épaisseur maximale de 2 m ;
- l'horizon de Mortefontaine, calcaire chocolat gréseux épais de 1 m ;
- l'horizon de Ducy est un ensemble de calcaire beige dur fracturé et de marne, épais de 2 m environ.

Ces deux derniers horizons (Mortefontaine et Ducy, e6b) sont peu épais mais représentent une couche perméable à l'origine de forts débits d'exhaure lors des terrassements effectués dans ces niveaux aquifères. Les essais de pompage qui y ont été réalisés soulignent cette caractéristique.

Site	Durée de pompage	Transmissivité T (en m ² /s)	Rayon d'action R du puits (en m)
Savigny et Aulnay-sous-Bois	24 h	4.10 ⁻³	2 000
La Molette	2 mois (fouille)	8.10 ⁻⁴	400
Vieux-Blanc-Mesnil	2 h	1.10 ⁻³	100
Rue Bel Abbès, Blanc-Mesnil	30 h	4.10 ⁻³	2 200

III.4.2 - Les Sables de Beauchamp (e6a)

Cette formation épaisse de 10 à 12 m est formée de haut en bas :

- de sable fin vert +/- argileux et de grès ;
- de marne argileuse quasi imperméable dit « écran médian » ;
- de sable fin argileux.

L'écran médian joue le rôle important de mur de la nappe phréatique et de toit de la nappe du Lutétien sous-jacente. De nombreuses fouilles profondes ont été réalisées à l'aide d'enceintes en parois moulées ancrées dans ce niveau, permettant d'isoler efficacement ces excavations des aquifères. Les Sables de Beauchamp ne sont pas rencontrés directement sous les alluvions sauf au niveau de quelques boutonnières où le Marno-Calcaire de Saint-Ouen est entaillé par l'érosion (à Dugny et Saint-Denis et dans le lit mineur des rus dans la partie aval de la Plaine de France).

Les horizons du Marno-Calcaire de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp sont dotés d'une géométrie relativement régulière en épaisseur et en structure. Pour simplifier, en particulier dans la Plaine de France, une certaine conformité est observée entre l'altitude du toit des couches et la surface topographique.

Ce n'est pas le cas des terrains sous-jacents, Lutétien et Yprésien, qui sont affectés par :

- l'existence d'une fosse synclinale au niveau de Saint-Denis et en corollaire un net épaissement des couches ;
- la présence de « bassins » de sédimentation de nature lagunaire qui se caractérisent par la présence d'horizons gypseux ponctuellement très développés et karstiques.

Ces terrains sont profonds et rarement atteints lors de l'exécution de fouilles. Cependant, ils représentent des aquifères importants qui ont été, ou qui sont, largement exploités par divers pompages, ce qui n'est pas sans conséquence sur le niveau statique des nappes superficielles de la Plaine de France.

III.5 - Le Lutétien

Rencontré à partir de 15 à 20 m de profondeur, sous les plaines alluviales et le Pays de France, cet ensemble est formé essentiellement par :

III.5.1 - Les Marnes et Caillasses (e5d)

Couche au faciès marno-calcaire plus ou moins fracturé, épais de 12 m mais qui peut atteindre 20 à 30 m lorsqu'il est gypseux (Sevrans, Saint-Denis, La Chapelle, Aubervilliers) : dans ce cas, on observe des phénomènes de dissolution et parfois d'effondrement. Des variations piézométriques importantes liées aux activités humaines (pompages industriels) peuvent remettre en cause la stabilité de cavités profondes et engendrer des accidents à la surface.

III.5.2 - Le Calcaire Grossier (e5a – e5c)

Couche massive de calcaire fossilifère (pierre à bâtir de Paris) épaisse de 20 m environ. Peu fracturée, cette couche peu perméable sépare les Marnes et Caillasses de la nappe sous-jacente de l'Yprésien.

III.6 - L'Yprésien (e4)

Cet étage est représenté par des sables couramment appelés « Sables Cuisiens » ou encore « Sables du Soissonnais » en référence à la région où ils sont rencontrés à l'affleurement. Le faciès dominant correspond à des sables moyens contenant des niveaux argileux. Cet ensemble est particulièrement développé dans l'Est Parisien (Figure 3). Ces sables, d'une perméabilité variant entre 10^{-4} et 10^{-5} m/s sont intensément exploités par pompage.

Les étages plus anciens figurant sur le log lithostratigraphique (Figure 2) du département ne sont pas concernés par l'étude car ils ne sont pas en relation avec la nappe phréatique.

DEPARTEMENT DE LA SEINE-SAINT-DENIS Coupe Hydrogéologique

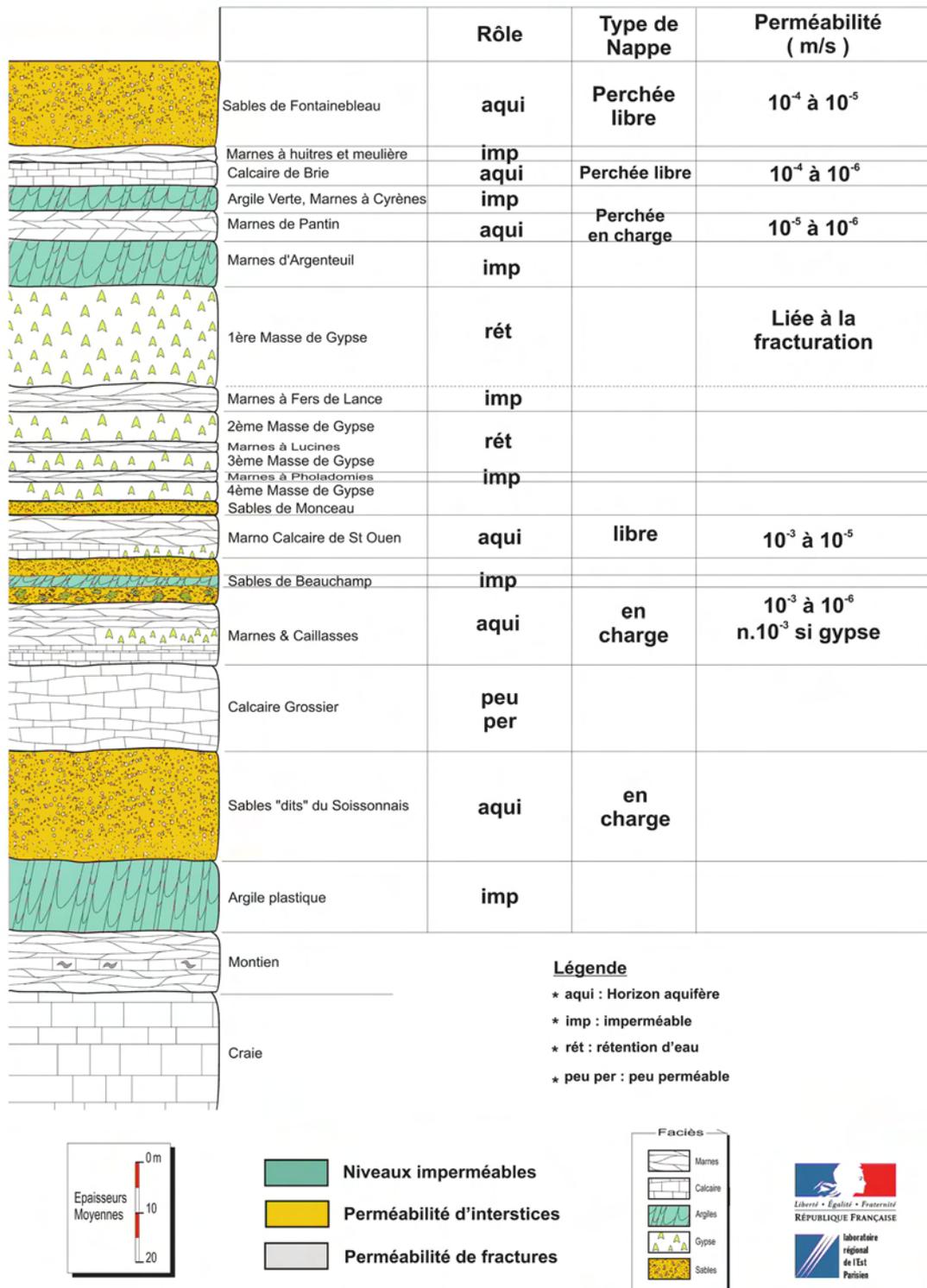


Figure 2 - Log lithologique et identification des aquifères sous le département 93

IV - AQUIFÈRES ET NAPPES

Les valeurs moyennes de perméabilité et la nature des aquifères sont indiquées sur la Figure 2. Deux grands types d'aquifères intéressent le département : ils se différencient par leur position morphologique.

IV.1 - Les nappes perchées des plateaux et des buttes témoin

Elles sont alimentées uniquement par la pluviométrie et leur niveau fluctue en fonction de cette dernière. On y trouve essentiellement la nappe du Travertin de Brie qui circule sur les Argiles Vertes. La percolation des eaux à travers ces dernières produit une nappe peu importante dans les Marnes de Pantin. Des « poches d'eau » sont repérées également au-dessus des Marnes du Gypse et dans les formations de versant. Le débit de ces eaux souterraines est faible mais leur présence affecte la stabilité des versants.

IV.2 - L'aquifère multicouche des plaines et des vallées

Les couches de l'Éocène ont un pendage très faible influencé par le synclinal de la Seine (fosse de Saint-Denis). Le réservoir de l'Éocène moyen, dont la puissance atteint 90 m et dont le mur est constitué par l'Argile plastique du Sparnacien (voir log litho-stratigraphique), comporte en fait plusieurs niveaux peu perméables qui le subdivisent et en font un aquifère multicouche :

- l'écran médian des Sables de Beauchamp formé d'argile sableuse (ép. 3 à 4 m) ;
- les Marnes infragypseuses qui comportent plusieurs niveaux décimétriques d'argiles plastiques.

Ces couches déterminent l'existence de sous-aquifères qui communiquent par drainance. La Figure 4 indique l'importance de ces niveaux imperméables avec de bas en haut :

- La **nappe de l'Yprésien** qui baigne les terrains de l'Argile Plastique au Calcaire Grossier.
- La **nappe du Lutétien** qui baigne essentiellement les Marnes et Caillasses. Le toit de cette nappe en charge est l'écran médian des Sables de Beauchamp.
- La **nappe du Saint-Ouen** : elle circule dans la partie supérieure des sables de Beauchamp, dans le calcaire de Saint-Ouen et les alluvions. On peut l'assimiler à une nappe générale soutenue par le réseau hydrographique (la Seine et la Marne) et les nappes profondes.
- La **nappe portée par les Marnes infragypseuses** : elle se différencie de la nappe du Saint-Ouen en cas d'alimentation parasite locale (canal) ou lorsque la couverture existant au-dessus de cet horizon est suffisante (au moins 5 m). Cette nappe est perchée dans les « hautes vallées alluviales » (à Livry-Gargan en particulier).

La carte de la Figure 3 indique l'extension du Marno-Calcaire de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp dans le Bassin de Paris (les sous-étages Marinésien et Auversien découpent le Bartonien inférieur), qui constituent ensemble un des réservoirs les plus importants du département. On constate la superficie considérable du territoire francilien au droit duquel ces horizons sont présents. La zone d'alimentation principale de l'aquifère correspond aux secteurs où ces horizons sont proches de l'affleurement, en particulier le Pays de France et le Parisis. L'importance régionale de cet aquifère lui confère une forte inertie et en réduit les fluctuations saisonnières.

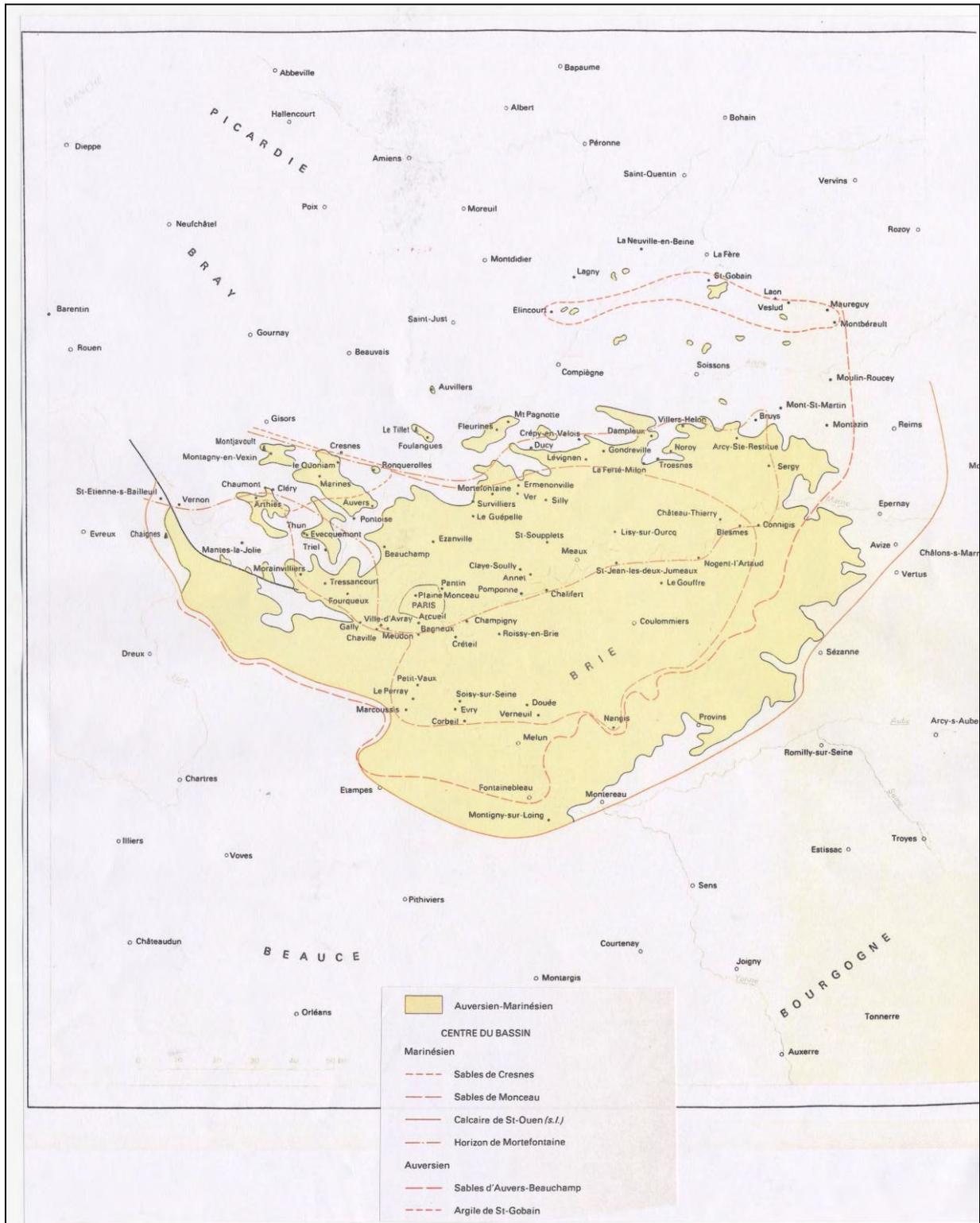


Figure 3. Extension régionale des horizons de l'Auversien-Marinésien (BRGM).

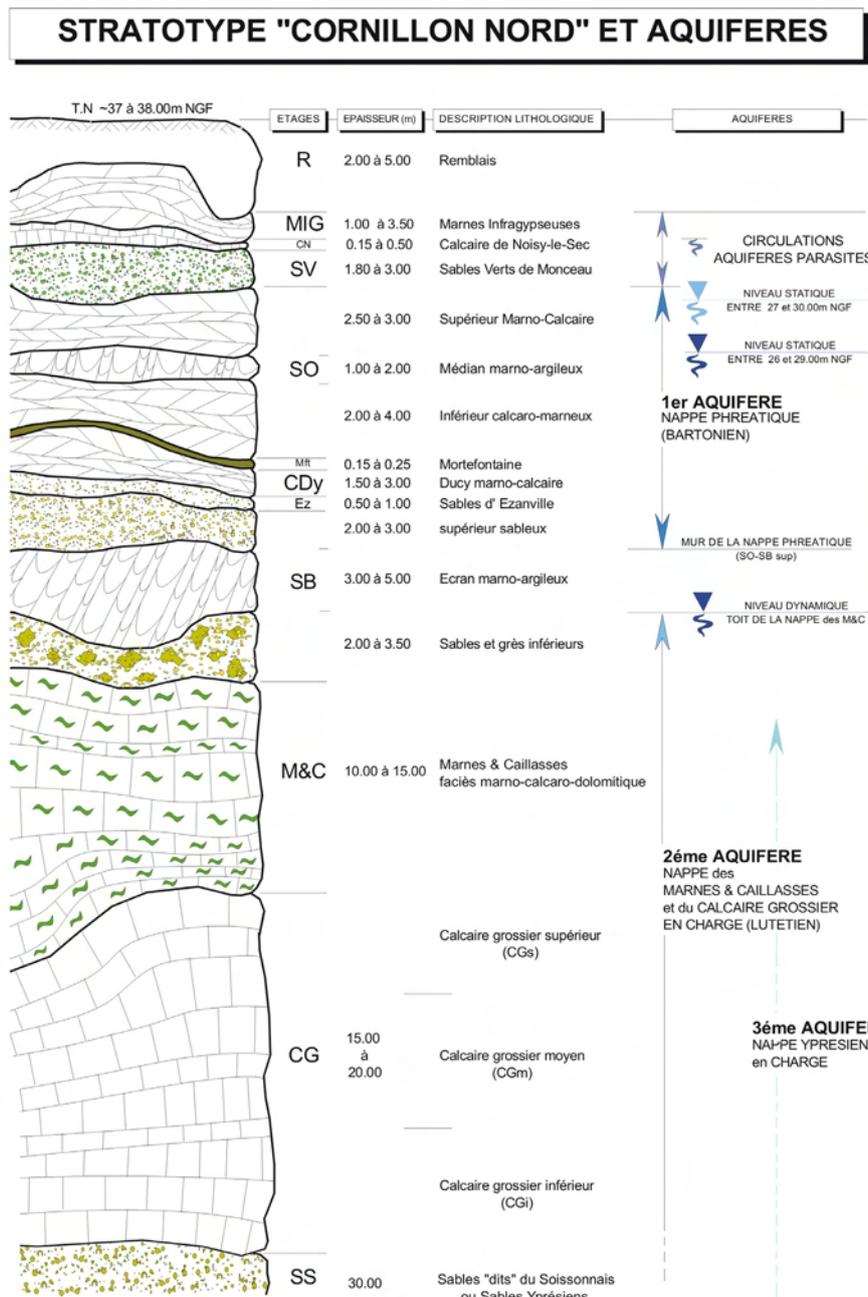


Figure 4. Log lithologique et hydrogéologique sur le site Cornillon nord. Schéma issu des études effectuées pour la construction du Stade de France.

IV.3 - Sens d'écoulement des aquifères superficiels

Le sens des écoulements de la nappe générale (Saint-Ouen, Alluvions) est nettement identifié. La Figure 2 indique les écoulements des aquifères superficiels d'après la carte piézométrique à 1/25 000. Le réseau hydrographique principal joue son rôle de drainage. La limite de bassin-versant entre la Plaine de France et la vallée de la Marne est située au col topographique entre le plateau d'Avron et le massif de l'Aulnaye (communes de Villemomble et Rosny-sous-Bois). L'absence de données sous ces plateaux ne permet pas de tracer précisément la limite. La nappe phréatique des plateaux (nappe du Travertin de Brie) semble s'écouler selon des règles plus complexes comme en témoigne la carte isopièze dressée pour le quartier Saint-Antoine à Montreuil. On retiendra le principe que cette nappe s'écoule depuis les lignes de crête et alimente les nappes des plaines en s'écoulant dans les versants.

V - Cartographie piézométrique de la nappe phréatique

La difficulté principale, pour établir une cartographie utilisable, réside dans l'absence de piézomètres pérennes. Seuls des relevés synchrones permettent de dresser avec rigueur une cartographie isopiézométrique. Cette condition n'a pas pu être, en général, respectée. Les isopièzes correspondent à des mesures de niveaux d'eau effectuées en période normale, c'est-à-dire en dehors des périodes de pluviométrie anormale et des périodes de crue.

Les deux aquifères ont été cartographiés, tout ou partie : la nappe perchée des plateaux et la nappe phréatique des plaines et vallées. Malgré l'existence de données ponctuelles, il ne semble pas pertinent d'utiliser l'avis d'expert pour tracer les isopièzes sur l'ensemble des plateaux. On ne s'intéresse ici qu'à la seconde nappe.

Nous disposons de deux synthèses cartographiques concernant le bassin-versant de la Seine :

- carte isopiézométrique issue du mémoire d'ingénieur CNAM d'Alain Hirschauer ; cette carte, qui concerne la partie est de la Plaine de France a été établie en 1991 à partir de relevés asynchrones (200 piézomètres ont été utilisés, échelle 1/25 000°, équidistance des isopièzes : 2 m) ;
- carte isopiézométrique établie pour le compte de la SEM Plaine Développement (1997). Cette carte intéresse la Plaine Saint-Denis et les communes situées à l'amont (Stains, Drancy, Bobigny). Elle a été dressée à l'aide de relevés synchrones selon une équidistance d'un mètre ; c'est le document le plus fiable issu de nos archives.

Pour les autres secteurs, des relevés ponctuels ont été pris en compte. Cependant, en l'absence de données, certaines zones n'ont pu être cartographiées. Une équidistance des isopièzes de 2 m a été choisie en raison de la disparité des données et du maillage du réseau des piézomètres. L'assemblage a été effectué selon un « avis d'expert » basé sur deux postulats :

- l'écoulement s'effectue régulièrement en direction de la Seine ou de la Marne ;
- les talwegs engendrés par les rus drainent également la nappe.

On observe sur cette carte que l'écoulement s'effectue selon un gradient de l'ordre de 2 à 3 m/km, proche de celui du terrain naturel, en direction des cours d'eau dont le niveau est en partie artificiel car régulé par les écluses et les bassins amont Seine et Aube.

VI - Fluctuations piézométriques

Elles sont de deux types : naturelles (pluviométrie, crue des cours d'eau) ou artificielles (pompages industriels et agricoles, pompages d'exhaure de sous-sols).

VI.1 - Fluctuations naturelles

VI.1.1 - Les précipitations

Les précipitations annuelles moyennes (Météo France, Le Bourget, 1949-1994) sont relativement faibles (610 mm). Les pluviographes exploités par la DEA (CG 93) fournissent des valeurs sensiblement plus fortes (664 mm en moyenne). Les valeurs annuelles subissent des variations importantes : sur la période 1977-2003, la moyenne est de 696 mm pour un maximum de 952 mm en 2001 et un minimum de 498 mm en 1996.

La période la plus humide est l'été avec une pointe de 60 mm en août. Les valeurs journalières maximales sont observées en été (hauteur maximale : 56 mm en août 1947). Ces valeurs paraissent également sous-estimées (des pluies de 80 mm ont été localement enregistrées par la DEA). Les nombres moyens mensuels de jours avec précipitations varient peu selon les saisons (11 à 15 par mois).

Les données brutes (Figure 5) sont insuffisantes pour évaluer l'impact de la pluviométrie sur l'alimentation des nappes. Ce sont les pluies de faible intensité qui bénéficient le plus aux aquifères. Le BRGM estime que l'infiltration annuelle représente entre 80 et 120 mm en Île-de-France.

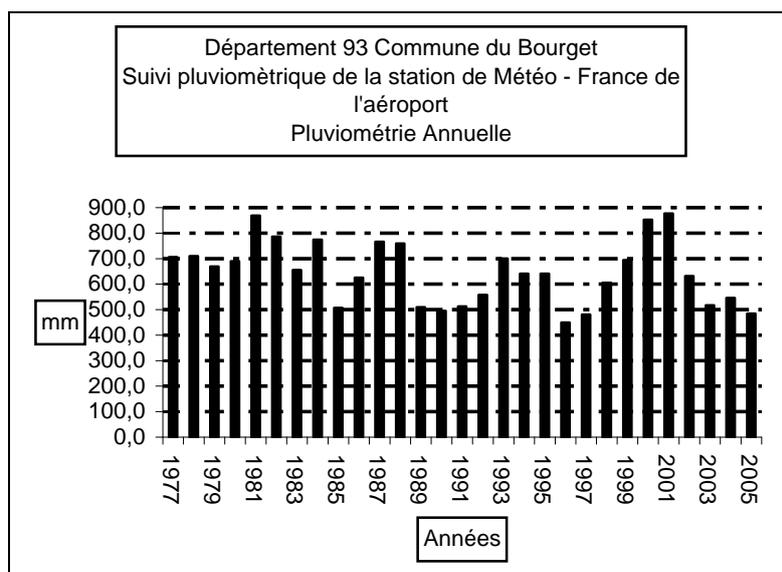


Figure 5 - Pluviométrie (Histogramme sur la période 1977-2005)
Station climatologique Météo-France de l'aéroport du Bourget

Le cumul de périodes excédentaires agit aussi sur le niveau des nappes. C'est ainsi que les années 2000 et 2001 excédentaires de 50 % environ par rapport à la moyenne ont permis d'enregistrer des niveaux d'eau jamais atteints dans les chroniques. À Aubervilliers, le niveau de la nappe du Marno-Calcaire de Saint-Ouen s'est élevé de 1,5 m durant cette période singulière (Figure 6).

Du point de vue de l'alimentation des nappes par les précipitations, la réactivité de l'aquifère est en raison inverse de sa porosité efficace. Il convient de distinguer deux types d'aquifères. Les nappes perchées, alimentées uniquement par la pluviométrie, et dont la porosité efficace est faible : ce type d'aquifère est très réactif et ses fluctuations sont directement liées aux précipitations. C'est le cas de la nappe du Travertin-de-Brie qui circule sur le plateau de Montreuil.

La nappe générale pour laquelle deux zones sont à différencier :

- une zone large de 500 m contiguë à la Seine ou à la Marne qui sera influencée par les crues de ces dernières ;
- les zones non influencées par les crues et dont le niveau d'eau sera lié à la pluviométrie régionale ; c'est ainsi que l'aquifère régional du Marno-Calcaire de Saint-Ouen sera doté d'une forte inertie liée à l'impluvium de dimension régionale.

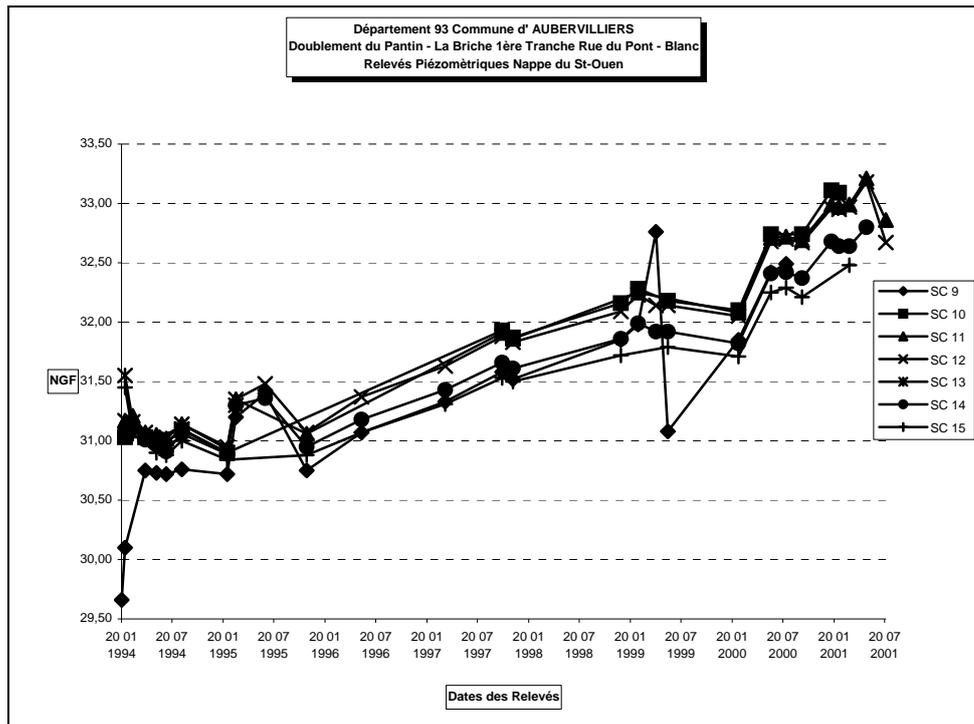


Figure 6 - Élévation du niveau piézométrique de la nappe du Saint-Ouen sous la commune d'Aubervilliers

La figure 7 concerne cette même nappe du Saint-Ouen dont l'aquifère est doté d'une forte porosité. Comme à Aubervilliers sur la même période, une remontée de 1,5 m est enregistrée mais on constate un décalage de 2 à 3 semaines entre l'événement et son effet.

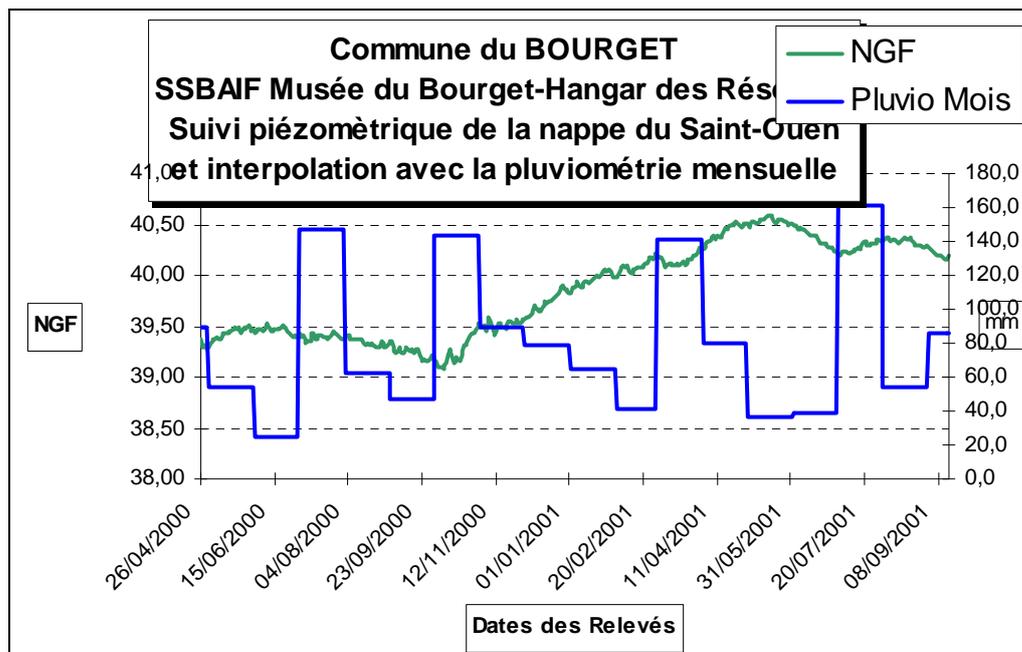


Figure 7 - Suivi piézométrique de la nappe du Saint-Ouen, commune du Bourget

VI.1.2 - Les cours d'eau

La Marne et la Seine font l'objet d'une régulation nécessaire pour permettre le transport fluvial, limiter les crues et garantir l'approvisionnement en eau de l'Ile-de-France. D'importants aménagements ont été réalisés depuis près de deux siècles pour parvenir à ces objectifs. Par exemple sur la Seine, la construction de barrages et d'écluses (le nombre d'écluses dans la traversée de Paris et de sa banlieue ; ce chiffre a été ramené à trois pour faciliter la navigation) a permis d'améliorer graduellement le tirant d'eau :

Année	1838	1859	1880	2007
Tirant d'eau (en m)	1,60	2	3,20	4,50

La Seine-Saint-Denis est intéressée par deux biefs :

En Seine, c'est le bief de Bougival qui fixe la retenue normale à 23,22 Lallemand (soit 23,50 NGF) ;

Pour la **Marne**, ce sont ceux de Noisiel (38,31) à l'amont et de Joinville (33,70) qui règnent sur la rivière, non navigable sur ce tronçon. Le canal de Chelles correspond au bief de Neuilly-sur-Marne calé à 37,77 Lallemand (38,10 NGF environ).

À partir des années 1960 la mise en service de bassins réservoirs situés sur les bassins versants de la Seine, de la Marne et de l'Yonne (700 millions de m³) a nettement amélioré la régulation de ces deux cours d'eau majeurs pour l'Île-de-France. Malgré ces aménagements, c'est toujours la crue de 1910 qui figure dans les documents d'urbanisme :

- pour la Seine : Pont de Saint-Ouen (29,80 NGF) et Pont d'Épinay (29,30 NGF) ;
- pour la Marne : Pont de Neuilly (40,30 NGF).

En période normale, ces cours d'eau drainent la nappe générale. Le sens d'écoulement de cette dernière pourra s'inverser en période de crue, ce qui entraînera une remontée du niveau statique de la nappe. L'importance de cette « onde de crue » sera liée analytiquement à plusieurs paramètres :

- l'amplitude et la durée de la crue qui sera assimilée à une sinusoïde dont la hauteur de la crue sera l'amplitude et sa durée la demie période. Les crues brèves et de fortes amplitudes auront peu d'effet sur la nappe contrairement à leur impact sur les inondations directes ;
- la transmissivité T de l'aquifère ;
- la distance par rapport au cours d'eau.

Cette approche est valable pour un aquifère alluvial tel que celui de la Marne ; c'est ainsi que durant l'hiver 1988-1989, une crue de la Marne a pu être suivie (partiellement à l'aide de limnigraphes numériques) sur le site du projet du bassin de la Pointe de Gournay. Cette crue de faible amplitude (2,26 m), d'une durée d'un mois environ a entraîné très rapidement une forte remontée du niveau statique de la nappe (amortissement de 37 % à 90 m de la rivière selon un déphasage de 3 jours). Les différents piézomètres installés sur le site ont permis d'estimer que le rayon d'action de la crue avait été de 700 m environ. Ces mesures sont en concordance avec les résultats de l'essai de pompage réalisé sur le site qui indiquait une très forte transmissivité des Alluvions Anciennes ($T = 2.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$).

L'incidence des crues de la Seine semble être très différente dans les secteurs de Saint-Denis et de Saint-Ouen en raison de l'absence d'alluvions. La transmissivité du Marno-Calcaire de Saint-Ouen situé au niveau du fleuve doit être beaucoup plus faible que celle des alluvions de

la Marne. Nous n'avons pas eu connaissance d'inondation de sous-sols dans ce secteur qui aurait pu être consécutive à une crue de la Seine.

VI.2- Fluctuations artificielles

La nappe générale a été utilisée essentiellement pour des besoins industriels et agricoles (maraîchage) et n'est pas employée pour la consommation humaine. Les puits se trouvent dans le secteur industriel de la Plaine Saint-Denis majoritairement, mais aussi dans la zone de Bobigny (pompages « maraîchers »).

Le très grand nombre de pompages industriels, surtout au nord-ouest du département, a fortement perturbé durant un siècle le niveau statique des nappes de la Plaine de France. Au droit des sites où subsistent des pompages industriels, la différence de niveau statique des aquifères peut être importante. Des pompages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) sont également exploités (partie nord-est du département). On peut distinguer deux époques :

VI.2.1 - La période 1970-1990

En 1971, 40 millions de m³ étaient pompés pour des besoins industriels sur le territoire du département. L'abandon des différentes activités a conduit depuis à l'arrêt progressif des pompages industriels : en 1980, moins de 10 millions de m³ étaient prélevés dans les nappes. Sur la même période, dans Paris intra-muros, les prélèvements passaient de 15 à 5 millions de m³. Ces pompages étaient concentrés sur la rive droite de la Seine qui appartient au même bassin-versant que celui de la Plaine de France.

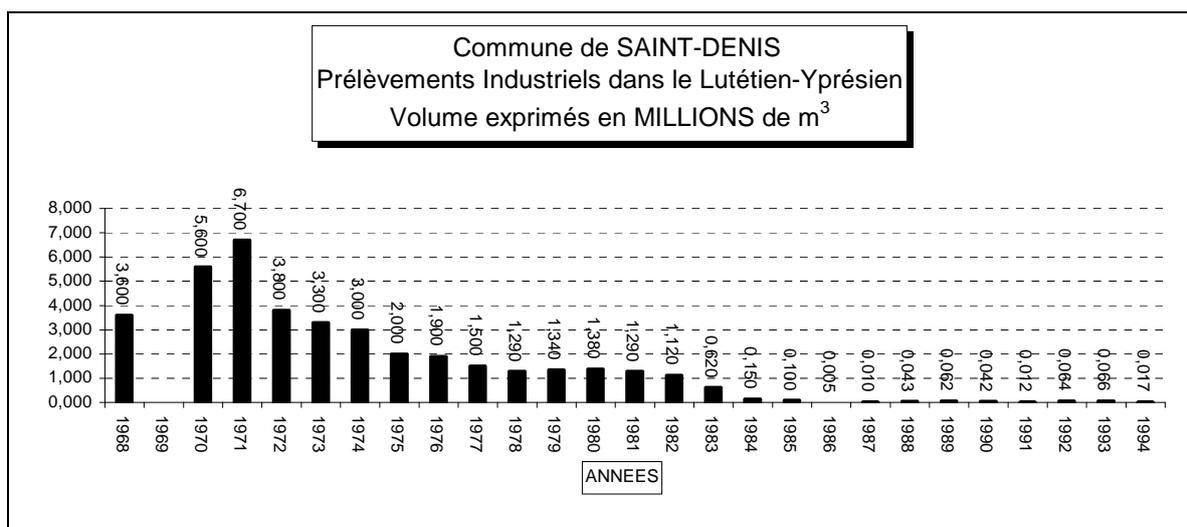


Figure 8 - Évolution des pompages industriels sur la commune de Saint-Denis

Les puits intéressaient les trois nappes précitées, avec selon le cas un crépinage spécifique à chaque aquifère. L'exploitation de ces puits durant plusieurs décennies a profondément déprimé la nappe superficielle et leur abandon graduel s'est traduit par une remontée du niveau statique sur la durée d'une décennie.

Les graphes piézométriques (Figure 99) du secteur de Bobigny, secteur mi-industriel, mi-maraîcher, sont caractéristiques en dépit de longues périodes durant lesquelles les relevés manuels n'ont pas été effectués :

- de 1973 à 1985, remontée spectaculaire de la nappe (5 m !) due à l'abandon des activités industrielles et maraîchères ;
- important abaissement (3,5 m) lié aux périodes sèches de 1993 ;
- remontée sensible et atteinte d'un niveau historique en 2001 due à la pluviométrie vraisemblablement centennale de 2000-2001.

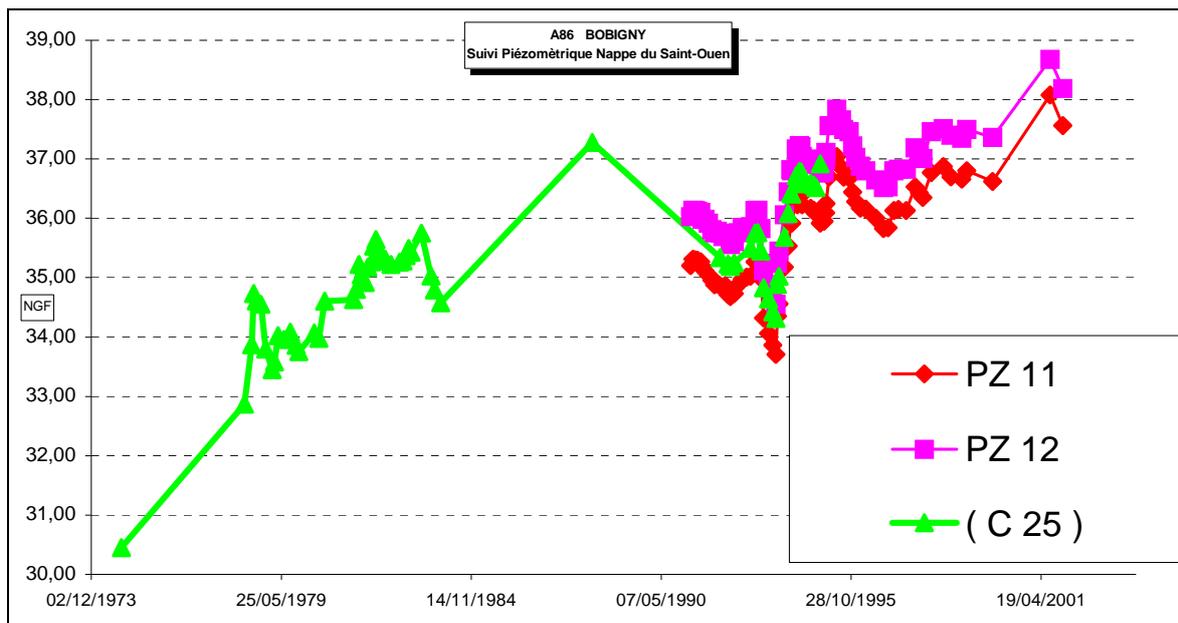


Figure 9 - Fluctuations de la nappe phréatique à Bobigny (1972- 2001)

On mesure ici l'intérêt des relevés automatiques pour apprécier finement les relations nappes/pluviométrie. Régionalement, l'arrêt des pompages s'est traduit par une remontée très sensible du niveau statique de la nappe phréatique de la Plaine de France, comme en témoignent les cartes isopièzes de 1970 (BRGM) et de 1997 (LREP). Eu égard aux données de pompage, on peut penser que l'essentiel de la remontée de la nappe phréatique dans ce secteur était achevé vers 1985.

VI.2.2 - La période contemporaine

VI.2.2.1 - Les pompages de ressource

En ce qui concerne les pompages industriels, les données de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie permettent d'estimer les volumes prélevés chaque année (en m³).

Année	2001	2002	2003	2004	2005
Volume pompé (en m ³)	4 158 000	4 335 000	4 118 000	3 782 000	3 806 000

On observe que les pompages industriels du début de ce siècle correspondent au 1/10 des prélèvements de 1971 (40 millions de m³ étaient prélevés sur les nappes en 1971) et à peine la moitié de ceux enregistrés en 1980. Après l'arrêt des activités centrées sur la Plaine-Saint-Denis, la ponction sur la nappe se réduisait à 4 millions de m³ en 1989, volume qui se maintient jusqu'à nos jours mais intéresse surtout le Bas Pays de Romainville et Bobigny.

Plus de la moitié est actuellement consommée par l'usine pharmaceutique AVENTIS basée à Romainville (2 070 000 m³) dont les activités ne sont pas pérennes. Un autre industriel, AIR LIQUIDE à Bobigny, est également un gros consommateur d'eau de nappe (486 000 m³). Si l'on ajoute à ces entreprises les volumes prélevés par PLACO (Vaujours) et par CITROËN (Aulnay) on retrouve près de 90 % du volume pompé par les industriels de la Seine-Saint-Denis. Toutefois on ne connaît pas précisément les aquifères captés, Lutétien et/ou Yprésien.

Le prélèvement pour l'eau potable est logiquement plus stable dans le temps :

Année	2001	2002	2003	2004	2005
Volume pompé (en m ³)	4 768 000	5 686 525	5 190 719	4 794 098	5 386 983

Les forages sont concentrés sur trois communes, dans la partie nord-est du département. Le Blanc-Mesnil avec plus de 3 millions de m³ pompés en 2005 est la commune dont la production est la plus élevée. Elle est aussi une des rares communes qui assure sa propre production et qui n'est pas adhérente au SEDIF. Notons que ces différents pompages ne concernent ni les plateaux ou les buttes témoin, ni la vallée de la Marne.

Tous ces forages exploitent les Sables de l'Yprésien ; la charge d'eau de cet aquifère est importante (près de 100 m) ce qui permet d'avoir des forages très productifs (300 m³/h).

VI.2.2.2 - Les pompages d'exhaure

Bon nombre d'ouvrages enterrés nécessitent des pompages permanents pour les conserver hors d'eau. Ils ne sont pas répertoriés à l'Agence de l'Eau. Nous ne pouvons citer que les ouvrages publics pour lesquels le LREP a réalisé des études et des suivis de travaux. Il ne s'agit que d'un ordre de grandeur car les services exploitants ne connaissent pas précisément le volume d'eau pompé dans les ouvrages dont ils ont la charge :

- la DEA pompe environ 100 m³/h pour assurer l'exhaure de ses bassins soit 876 000 m³/an ;
- la DDE 93 dispose de stations de pompage permanents qui permettent de placer hors d'eau l'A86 à Bobigny (débit d'au moins 50 m³/h, soit 438 000 m³/an) ;
- les valeurs de l'exhaure des ouvrages privés et communaux ne sont pas connues : un ordre de grandeur équivalent à la somme des volumes prélevés par la DEA et la DDE - 1,5 million de m³ - paraît vraisemblable.

Le débit d'exhaure de ces ouvrages qui sont concernés surtout par la partie supérieure de la nappe phréatique, peut fortement varier en fonction de son niveau.

VII - ÉVOLUTION FUTURE DU NIVEAU DES NAPPES PHREATIQUES

Une importante superficie du département ne peut être affectée que par des phénomènes naturels (pluviométrie pour les plateaux et crue dans les vallées).

Les plateaux et les buttes

Il s'agit du massif de l'Aulnaye, des plateaux de Montreuil et de Noisy-le-Grand. À ce jour, nous n'avons pas de données précises sur les variations du niveau statique de la nappe qui circule dans le Travertin-de-Brie, excepté dans le secteur de Montreuil dit des « Murs à Pêches ». Par rapport à la seule cartographie qui a pu être établie, une élévation de l'ordre de 2 m est envisageable à l'avenir.

La vallée de la Marne

Dans ce secteur, situé au sud du département, ce sont surtout les crues de la rivière qui agissent sur le niveau de la nappe alluviale. L'événement - bref - de l'onde de crue n'a pu être enregistré que sur le site de la Pointe de Gournay (Neuilly-sur-Marne).

La Plaine de France

C'est le secteur sur lequel les données sont les plus abondantes et pour lequel il existe des données de référence historique : la carte hydrologique de M. Delesse. Cette carte a été établie en 1862 sur le département de la Seine, à la demande du Baron Haussmann, alors Préfet de ce département. Elle a été réalisée à l'aide de relevés effectués dans des puits maraîchers, très nombreux à cette époque.

VII.1 - Une carte d'isodifférence

Nous avons établi une carte d'isodifférence du niveau statique de la nappe phréatique entre les données de 1862 et les données actuelles (Figure 1 : équidistance des courbes : 2 m). Si l'on considère que le niveau d'eau de Delesse correspond au niveau maximal que la nappe phréatique puisse atteindre, les valeurs indiquées sur la carte seront négatives dans le cas où le niveau actuel est inférieur à celui de 1862 ou positif dans le cas contraire.

Pour quelques rares secteurs, le niveau actuel est supérieur à celui de 1862 :

- la zone proche de la Seine : ceci s'explique par le fait qu'en 1862, le niveau du fleuve était plus bas qu'actuellement ;
- la commune de Blanc-Mesnil : aucune explication ne peut éclairer ce constat sinon que cette commune est située à la limite de la carte de Delesse.

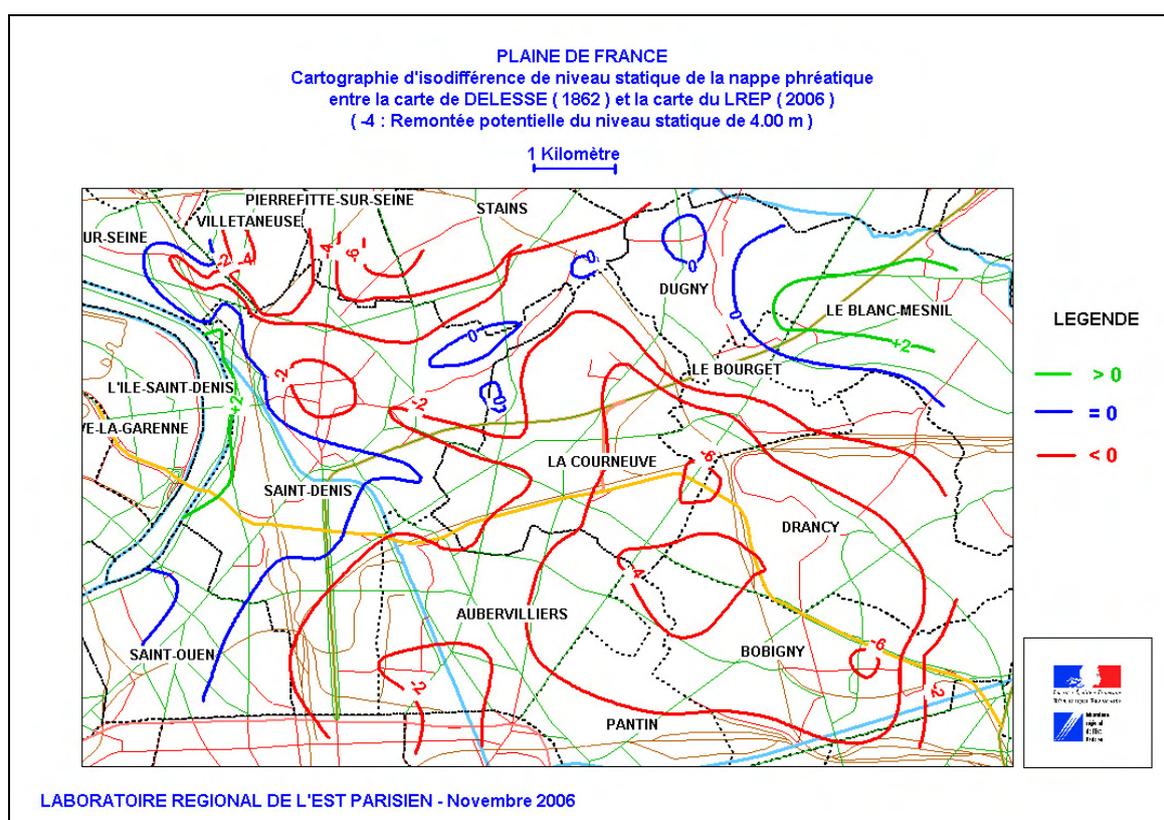


Figure 10 - Carte d'isodifférence de la nappe phréatique entre 1862 et 2006

La zone est de La Courneuve et d'Aubervilliers et la zone située à l'est de ces communes (Le Bourget, Drancy, Bobigny et Pantin) se trouvent à l'intérieur de la courbe - 4 m, avec des îlots à - 6 m. Ce phénomène de dépression paraît lié à la présence d'importants pompages à Bobigny et surtout à Romainville (puits situés aux limites de Pantin).

Sur les versants de la Butte Pinson (Villetaneuse, Pierrefitte, Stains, Épinay), des courbes à - 4 m et - 6 m sont à signaler. Or, il n'y a jamais eu de pompages intensifs sur ces dernières communes. Le gradient hydraulique de la carte Delesse étant très élevé, nettement supérieur à celui observé dans la Plaine de France, nous pensons que la carte Delesse intéresse en réalité dans ce secteur la nappe qui s'écoule dans les Masses et Marnes de Gypse sur les marnes. À l'occasion de plusieurs études effectuées dans cette zone, nous avons pu constater une nette différence de niveau statique entre la nappe phréatique et celle du Marno-Calcaire de Saint-

Ouen cartographiée sur le reste du document. En conséquence nous pensons que ce secteur n'est pas soumis à un risque particulier de remontée de nappe.

Les secteurs dans lesquels les pompages AEP sont les plus développés, situés en dehors du département de la Seine n'avaient pas été cartographiés par Delesse. Cependant, nous y avons effectué de nombreuses études dès l'origine du LREP et sans effectuer une étude exhaustive des données, nous pouvons indiquer que le niveau de la nappe phréatique a peu évolué depuis une trentaine d'années si l'on excepte les fluctuations naturelles liées aux pluviométries extrêmes. Il est possible d'expliquer ce phénomène par le fait qu'une grande rigueur est employée dans l'équipement des puits. Il est en effet essentiel, pour les exploitants, de bien séparer les eaux qui circulent dans les Sables de l'Yprésien des eaux souterraines de qualité moyenne voire médiocre de la nappe phréatique. Les pompages d'AEP, pérennes, sauf accidents pouvant affecter la nappe de l'Yprésien, semblent donc n'avoir aucune incidence sur la nappe phréatique.

En conclusion, on peut penser que ce sont les communes de Drancy, Le Bourget, Bobigny, Pantin, Romainville (Bas Pays) et les parties est d'Aubervilliers et de La Courneuve qui seraient sensibles à une remontée potentielle du niveau de la nappe phréatique en raison de l'abandon prochain de pompages industriels.

VII.2 - Insuffisance de l'instrumentation pour le suivi

De nombreux piézomètres actifs ont été collationnés et classés par commune et aquifères. Près de 300 intéressent la nappe phréatique des plaines et des vallées alors que leur nombre est infime sur les plateaux.

En ce qui concerne la nappe phréatique des Plaines et Vallées :

- nous pensons qu'une fréquence d'un piézomètre pour 2 km² est acceptable pour définir une carte isopiézométrique satisfaisante ;
- certaines communes sont peu pourvues en piézomètres actifs crépinés dans la nappe phréatique ;
- pour deux communes situées à l'interface entre la Plaine de France et la Vallée de la Marne, Rosny-sous-Bois et Villemomble, il n'a pas été possible de tracer de courbes isopièzes par absence de données.

En ce qui concerne la nappe perchée des Plateaux :

- nous ne disposons d'aucune piézométrie sur les communes des Lilas, de Romainville, de Bagnolet et sur la partie Ouest de Montreuil ;
- la nappe phréatique du Plateau d'Avron est quasi inexistante ;
- sur le massif de l'Aulnaye, la mise en place de piézomètres serait nécessaire pour toutes les communes ainsi qu'à Noisy-le-Grand pour laquelle nous n'avons aucune donnée contemporaine ;
- lorsque les nappes sont au repos (absence de pompage), le niveau d'eau observé dans ces piézomètres est très proche de celui de la nappe phréatique.

VIII - CARTE D'INFILTRABILITÉ

Le concept que nous appellerons « injection et infiltration dirigée » ne repose pas sur une infiltration immédiate, mais sur la mise en œuvre d'un volume de rétention qui correspond à une pluie de 36 mm. Il pourra s'agir de noues, de fossés, d'éléments circulaires en béton, etc. Ce principe ne nécessite donc pas la présence d'une perméabilité importante mais demande cependant la réalisation d'essais préalables.

L'étude s'est appuyée sur la carte géologique dressée par le BRGM, affinée à l'aide des sondages issus de notre base de données ACCESSGEO. Cette carte, associée au faciès des

couches a permis de définir les zones pour lesquelles un ajout d'eau ponctuel peut engendrer des désordres à caractère géotechnique.

Il s'agit :

- de tous les horizons gypseux pour lesquels un lessivage d'eau non saturée en sulfates peut engendrer des cavités à court terme (quelques années) ;
- des versants qui, outre la présence de sols argileux instables, ont été largement entaillés par des carrières de gypse à ciel ouvert et souterraines ;
- des carrières souterraines qui sous minent les plateaux ; il s'agit essentiellement du plateau d'Avron.

VIII.1– Remarques préliminaires

Cette carte a donc été établie en tenant compte essentiellement du risque géotechnique que pourrait engendrer un afflux d'eau ponctuel :

accroissement de la pression interstitielle dans les argiles qui tapissent les versants et augmentation du risque de glissement et de résurgence incontrôlée à l'aval ;

présence de gypse : les eaux pluviales sont exemptes de sulfate et par conséquent, très agressives par rapport à ce minéral.

Rappelons que le gypse est soluble dans l'eau à raison de 2,2 g/l. Cette propriété est largement démontrée à l'occasion de fuites de réseaux qui, dans le cas de conduite d'eau en particulier, génèrent rapidement des cavités (échelle de temps : l'année).

Nous avons séparé deux familles d'ouvrages d'infiltration dont le comportement sera de nature physique différente. Par convention, ces deux familles sont :

- les **ouvrages d'infiltration** intéressent les terrains superficiels : puisards, noues, bassins d'infiltration employés pour infiltrer les eaux dans des sols non saturés. On notera que l'hydraulique des sols non saturés relève encore essentiellement de la recherche et que l'approche adoptée ici est uniquement qualitative. Par sécurité de tels ouvrages devront être distants d'au moins 5 m des bâtiments (l'entraînement de particules peut générer de faibles tassements ponctuels autour de l'ouvrage) ;
- les **ouvrages d'injection** : il s'agit de puits forés profonds descendus jusqu'aux sables de Beauchamp dans la Plaine de France ou jusqu'au substratum dans la vallée de la Marne. Ces ouvrages ponctuels dont la profondeur peut atteindre 10 à 20 m intéressent des horizons très perméables situés sous la nappe et par définition des sols saturés dont l'hydrodynamique est connue. Ces ouvrages sont intéressants en cas d'emprise foncière limitée.

VIII.2– Zonage proposé

Ce zonage ne tient pas compte de la présence de remblais dans lesquels l'infiltration est déconseillée, ce qui signifie que l'infiltration ne peut être mise en œuvre qu'en dessous de ceux-ci. À partir de la carte géologique affinée à l'aide de nos données de sondages, quatre zones ont été délimitées.

VIII.2.1 - Infiltration et injection proscrites

Il s'agit des zones de versant qui allient la présence :

- d'une couverture souvent argileuse ;
- des Masses et Marnes du Gypse ;
- voire de carrières souterraines et/ou à ciel ouvert.

Ces zones à risques sur le plan géotechnique n'accepteraient pas d'apports d'eau ponctuels.

Les carrières sont situées, pour l'essentiel, sur les versants hormis quelques exceptions (Plateau d'Avron) qui sous-cavent une partie du plateau. Leur cartographie a été réalisée soit à partir du périmètre R.-111-3, soit à partir des cartes d'aléas issues de plusieurs PPR en cours d'instruction : Livry-Gargan (IMSRN-n, mai 2005) et Le Raincy (IGC, novembre 2004).

D'autres zones sont à repérer dans la plaine de France : il s'agit des zones à présence de gypse superficiel et qui comportent, en profondeur, des niveaux gypseux profonds du Lutétien. En ce qui concerne ces derniers, on peut craindre la présence de fontis qui permettraient le cheminement des eaux en profondeur et favoriseraient la dissolution des bancs gypseux. Ce cas de figure est rencontré dans le secteur de Sevrans par exemple (PPR en cours d'instruction sur les communes de Sevrans, Villepinte et Tremblay-en-France – LREP, juillet 2002).

VIII.2.2 - Infiltration superficielle proscrite mais injection autorisée par puits forés dans les Alluvions Anciennes de la Marne et/ou dans le Marno-calcaire de Saint-Ouen

C'est le cas de la moyenne terrasse de la Marne au niveau de Montreuil qui se caractérise par la présence de colluvions argileuses superficielles qui reposent sur le marno-calcaire de Saint-Ouen ou les Alluvions anciennes de la Marne. Ce n'est sans doute pas l'unique site de cette catégorie mais seule une analyse géologique fine au niveau communal permettrait d'étendre ce zonage. L'île Saint-Denis et les terrains situés à proximité de la berge de la Seine rive droite, couronnés par une épaisse couche de remblais, sont dans cette catégorie.

VIII.2.3 - Infiltration autorisée dans les terrains superficiels et injection profonde proscrite

Deux principales configurations sont observées :

- les zones de plateaux couronnés par le Travertin de Brie (Montreuil, massif de l'Aulnay). Par sécurité, nous avons tenu compte d'une bande de reculement de 50 m par rapport à la ligne de contact Travertin/Argiles Vertes afin d'éviter les résurgences sur le versant. Sur ces sites, le marno-calcaire de Saint-Ouen est trop profond et de faciès peu connu (gypseux a priori) ;
- les plaines où le Marno-calcaire de Saint-Ouen est profond et gypseux : c'est le cas en particulier de Livry-Gargan et d'une partie de Pantin.

On notera également la partie amont du ru de Chantereine (à Coubron) qui, située en pied de versant, se caractérise par la présence de sables alluviaux mais noyés localement par une nappe sub-affleurante.

VIII.2.4 - Infiltration superficielle et injection profonde autorisées dans le marno-calcaire de Saint-Ouen et les Alluvions Anciennes de la Marne

Ces zones correspondent à des sites pour lesquels un apport d'eau ne présente pas de risque géotechnique (dissolution des gypses, glissement des argiles, résurgence). Ces secteurs intéressent le plateau du Pays de France, une partie de la Plaine de France et de la vallée de la Marne. Cette carte indique dans certains cas la présence groupée d'horizons aux faciès différents. C'est le cas du Bartonien supérieur (e6e) dans lequel sont groupés les Marnes à Pholadomies, la 4^e Masse de Gypse et les Sables de Monceau. Lorsque nos données étaient suffisantes pour apprécier le faciès de ces couches et en particulier, la 4^e Masse de Gypse qui localement peut être absente, nous avons estimé que l'infiltration superficielle était possible. Par contre, sur certains sites (Bobigny, Drancy par exemple) nos sondages sont insuffisants pour proposer une cartographie optimisée.

IX - CONCLUSIONS

L'hydrogéologie de la Seine-Saint-Denis est marquée par la présence d'une nappe perchée sur les plateaux et les buttes témoins qui circule dans le Travertin de Brie, alimentée uniquement par la pluviométrie, et par un aquifère multicouche régional dans la Plaine de France, le Pays de France et la Vallée de la Marne. Cet aquifère est libre dans les Alluvions et le Marno-Calcaire, captif dans la partie inférieure des Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses en raison de la présence d'un niveau d'argile sableuse situé dans la partie médiane des Sables de Beauchamp.

Un autre aquifère captif circule en profondeur dans les Sables de l'Yprésien, très épais dans le Département en raison de la structure « en cuvette » du bassin.

La forte productivité de ces aquifères a favorisé l'exploitation de pompages par puits forés surtout pour les besoins de l'Industrie. L'arrêt des pompages s'est traduit par une remontée spectaculaire de la nappe dans le secteur de la Plaine-Saint-Denis et ses abords.

À l'aide de documents graphiques existant au LREP, l'exploitation de données d'archives et des relevés ponctuels (DEA, LREP, ADP, SNCF, RATP et communes), la carte isopiézométrique des nappes phréatiques a pu être dressée sur une bonne partie du département. Il s'agit d'un « niveau d'eau moyen » correspondant à des périodes pluviométriques normales et non affectées par une crue des cours d'eau. Les nappes phréatiques des plaines et des vallées sont assez bien cartographiées mais il subsiste des zones mal renseignées. En revanche, nous ne disposons d'aucune donnée fiable sur le massif de l'Aulnaye et sur le Plateau de Montreuil où seul le quartier des « Murs à Pêches » est cartographié.

Une carte « isodifférence piézométrique » a été dressée en comparant la carte isopièze dressée par M. Delesse en 1862 et celle que nous avons établie en 2006.

Après analyse des différentes données, nous pensons que l'Est de La Courneuve et d'Aubervilliers, les communes du Bourget, de Bobigny, de Drancy, de Pantin et du Bas Pays de Romainville pourraient être affectées par une remontée de la nappe de l'ordre de 4 mètres en cas d'abandon total des pompages industriels. Par contre, les secteurs de Tremblay-en-France, d'Aulnay-sous-Bois et de Blanc-Mesnil, bien que fortement exploités par des pompages d'alimentation en eau potable, ne semblent pas être affectés par ces captages.

L'étude réalisée a permis d'évaluer la faisabilité géotechnique de l'injection et de l'infiltration dirigée des eaux pluviales dans les sols sur l'ensemble du département de la Seine-Saint-Denis. La cartographie proposée correspond à notre connaissance des sites qui peut s'améliorer et au contexte réglementaire qui évoluera en fonction de l'édition des PPR mouvements de terrain.

Pour poursuivre cette étude, il serait intéressant d'établir une carte au niveau d'une commune, qui permettrait d'affiner la répartition des différentes familles de sols et de répertorier les différentes expériences d'infiltration des eaux pluviales. Les communes de Tremblay-en-France et de Villepinte, très contrastées par rapport à notre cartographie paraissent intéressantes. De surcroît, les réserves foncières à aménager sont importantes et propices à l'expérimentation. ■

BIBLIOGRAPHIE

DELESSE M. – Carte hydrogéologique du département de la Seine (1862).

BERGER G. et **MARQUET** – Étude de l'évolution piézométrique des nappes d'eau souterraine à Paris et en proche banlieue (BRGM, 1983).

HIRSCHAUER A. – Les bassins de retenue de la Seine-Saint-Denis – Incidences de l'environnement géotechnique sur leur conception (Mémoire d'Ingénieur CNAM, 1991).

CAILLEUX J.-B. et **MAIRE J.-L.** – Zonage des remontées de la nappe phréatique en Seine-Saint-Denis – Étude historique entre 1862 et 1993 (LREP, 1993).

GOMICHOIN T. – Étude sur la remontée de la nappe phréatique dans le département de la Seine-Saint-Denis (Rapport de stage, Université de Nantes, 1999).

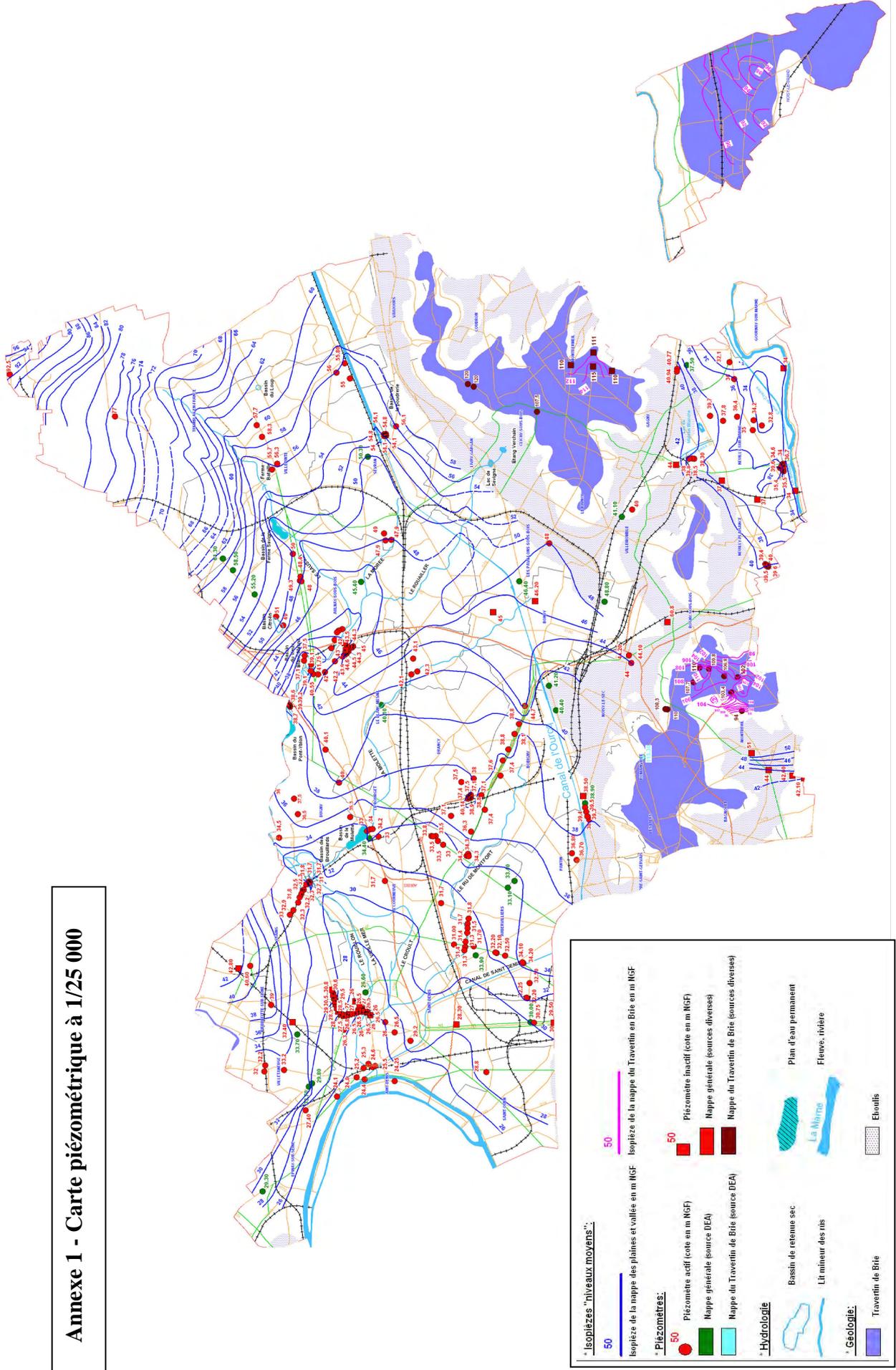
BERTOLUS I., FAUCHAS A. et **HIRSCHAUER A.** – Étude sur l'infiltrabilité des eaux pluviales dans le sol – Département de la Seine-Saint-Denis (LREP, 2005).

ANNEXES

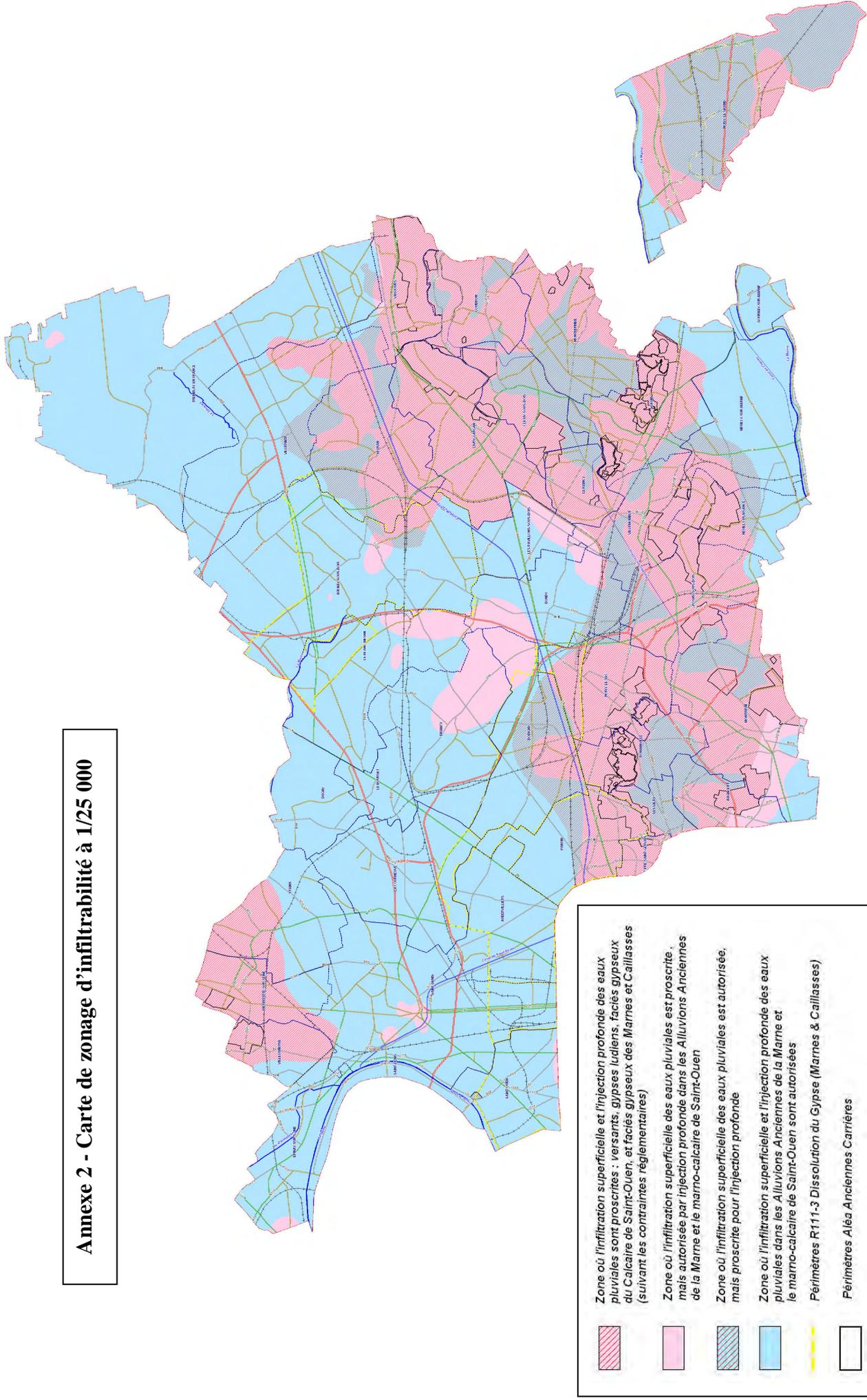
1 - Carte piézométrique à 1/25 000.

2 - Carte de zonage d'infiltrabilité à 1/25 000.

Annexe 1 - Carte piézométrique à 1/25 000



Annexe 2 - Carte de zonage d'infiltrabilité à 1/25 000



-  Zone où l'infiltration superficielle et l'injection profonde des eaux pluviales sont prosrites : versants, gypses ludiens, faciès gypseux du Calcaire de Saint-Ouen, et faciès gypseux des Marnes et Caillasses (suivant les contraintes réglementaires)
-  Zone où l'infiltration superficielle des eaux pluviales est prosrite, mais autorisée par injection profonde dans les Alluvions Anciennes de la Marne et le marno-calcaire de Saint-Ouen
-  Zone où l'infiltration superficielle des eaux pluviales est autorisée, mais prosrite pour l'injection profonde
-  Zone où l'infiltration superficielle et l'injection profonde des eaux pluviales dans les Alluvions Anciennes de la Marne et le marno-calcaire de Saint-Ouen sont autorisées
-  Périmètres R111-3 Dissolution du Gypse (Marnes & Caillasses)
-  Périmètres Aléa Anciennes Carrières

Impact des eaux souterraines sur les phénomènes de dissolution du gypse, application à la ville de Paris

Jean-François Vernoux⁽¹⁾, Anne-Marie Prunier Leparmentier⁽²⁾, Pierre Thierry⁽¹⁾, Céline Nowak⁽¹⁾, Émilie Vanoudheusden⁽¹⁾

⁽¹⁾ BRGM, BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - jf.vernoux@brgm.fr

⁽²⁾ Inspection Générale des Carrières - 1, place Denfert-Rochereau - 75014 Paris
anne-marie.leparmentier@paris.fr

Le territoire de la ville de Paris, fortement urbanisé, est susceptible d'être affecté par les risques naturels de dissolution du gypse, de gonflement des argiles et de boulanges des sables. Un programme de recherche et développement a été engagé par l'IGC et le BRGM portant sur la mise en œuvre, sur la commune de Paris, d'une méthodologie d'évaluation de la susceptibilité à l'apparition de désordres consécutifs à ces trois phénomènes. Les formations géologiques sensibles aux phénomènes de dissolution du gypse sont les formations du Ludien du Bartonien et du Lutétien. Le rôle des eaux souterraines vis-à-vis de la dissolution du gypse est différent selon les formations. Sur Paris, un arrêté inter-préfectoral prend en compte ce risque uniquement pour les formations antéludiennes, la dissolution ludienne étant traitée avec les carrières dans un texte réglementaire valant PPR. L'évaluation de l'aléa « dissolution du gypse » prend en compte trois composantes : la probabilité de présence de gypse, la probabilité de dissolution et la probabilité d'effondrement ou d'affaissement. La probabilité de présence de Gypse sera calculée à partir d'une relation prenant en compte l'épaisseur de la formation géologique contenant le gypse. La probabilité de dissolution sera calculée à partir du gradient hydraulique de la nappe.

I. INTRODUCTION

La surface du sol urbain est épisodiquement et localement sujette à des déformations verticales pouvant causer des désordres sur les bâtiments, les voiries et les réseaux. Les archives de l'Inspection Générale des Carrières (IGC) font état depuis 1977 de près de 600 accidents connus dans Paris liés au sous-sol.

Ces mouvements du sol, qui peuvent avoir un impact direct ou indirect sur les populations, résultent d'une modification plus ou moins rapide à partir d'un état initialement stable de certaines formations sensibles du sous-sol. Ce déséquilibre est généralement provoqué par des conditions naturelles ou anthropiques particulières conduisant à l'apparition de décompressions ou de vides remontant vers la surface. Sur le territoire de la Ville de Paris, outre les problèmes dus aux anciennes exploitations de matériaux (gypse et pierre à bâtir calcaire essentiellement) gérés par l'Inspection générale des Carrières, trois phénomènes liés aux caractéristiques du sous-sol parisien sont plus particulièrement susceptibles de provoquer des dommages importants au bâti et aux infrastructures ou d'occasionner des surcoûts significatifs lors des travaux d'aménagement. Il s'agit de (i) la dissolution du gypse, (ii) la boulanges des sables et (iii) le gonflement des argiles.

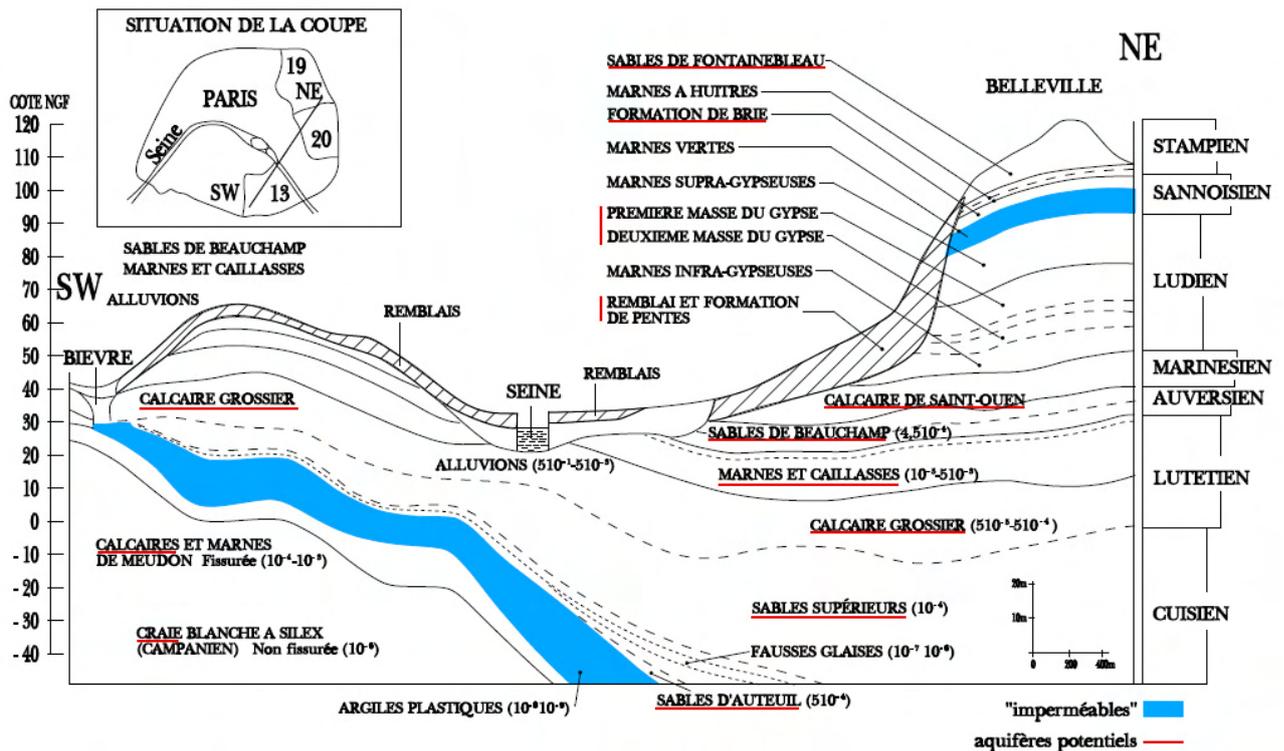
Un programme de recherche et développement partagé du BRGM et de l'IGC, financé par la ville de Paris et le BRGM, est actuellement en cours [1].

Il vise à développer et mettre en œuvre une méthodologie d'évaluation de la susceptibilité des sols à ces phénomènes et à la mettre en œuvre avec un modèle géologique 3D afin d'élaborer une carte de susceptibilité finalisée et directement exploitable pour chacun des trois phénomènes identifiés. Le présent papier ne concerne que les aspects liés à l'impact des eaux souterraines sur la dissolution du gypse. Il présente le contexte géologique (présence de formations à gypse) et hydrogéologique, la méthodologie mise en œuvre et les premiers résultats obtenus.

II. GYPSE ET NAPPES D'EAU SOUTERRAINES A PARIS

II.1 Formations géologiques

Le sous-sol de Paris est composé essentiellement de formations tertiaires reposant sur un substratum crayeux affleurant sous les alluvions dans l'extrême sud-ouest, de part de d'autre de la Seine (figure 1). Le modèle géologique développé dans le cadre de l'étude distingue 20 formations, 16 dans les niveaux stratigraphiques du Tertiaire (Stampien, Sannoisien, Ludien, Marinésien, Auversien, Lutétien et Cuisien) et 4 dans les formations superficielles (alluvions anciennes et modernes, éboulis, remblais).



Le gypse se retrouve présent dans les formations suivantes :

- le Ludien ;
- le Marno-calcaire de Saint-Ouen ;
- les Sables de Beauchamp ;
- les Marnes et Caillasses du Lutétien.

Le Ludien constitue la formation des « masses et marnes du gypse » encadrée par deux formations semi-perméables au toit (marnes supragypseuses) et au mur (marnes infragypseuses). C'est la formation qui a été le plus exploitée en carrière de gypse ; on la retrouve au nord de Paris.

Le Marno-calcaire de Saint-Ouen, présent essentiellement au nord de la Seine, comporte 3 formations : Le Calcaire de Saint-Ouen s.s., le calcaire de Mortefontaine et le Calcaire de Ducy. Le gypse se rencontre principalement dans ce dernier niveau en bancs continus susceptibles d'être à l'origine d'affaissements ou de fontis. Il peut également être présent au sommet de cette formation. Des travaux ont noté que quand l'épaisseur de la formation est inférieure à 9 m, la phase gypseuse est pratiquement absente et à l'inverse quand l'épaisseur de la formation est supérieure à 13 m, l'épaisseur de la phase gypseuse est toujours importante (supérieure à 4 m) et proportionnelle à l'épaisseur totale de la formation [3].

Les sables de Beauchamp sont également présents au nord de la Seine, mais on les retrouve également localement au sud (figure 2). Au niveau de cette formation, le gypse est présent mais de manière plus diffuse. Pour Soyer, le Gypse existe dans les sables de Beauchamp, à Paris, sous 2 formes (i) Gypse saccharoïde, (ii) Albâtre Gypseux [4]. Dans notre base de sondage, pour 1410 sondages ayant rencontré les Sables de Beauchamp, nous avons reconnu 206 passes dans 121 sondages différents où les descriptions mentionnent la présence de Gypse avec une épaisseur moyenne de 2,77 m et un écart-type de 2,66 m (figure 2).

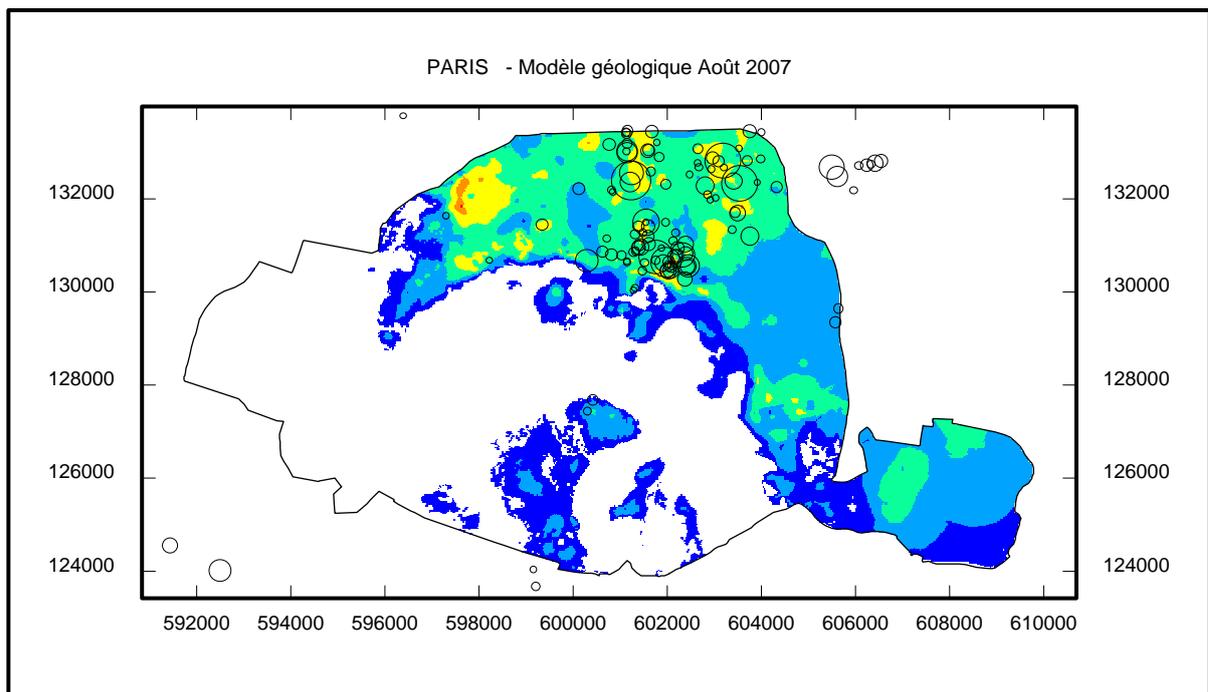


Figure 2 - Carte d'isoépaisseurs des sables de Beauchamp et localisation du gypse au niveau des sondages ayant traversé la formation

Les Marnes et Caillasses du Lutétien sont présentes sur les deux tiers de Paris, en particulier au nord de la Seine. Le gypse se présente suivant deux bancs principaux (présents ou non) : (i) en tête de formation, avec le plus fréquemment de 1 à 2 m d'épaisseur et (ii) à la base de la formation avec de 3 à 6 m d'épaisseur. Là encore l'épaisseur de ces niveaux de Gypse est directement proportionnelle à l'épaisseur de la formation [5].

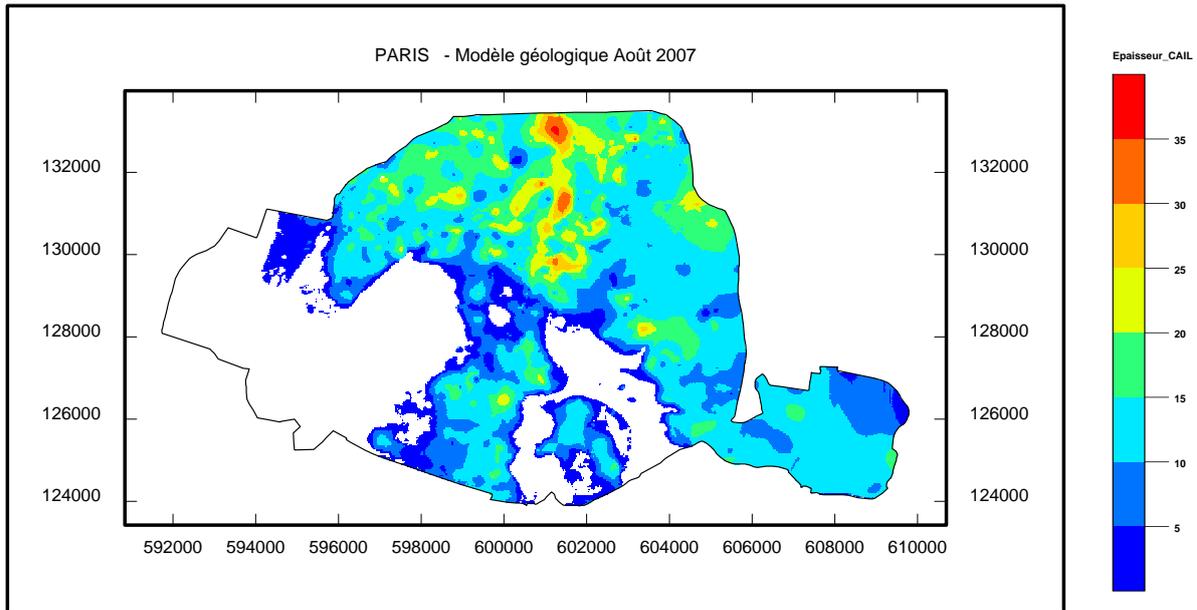


Figure 3 - Carte d'isoépaisseurs des Marnes et Caillasses

II.2 Hydrogéologie de Paris

Nombreuses des formations géologiques présentes sous Paris constituent des couches aquifères supportant des nappes d'eau souterraines. Dans la mesure où ces couches ne sont pas toujours séparées par des intercalaires étanches (seules l'argile plastique et les marnes vertes sont considérées comme très peu perméables), on a le plus souvent affaire à une nappe à l'intérieur d'un aquifère multicouches, considéré comme un ensemble d'aquifères plus ou moins individualisés [2] :

- l'aquifère de la craie dont la nappe est en relation avec celle des alluvions dans le XVI^e arrondissement et dans la boucle de la Seine ; ailleurs elle n'est pratiquement pas aquifère ;
- les aquifères du Lutétien et de l'Yprésien dont les nappes peuvent être en équilibre ou non. Un niveau gréseux présent à la base du Calcaire grossier sépare les deux nappes. La nappe yprésienne se trouve elle-même scindée en deux par les Fausses Glaises séparant les sables de Cuise ;
- l'aquifère de l'Éocène supérieur regroupe quatre formations susceptibles de contenir une nappe : les sables de Beauchamp, le marno-calcaire de Saint-Ouen, les sables verts et les marnes infragypseuses ;
- l'aquifère des alluvions

L'hydrogéologie de Paris, présentée ici très brièvement, s'avère extrêmement complexe. Par rapport au problème posé de dissolution du gypse, nous nous sommes attachés à déterminer quelles nappes sont susceptibles d'avoir un impact sur cette dissolution. Deux nappes ont été prises en compte : la nappe du Saint-Ouen/Beauchamp et la nappe du Lutétien. Les formations du Ludien, quant à elles, ne sont pas vraiment aquifères ; on observe seulement une nappe de coteau dans les remblais de carrière et les colluvions. La répartition des formations à gypse et des nappes susceptibles d'avoir un impact sur la dissolution est schématisée ci-dessous.

formations à gypse		formations aquifères	
	1 ^{ère} masse du gypse		nappe de coteau (remblais de carrière, colluvions)
	Marnes à fers de lance de gypse		
	2 ^{ème} masse du gypse		
	Marnes à Lucines à calcrête		
	3 ^{ème} masse du gypse		
	Marnes à Pholadomies Nodules gypseux		
	4 ^{ème} masse du gypse		
	Calcaire de Noisy-le-Sec et marnes à Paludines		
	Sables infragypseux		limite géographique
	Calcaires de Saint-Ouen et de Ducy		nappe du Saint-Ouen /
	Sables de Beauchamp		niveau argileux
	Marnes et caillasses		nappe du Lutétien (peut être en charge)
	Calcaire grossier		niveau gréseux
	Sables de Cuise		

III. MÉTHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA DISSOLUTION DU GYPSE

III.1 Types de désordres liés à la dissolution du gypse

Le sous-sol parisien présente ponctuellement des karsts (vides de dissolution) gypseux de dimension et de forme très variables. Ces karsts en grandissant peuvent lentement s'approcher de leur limite de stabilité, jusqu'à atteindre la rupture du toit. Dans certains cas de figure, une accélération des écoulements de la nappe liée à des travaux souterrains ou à des pompages peut suffire à provoquer l'effondrement des karsts, la reprise de dissolution ayant permis au vide d'atteindre sa taille critique. Suivant la taille et la profondeur des karsts, ainsi que la nature du terrain de couverture, cet effondrement générera des désordres en surface plus ou moins importants, le stade ultime étant l'apparition de fontis sous un bâtiment ou au droit d'une voirie (figure 1).

De la même façon que le rabattement de nappe, des travaux souterrains approchant ou recoupant des karsts gypseux (figure 4) proches de l'état critique de stabilité peuvent provoquer un effondrement de ces cavités (par vibration, par modification de l'état de contrainte, ou par déstructuration des parois de la cavité). Ce fut par exemple le cas de la rue Papillon en 1995, où les travaux du chantier ÉOLE ont provoqué l'effondrement d'un karst et l'apparition d'un fontis au rez-de-chaussée d'un immeuble d'habitation. Ce type d'effondrement peut provoquer d'énormes dégâts sur des constructions.

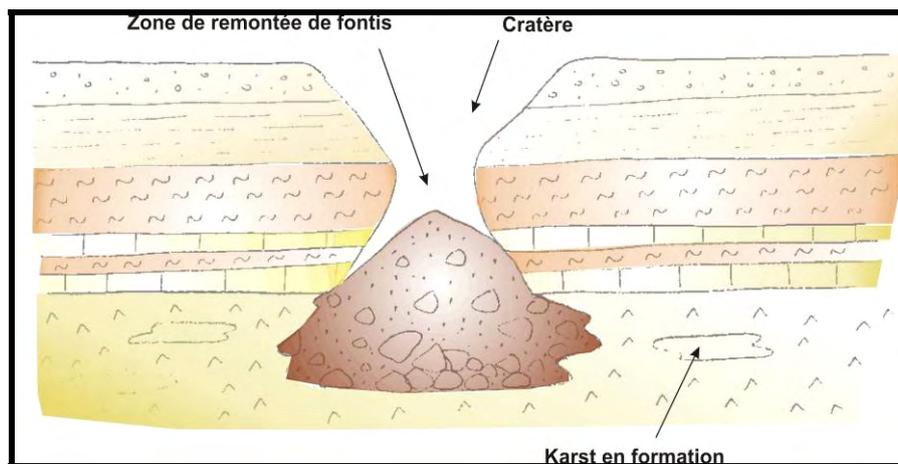


Figure 4 - Effondrement d'un karst par poursuite de la dissolution

III.2 Critères pris en compte dans les mécanismes de dissolution du gypse à Paris

La méthodologie mise en œuvre est différente pour les deux grandes formations gypsifères de Paris. Il est en effet nécessaire de bien différencier les formations ludiennes et antéludiennes, compte tenu en particulier du niveau d'exploitation des premières.

Pour les formations ludiennes, l'aléa sera traité à deux niveaux : zone de vigilance et zone défavorable observée, dans une carte unique. Il n'est donc pas dépendant des conditions hydrogéologiques

Pour les formations antéludiennes (Marnes et Caillasses Calcaire de Saint-Ouen, Sables de Beauchamp), l'évaluation de l'aléa « dissolution du Gypse » implique d'analyser trois composantes (figure 5), avec la définition de :

- la probabilité de présence de Gypse (Pp) : il s'agit de mettre en évidence les secteurs où le Gypse atteint des puissances significatives, suffisantes pour générer la formation de cavités ;
- la probabilité de dissolution (Pd) : il faut également que les niveaux gypsifères aient été en condition d'être dissous, pour voir apparaître les cavités susceptibles d'être à l'origine de désordres ;
- la probabilité d'effondrement ou d'affaissement (Pe) : l'apparition de désordres implique également une situation géologique (profondeur et nature du recouvrement) ;

Ces trois composantes, dont la probabilité sera exprimée par une valeur comprise entre 0 et 1, seront ensuite combinées pour déterminer l'aléa de la formation considérée avec la relation :

$$\text{Aléa} = Pp * Pd * Pe$$

La cartographie finale de l'aléa sera ensuite réalisée par définition de classes de valeurs sur les cartes ainsi calculées.

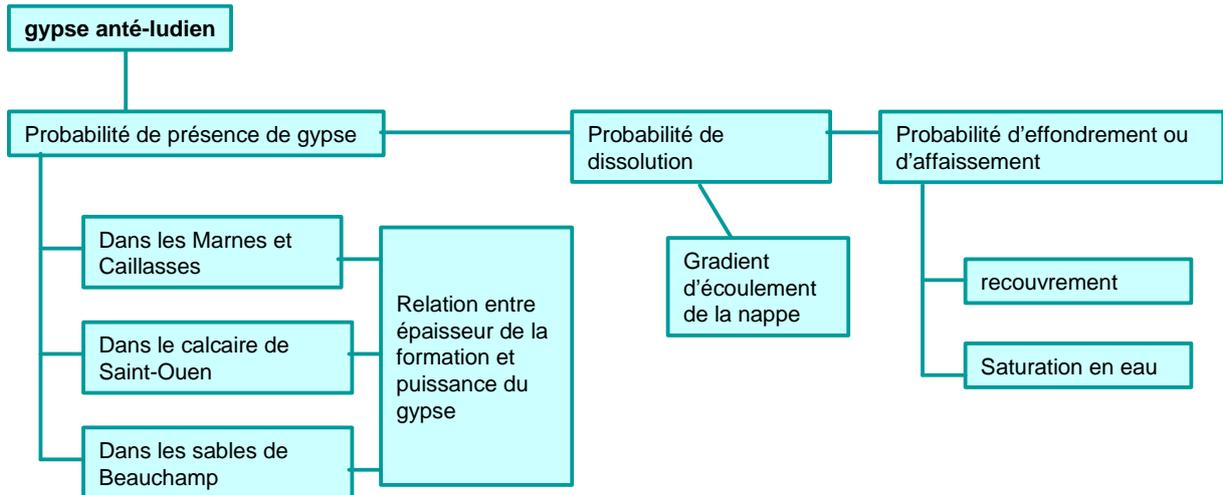


Figure 5 - Schéma explicatif de la méthodologie de cartographie de l'aléa sur les formations antéludiennes

III.3 Probabilité de présence de gypse

Pour les Marnes et Caillasses, dans la mesure où l'épaisseur des niveaux de Gypse est directement proportionnelle à celle de la formation, on a pris en compte les critères suivants :

de 0 à 12 m d'épaisseur totale des M&C	absence de Gypse
de 15 à 20 m d'épaisseur des M&C	épaisseur croissante de Gypse
au delà de 20 m d'épaisseur des M&C	épaisseur maximale de Gypse

L'épaisseur probable de Gypse (P_p) est exprimée par une valeur entre 0 et 1. La valeur initiale est fixée à 0, dans la mesure où l'absence de Gypse conduit, de fait, à un aléa nul (figure 6).

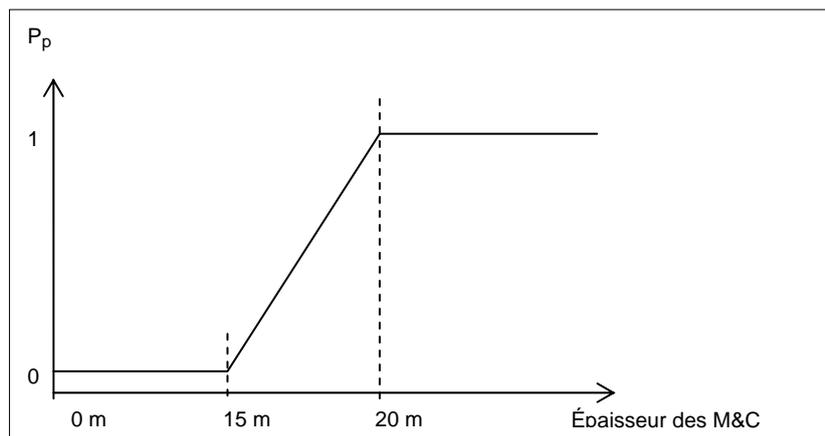


Figure 6 - Relation épaisseur de la formation / aléa pour les Marnes et Caillasses

Pour les épaisseurs comprises entre 15 et 20 m (5 m de puissance), la probabilité de présence de Gypse (P_p) sera donc obtenue par la relation :

$$P_p = (E_p - 15) / 5 \text{ où } E_p = \text{Épaisseur totale des Marnes et Caillasses}$$

La carte suivante montre le résultat d'un tel traitement (figure 7).

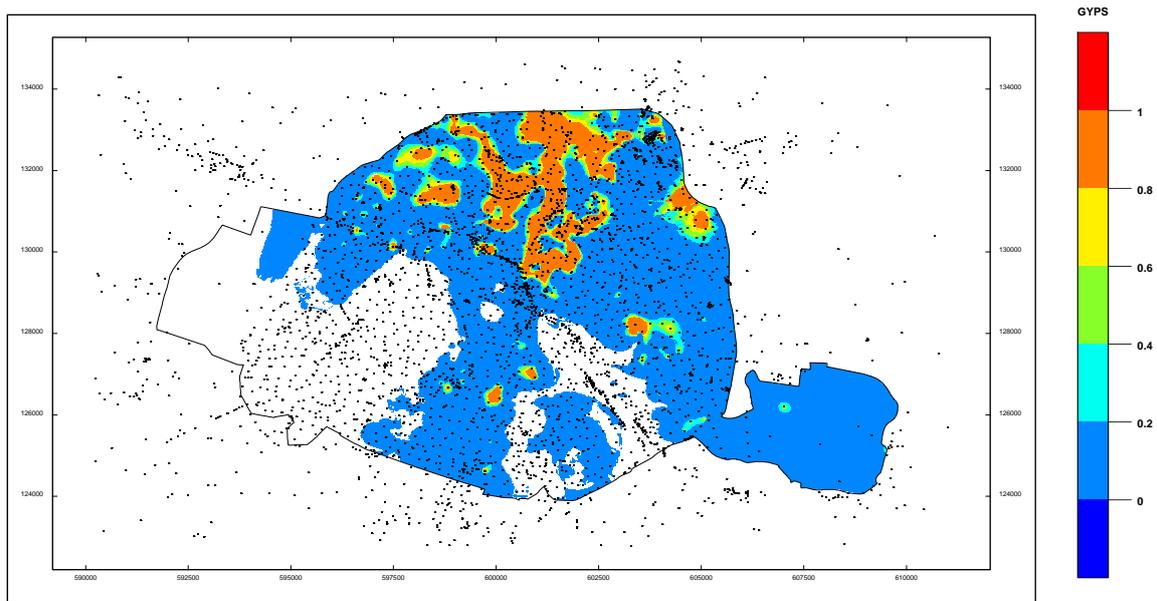


Figure 7 - Carte de probabilité de présence de gypse associée à la formation des Marnes et Caillasses

De la même manière, pour le Calcaire de Saint-Ouen, la probabilité de présence de Gypse sera exprimée à partir des valeurs d'épaisseurs suivantes.

de 0 à 11 m d'épaisseur totale du Saint-Ouen	absence de Gypse
11 à 16 m d'épaisseur du Saint-Ouen	épaisseur croissante de Gypse
au delà de 16 m d'épaisseur du Saint-Ouen	épaisseur maximale de Gypse

Pour les Sables de Beauchamp, il ne se dégage pas de lois aussi nettes que pour les formations précédentes. Une tendance semblant cependant se dégager pour associer les descriptions de Gypse à des puissances plus importantes de la formation. Il faut cependant souligner que cette analyse est perturbée par la disposition le plus souvent diffuse du Gypse. Pour les Sables de Beauchamp, nous considérerons que, pour une épaisseur inférieure à 15 m de cette formation, la probabilité de présence de gypse peut être considérée comme nulle ($P_p = 0$) et qu'au-delà de 15 m de puissance, l'aléa peut être considéré comme moyen ($P_p = 0,5$).

III.4 Probabilité de dissolution

La dissolution du Gypse se produit s'il y a renouvellement de l'eau saturée par de l'eau non saturée sur une période suffisamment longue (plusieurs années). Cette situation est valable, quelle que soit la formation considérée (Marnes et Caillasses, Calcaire de Saint-Ouen, Sables de Beauchamp). Deux critères vont donc régir les possibilités de dissolution :

- la position de la formation considérée vis-à-vis de la nappe ;
- la valeur du gradient hydraulique associé à la surface des basses eaux (BE) ce qui traduit le mieux l'influence des pompages.

La cartographie de la probabilité de dissolution (P_d) est réalisée en se basant sur le gradient des basses eaux déterminé par analyse des piézomètres IGC, confrontée à la carte de Diffre [6] (pour prendre les valeurs les plus défavorables) avec prise en compte des travaux ÉOLE et METEOR sur la période 1994-1997.

Le gradient moyen a été calculé pour trois tailles de maille : 500, 1000 et 2 000 m. La probabilité de dissolution (Pd) est exprimée par une valeur comprise entre 0,1 et 1. La valeur initiale n'est pas fixée à 0, dans la mesure où, quelle que soit la position des formations gypseuses, il est difficile de considérer la possibilité de dissolution comme inexistante. La valeur limite de 0,1 (aléa faible) est prise lorsque la formation gypsifère soit se situe hors d'eau (mur Mx situé au-dessus de la surface des hautes eaux HE) soit lorsque la formation se situe sous la zone de battement (toit Tx situé sous la surface des basses eaux BE). Dans ce deuxième cas, la cote atteinte sera diminuée d'une marge pour permettre la prise en compte des circulations dans la partie superficielle de la nappe. Cette marge est fixée à 25 m.

La valeur 1 correspond à la valeur maximale de gradient observée. Dans la zone de battement, le gradient minimum correspond à une valeur de 0,3 (aléa faible à moyen - la probabilité de dissolution reste importante dans un secteur situé en zone de battement). Dans la zone de battement, la probabilité de dissolution sera donc fonction du gradient, suivant la formule :

$$Pd = 1 - \left(\frac{(1 - 0.3)(\max - G)}{(\max - \min)} \right)$$

où G = valeur locale du gradient
max = valeur maximale du gradient observé sur la nappe
min = valeur minimale du gradient observé sur la nappe

La probabilité de dissolution du Gypse dans les marnes et caillasses est calculée selon les quatre cas de figure suivants (figure 8) :

- **cas 1** : le toit des Marnes et Caillasses est situé au-dessus de la surface des hautes eaux (TMC > HE) deux conditions peuvent se présenter :
 - 1a : Le mur est également situé au-dessus de cette surface (MMC > HE), la formation est hors d'eau et la probabilité de dissolution est faible (Pd = 0,1) dans le cas général ou faible à moyenne (Pd = 0,3) si la formation est affleurante (directement sous des remblais d'épaisseur E < 0,5 m),
 - 1b : Si le mur est situé sous la surface des hautes eaux, les M&C sont, au moins partiellement, dans la zone de battement et la probabilité de dissolution est calculée suivant la fonction présentée ci-dessus ;
- **cas 2** : Si le toit des M&C est situé sous la surface des hautes eaux (TMC < HE) et au-dessus de la surface des basses eaux diminuée d'une marge de 25 m (TMC > BE - 25), la formation est, au moins partiellement, située dans la zone de battement et la probabilité de dissolution est calculée suivant la fonction présentée ci-dessus ;
- **cas 3** : Si le toit des M&C est situé sous la surface des basses eaux diminuée d'une marge de 25 m (TMC > BE - 25), la probabilité de dissolution est faible (Pd = 0,1).

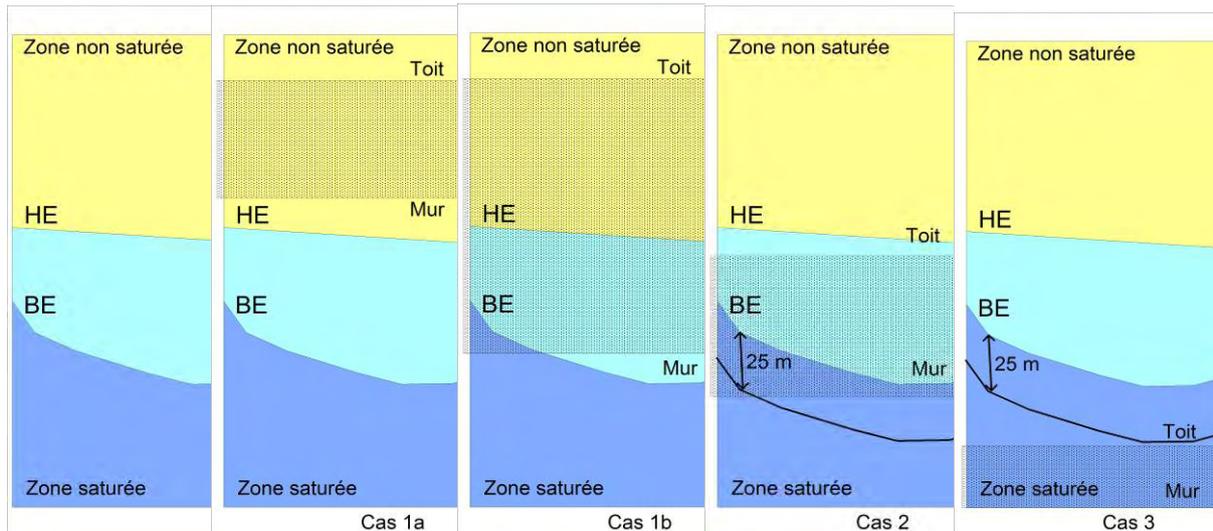


Figure 8 - Cas de figures possibles pour l'évaluation de la possibilité de dissolution

La même logique est utilisée pour les Calcaires de Saint-Ouen et les Sables de Beauchamp. On tiendra compte, cependant pour les calcaires de Saint-Ouen de la possibilité d'être recouverts directement par les Marnes Infragypseuses, pour lesquelles les possibilités d'infiltrations depuis la surface sont importantes. La probabilité de dissolution sera alors faible à moyenne ($Pd = 0,3$).

IV. RÉSULTATS

L'information relative aux nappes d'eau souterraine de Paris a été obtenue à partir du traitement des données piézométriques de l'IGC (figure 9). Les données de chaque piézomètre ont été contrôlées et analysées pour définir un niveau de « plus hautes eaux » et de « plus basses eaux » mais sans tenir compte des cas où le niveau a fortement baissé durant une brève période de pompages (moins de 6 mois). Des cartes ont été réalisées pour les deux nappes qui nous intéressent (Lutétien, Saint-Ouen/Beauchamp). Ces cartes « hautes eaux » et « basses eaux » ne sont naturellement pas synchrones dans la mesure où les niveaux sont beaucoup plus influencés par des phénomènes anthropiques que par des phénomènes de recharge et de vidange naturelles.

La carte « basses eaux » de la nappe du Lutétien, réalisée à partir de 72 piézomètres, montre nettement un creux piézométrique dans le centre-ouest de Paris (figure 10). On le retrouve dans la carte de la différence entre « hautes eaux » et « basses eaux » (figure 11) ce qui montre que ce creux est lié aux prélèvements, en particulier les travaux ÉOLE et METEOR sur la période 1994-1997 (figure 12). En effet alors que la différence moyenne entre hautes eaux et basses eaux est de 1 à 3 m, on peut atteindre jusqu'à 10 m dans la zone de prélèvements maximum (figure 13).

À partir de l'interpolation des niveaux « basses eaux » a été calculée une carte de gradients au pas de 125 m (figure 14). Les classes de gradient varient entre 0.009 et 1 084 %. Les zones de plus fort gradient correspondent à un secteur compris entre la gare Saint-Lazare, la Concorde, et Louvre, au secteur nord du bois de Boulogne, et au quartier de Bercy. La première zone est liée aux prélèvements dont les effets sur la piézométrie de la nappe ont été présentés ci-dessus. La deuxième correspond à un gradient naturel de la nappe des points hauts du bois de Boulogne (40 à 45 m NGF) vers les points bas de la Seine (26 m NGF).

La troisième est plus difficile à interpréter ; elle peut correspondre à la petite dépression piézométrique qui avait été mise en évidence sur la carte piézométrique élaborée en 2001 [7], dépression vraisemblablement dues à des pompages.

Cette grille de gradient, une fois validée, sera utilisée pour calculer la probabilité d'effondrement ou d'affaissement lié à la dissolution du gypse, qui elle-même permettra d'élaborer, par analyse multicritères la carte de l'aléa mouvement de terrain de Paris. ■

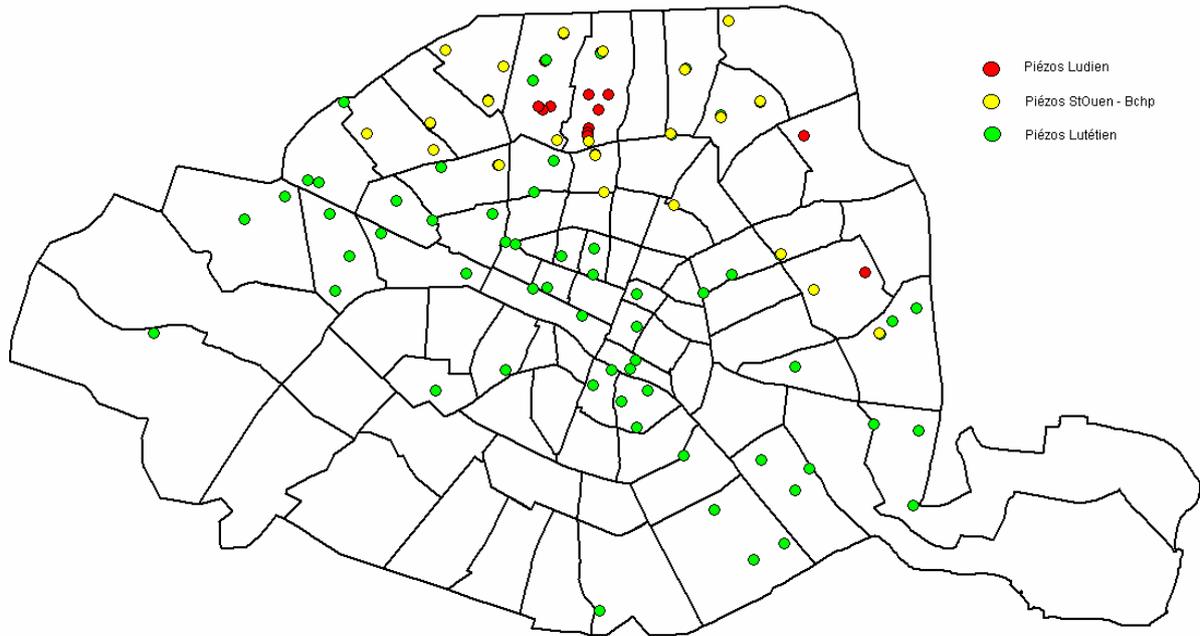


Figure 9 - Piézomètres du réseau de l'IGC assurant le suivi des nappes susceptibles d'avoir un impact sur la dissolution du gypse

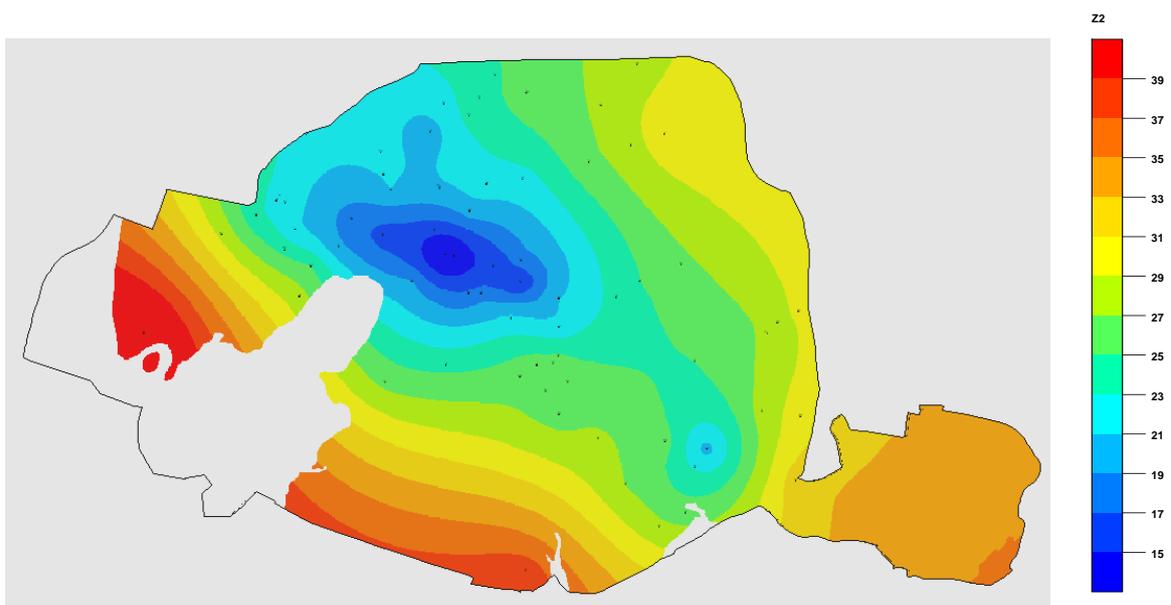


Figure 10 - Carte « basses eaux » de la nappe du Lutétien (m NGF)

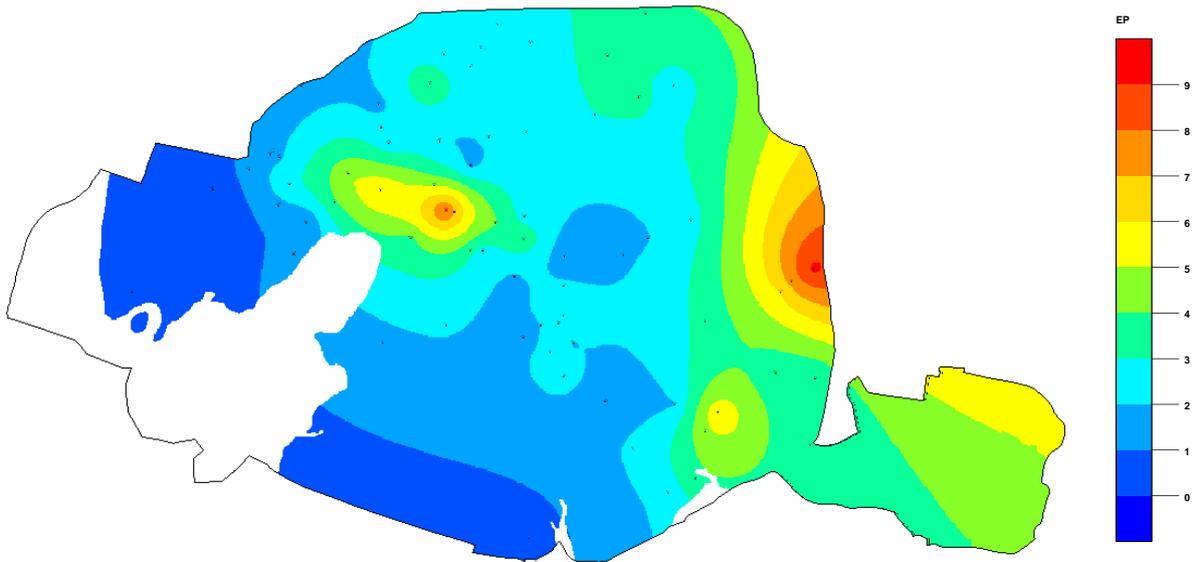


Figure 11 – Carte de la différence entre « hautes eaux » et « basses eaux » de la nappe du Lutétien (m).

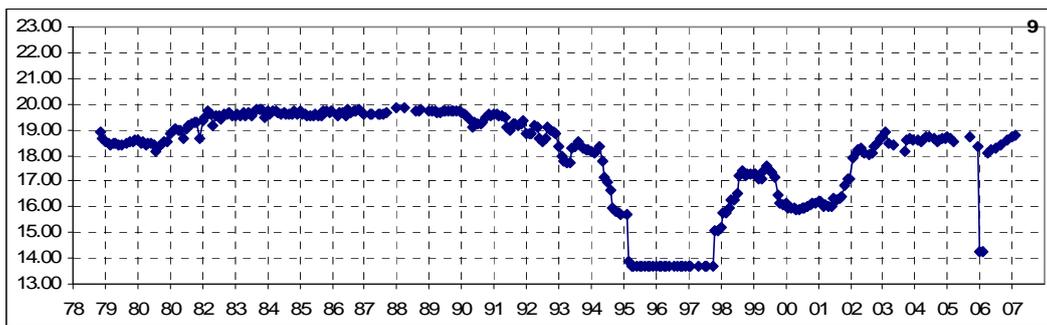


Figure 12 – Historique du piézomètre du square Louis XVI (VIII^e arrondissement)

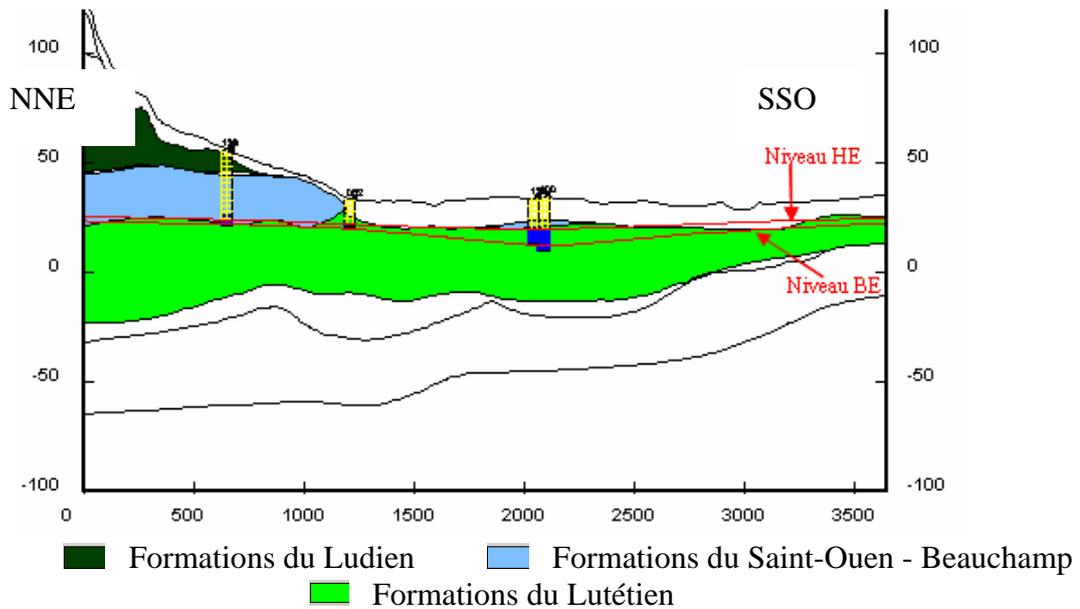


Figure 13 – Profil hydrogéologique au droit de la dépression piézométrique de la nappe du Lutétien

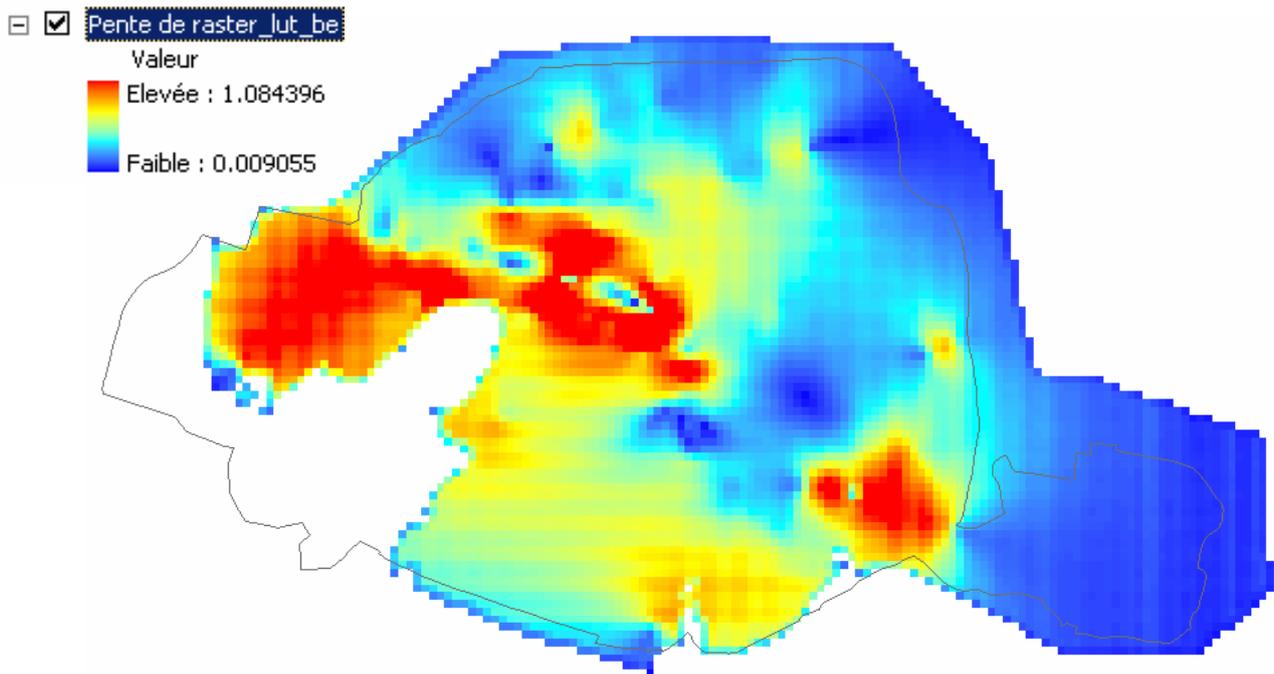


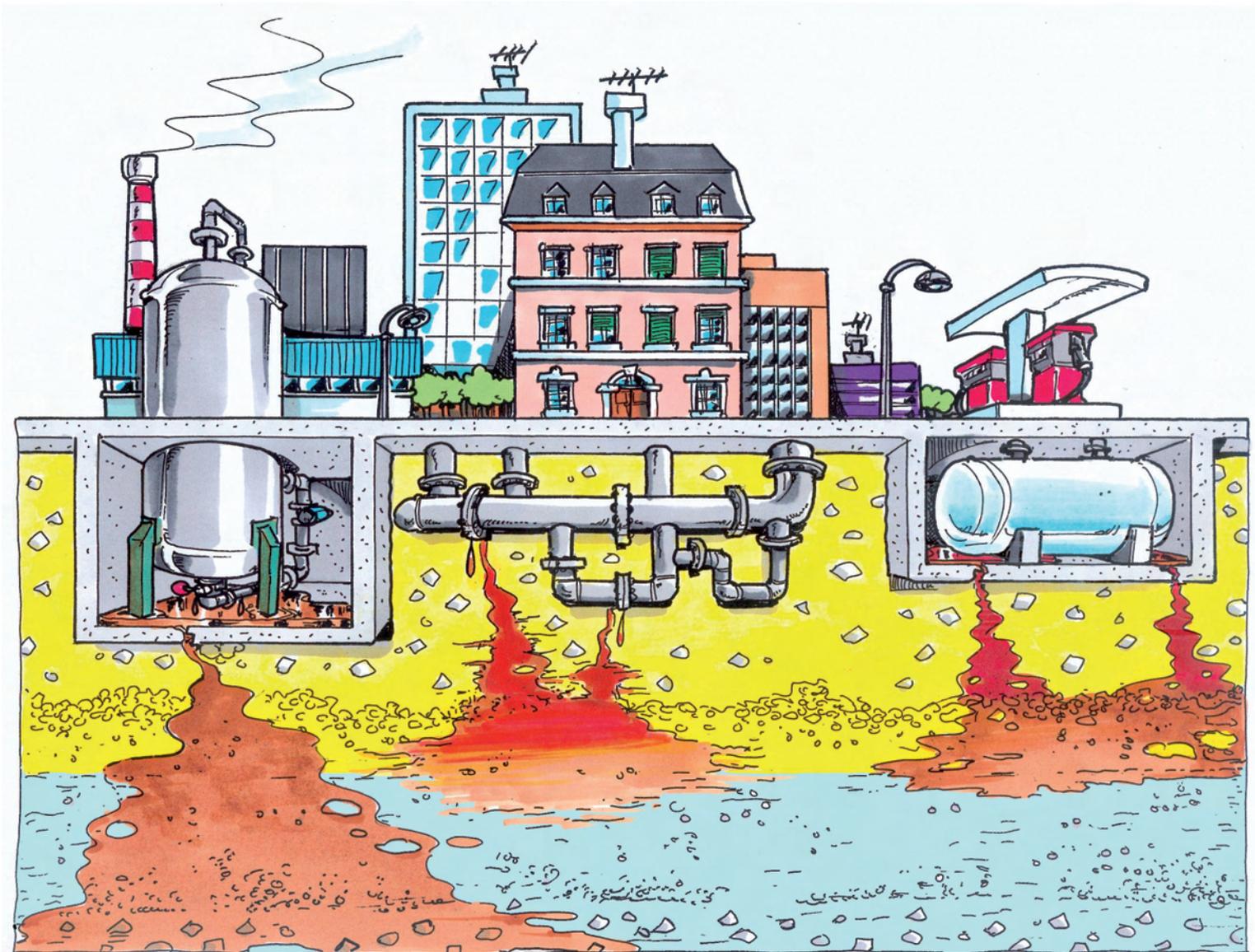
Figure 14 – Grille au pas de 125 m du gradient de la nappe du Lutétien

Références bibliographiques

- (1) **Thierry P., Laville P. et Lembezat C. (2006)** – Cartographie de l'aléa géotechnique sur la ville de Paris – Rapport d'avancement ; Rapport BRGM RP-55026-FR, 48 pp., 14 illustrations, 2 annexes
- (2) **Prunier Leparmentier A.M. (1988)** – Les problèmes géologiques et géotechniques de la ville de Paris. *Thèse de l'École Nat. Des Mines de Paris.*
- (3) **Deveughele et Usseglio Polatera J.M. (1979)** – Cartographie des zones exposées aux risques de dissolution de la fraction gypseuse du marno-calcaire de Saint-Ouen dans les XIX^e et XX^e arrondissements de Paris. *Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur*, p. 121-125
- (4) **Soyer R. (1953)** – Géologie de Paris, mémoire de la carte géologique de la France, Imprimerie Nationale, Paris, 610 p.
- (5) **Toulemont M. (1974)** - Les problèmes de reconnaissance générale des zones gypseuses a urbaniser ; Cas du nord-est de Paris, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 70, p.85-96
- (6) **Diffre P. (1969)**, Hydrogéologie de Paris et de sa banlieue, thèse de 3^e cycle, Faculté des Sciences de l'université de Paris
- (7) **J.Felenc, R. Blanchin, J-Y. Breton, F. Hanot, P.Laville, M. Le Nir, J-L. Nedellec, D. Obert, J-F. Vernoux (2004)** - Analyse des données sur le sous-sol parisien et de leur utilisation, pour une meilleure connaissance des risques liés aux mouvements de terrains et l'élaboration d'une première cartographie des aléas, rapport BRM/RP-52785-FR

Deuxième session

POLLUTIONS



Bancarisation et valorisation des données de suivi de la qualité des eaux souterraines au droit des sites industriels en région Rhône-Alpes

Laurent Albert⁽¹⁾, Laurent Cadilhac⁽²⁾, Romain Chartier, Violaine Bault⁽³⁾

⁽¹⁾ DRIRE Rhône-Alpes, Division de l'environnement – 2, rue Antoine Charial
69426 Lyon Cedex 03 - laurent.albert@industrie.gouv.fr

⁽²⁾ Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse – 2-4, allée de Lodz
69363 Lyon Cedex 07 - laurent.cadilhac@eaurmc.fr

⁽³⁾ BRGM – Service Géologique Régional Rhône Alpes – 151, boulevard Stalingrad
69626 Villeurbanne Cedex – r.chartier@brgm.fr – v.bault@brgm.fr

En France, près de 5000 installations classées pour la protection de l'environnement en activité font l'objet d'une obligation de surveillance des eaux souterraines en amont et aval de leur implantation. L'obligation de surveillance porte aussi sur des sites ayant été pollués par le passé, afin de s'assurer notamment de la bonne gestion des pollutions résiduelles et de la maîtrise suffisante des éventuels impacts. L'ensemble des informations recueillies à ce titre par de multiples intervenants est transmis à l'inspection des installations classées en place principalement dans les directions régionales de l'industrie, de la recherche et de l'environnement (DRIRE).

En lien avec l'évolution des réglementations nationales et européennes sur l'environnement, le recueil et la mise à disposition des analyses de la qualité des eaux souterraines issues de la surveillance des sites industriels sous forme numérique est apparu nécessaire au ministère en charge de l'environnement. Un programme national régionalisé de bancarisation au sein de la base données publique ADES d'une partie des données historiques acquises au cours des cinq dernières années a été mis en place. Cette action conduit par ailleurs à une synthèse portant à la fois sur les dispositifs de surveillance mis en place et offre des perspectives d'exploitation et de valorisation des données. L'opération, pilotée par les DRIRE et les agences de l'eau, a été confiée au BRGM.

Au niveau de la région Rhône-Alpes, le partenariat existant depuis 2004 entre la DRIRE, l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse et le Service Géologique Régional a permis la bancarisation et la mise à disposition des données issues d'un millier de forages implantés au droit ou à proximité de plus de 200 sites industriels parmi les 500 recensés dont le traitement est programmé.

INTRODUCTION

De nombreux sites industriels faisant l'objet d'actions par les pouvoirs publics, installations classées pour la protection de l'environnement (au titre de la loi de 1976) et installations de stockage de déchets ménagers et assimilés sont soumis à une surveillance de la qualité des eaux souterraines.

En 2004 la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement Rhône-Alpes (DRIRE), l'Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée et Corse, et le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM) se sont associés afin d'organiser le stockage sous forme numérique des données acquises par les industriels pour ensuite pouvoir les exploiter et en tirer une synthèse annuelle. La démarche engagée et les principaux résultats acquis sont présentés ci-après

I. CONTEXTE NATIONAL

En France, plus de 4 000 installations industrielles, font l'objet d'une obligation de surveillance des eaux souterraines en amont et en aval de leur implantation. Elles se composent en particulier de :

- environ 1 000 installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) en activité, au titre de l'article 65 de l'arrêté ministériel du 2 février 1998 modifié relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation, ou au titre d'arrêtés sectoriels spécifiques ;
- environ 2 500 sites et sols pollués, faisant ou ayant fait l'objet d'actions de la part des pouvoirs publics, afin de s'assurer de la gestion adaptée des sources de pollutions et de la maîtrise suffisante d'éventuels impacts ;
- 350 décharges ;
- 250 dépôts pétroliers.

L'ensemble des informations recueillies dans ce cadre est transmis à l'inspection des installations classées sous forme papier, ce qui ne permet pas, en l'état, une exploitation systématique, et méthodique des données, ni une mise à disposition aisée des informations aux publics pour qui ces données seraient utiles.

Le Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD), procède actuellement, en collaboration avec les DRIRE, les Agences de l'Eau et le BRGM, à la bancarisation des données relatives aux eaux souterraines issues de l'autosurveillance des installations classées pour la protection de l'environnement et des sites pollués, dans une banque de données intitulée ADES¹.

II. MISE EN ŒUVRE DE L'OPÉRATION DE BANCARISATION ET DE VALORISATION DES DONNÉES DE SUIVI DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES EN RÉGION RHÔNE-ALPES

II.1. Le contexte industriel de la région Rhône-Alpes

Région industrielle historique du fait notamment de la disponibilité des sources d'énergie et de l'eau, la région Rhône-Alpes est aujourd'hui la première région industrielle française avec plus de 522 000 emplois (soit 22 % de l'emploi régional).

¹ **ADES - Accès aux Données sur les Eaux Souterraines** – banque nationale publique rassemblant des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines <http://www.ades.eaufrance.fr>

L'industrie régionale est caractérisée par :

- des spécialités sectorielles fortes, en particulier l'énergie, la chimie, la mécanique, la papeterie, le traitement de surface et la teinturerie ;
- une disparité géographique forte avec des zones très denses en matière d'implantation industrielle historique et actuelle (principalement à proximité des principaux axes hydrographiques) ;
- un réseau dense de PMI.

Cette industrialisation ancienne et parfois dense a conduit à de nombreuses pollutions de sols et de nappe ceci d'autant plus que les sites industriels sont implantés très majoritairement en contexte alluvial dans le lit majeur des grandes vallées sur des nappes très vulnérables aux pollutions de surface.

À ce jour, environ 570 sites en région Rhône-Alpes font l'objet d'actions de gestion et de contrôle du fait de la pollution des sols.

II.2. Intérêts et objectifs de l'opération

Dans le prolongement des actions déjà engagées depuis de nombreuses années sur les régions Alsace, Lorraine et Champagne-Ardenne, la DRIRE Rhône-Alpes, l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse, et le BRGM ont souhaité dès 2003 organiser le stockage sous forme numérique des données acquises par les industriels sur les réseaux de forages (et puits) de contrôle au droit de leurs installations pour ensuite pouvoir les exploiter pour leurs besoins propres et en tirer une synthèse annuelle.

Ces données et leur exploitation revêtent des intérêts communs pour la Direction de la recherche, de l'industrie et de l'environnement (DRIRE) et l'Agence de l'eau.

Pour l'Agence il s'agit d'obtenir une meilleure connaissance de la qualité des eaux souterraines des nappes soumises à des pressions d'origine industrielle et de mieux évaluer l'impact de ces activités pour l'aider dans les prises de décision vis-à-vis de ses programmes d'intervention.

L'exploitation des points de contrôle industriels permet également de conforter les dispositifs de surveillance en place pour évaluer l'état de la ressource en eaux souterraines pour répondre aux objectifs de la Directive Cadre Européenne qui demande de mettre en place différentes mesures visant notamment :

- à prévenir ou limiter le rejet de polluants dans les eaux souterraines ;
- à protéger, améliorer et restaurer les masses d'eau et prévenir la détérioration de leur état, afin que celles-ci soient en bon état chimique en 2015 ;
- à détecter et inverser toute tendance à la hausse, significative et durable de la concentration de tout polluant résultant de l'impact de l'activité humaine.

Pour la DRIRE et l'inspection des installations classées, l'intérêt de cette action consiste en la possibilité à terme d'exploitation systématique et méthodique des données dans des délais courts ; cette possibilité permettra de réagir plus rapidement à des évolutions apparaissant dans le suivi des sites par rapport au contrôle sur support papier. De même, lors des bilans des plans de gestion des sites et sols pollués, l'analyse multicritère des données de suivi des eaux souterraines sera facilitée.

II.3. La démarche et les résultats obtenus

Le travail comprend les quatre étapes principales qui suivent :

- inventaire des sites équipés en forages de contrôle ;
- sélection, caractérisation des sites et dispositifs de surveillance associés ;
- acquisition des données d'analyse (rattrapage de l'historique jusqu'en 1998), bancarisation et traitement ;
- valorisation et documents de synthèse.

L'opération conduite en partenariat depuis 2004 entre la DRIRE, l'Agence de l'Eau et le Service Géologique Régional du BRGM a permis à ce jour la bancarisation et la mise à disposition des données issues d'un millier de forages implantés au droit ou à proximité de plus de 250 sites industriels répartis sur les départements du Rhône, de l'Isère et de l'Ain, parmi les 500 recensés dont le traitement est programmé et devrait s'achever en 2008.

La majorité des sites (362) est constituée d'installations classées, généralement soumises à surveillance par application de l'arrêté ministériel de 1998 modifié.

Par ailleurs, une large proportion des sites recensés (265) fait l'objet d'une action de la part des pouvoirs publics du fait de pollutions potentielles ou avérées et sont classés dans la base de données BASOL², certains étant également des installations classées.

L'objectif est maintenant d'organiser la bancarisation en continu des données par les industriels.

III. EXEMPLE D'EXPLOITATION DE DONNÉES SUR L'AGGLOMÉRATION GRENOBLOISE

III.1 Contexte industriel

Sur l'agglomération grenobloise et à proximité, que ce soit à hauteur de la confluence Drac-Romanche ou sur l'Isère, en amont ou en aval de Grenoble, on dénombre 37 sites au droit desquels une surveillance de la qualité des eaux souterraines est exercée. Tous sont d'actuels ou d'anciens sites industriels ou installations classées, 8 seulement n'étant pas classés dans BASOL. Douze sites sont implantés sur la commune de Grenoble, les autres se répartissant sur 13 communes limitrophes.

La figure 1 présente une carte du secteur reportant les cours d'eau ainsi que les limites des aquifères selon le référentiel hydrogéologique national. La carte localise les différents sites évoqués et reporte aussi les secteurs d'activités identifiés selon la nomenclature utilisée par la Direction de la Pollution et de la Prévention des Risques (DPPR) du MEDAD ainsi que le nombre d'ouvrages destinés à la surveillance de la qualité des eaux souterraines.

La majeure partie des sites est concentrée le long du Drac au Sud et dans de Grenoble, puis le long de l'Isère. En termes d'activités, celles identifiées sont en majorité la sidérurgie et la métallurgie (10 sites), la chimie et la parachimie (8 sites) et les déchets (6 sites), les 3 autres secteurs (entreposage, transport commerce - mécanique et traitement de surface - pétrole et gaz) représentant chacun 10 % de l'ensemble (entre 4 et 3 sites chacun).

² BASOL : Base de données publique sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif - <http://basol.environnement.gouv.fr/>

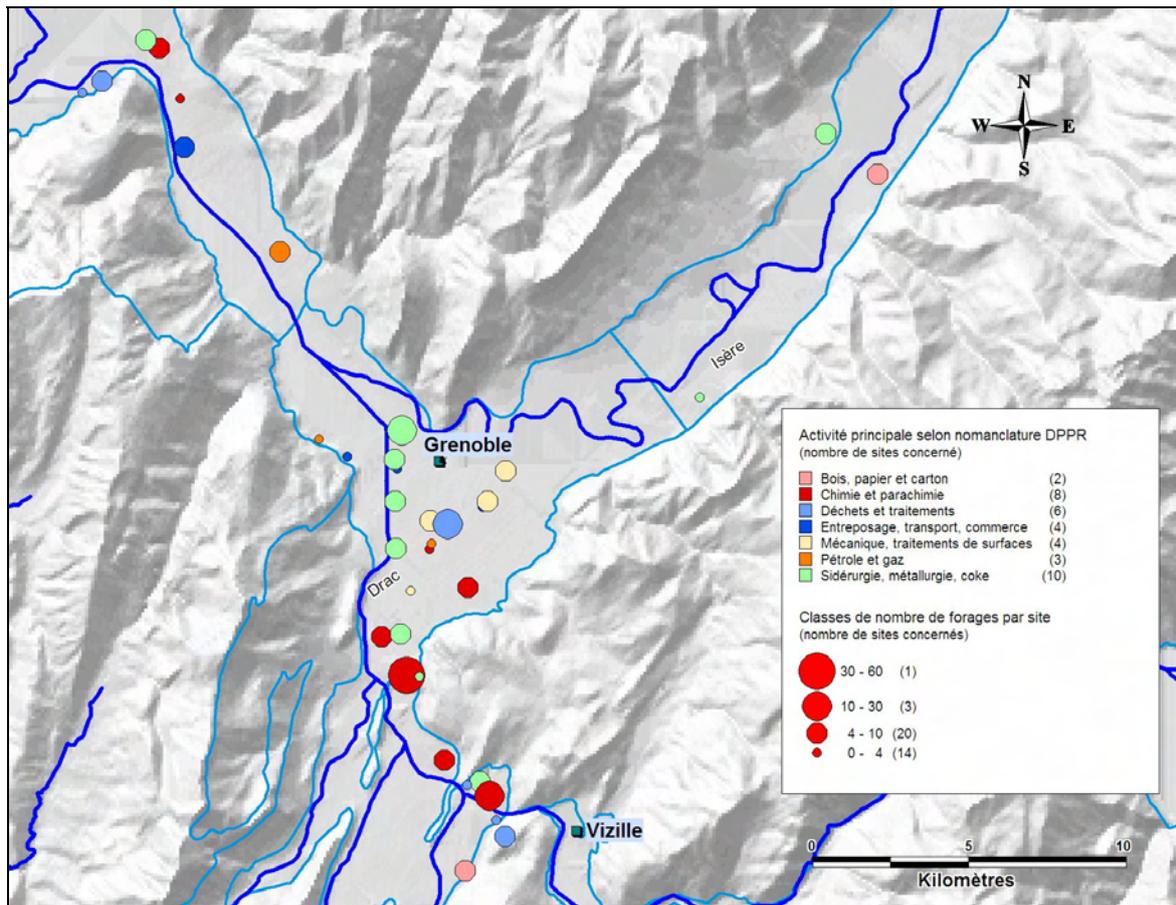


Figure 1 - Activités principales des sites et nombre de forages suivis

III.2 Dispositifs de surveillance

Du point de vue de la surveillance de la qualité des eaux souterraines, chaque site réalise un suivi périodique au travers de différents ouvrages (piézomètres, puits ou forages) atteignant la nappe des alluvions. La distribution du nombre d'ouvrage par site, représentée sur la figure 1, est précisée à la figure 2. Si sur le secteur, le nombre d'ouvrages est variable (entre 1 et 57), la plupart des sites comporte 3 ouvrages ou plus, répondant ainsi aux exigences minimales dans une perspective d'analyse de l'hydrogéologie et de la qualité des eaux souterraines. Un examen des données relatives aux sites permet de souligner que les cas avec un nombre important d'ouvrages suivis sont liés à certaines conditions spécifiques comme par exemple la nature :

- des sites : les plateformes chimiques de Pont-de-Claix et de Jarrie se caractérisent par une extension importante et par des industries multiples, nécessitant des dispositifs plus denses ;
- des aménagements : au centre de Grenoble, la réhabilitation d'un ancien site industriel a par exemple donné lieu à un morcellement des parcelles et des propriétaires, induisant une multiplication des ouvrages.

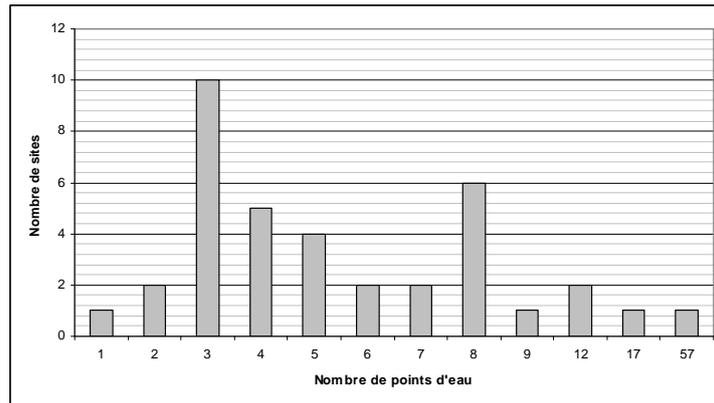


Figure 2 - Distribution du nombre de sites en fonction du nombre d'ouvrages suivis

Au global, les différents dispositifs de surveillance en place constituent un réseau de 256 ouvrages sur lesquels des données ont été ou sont acquises en matière de qualité des eaux souterraines. Sur ces forages, seuls 6 sont identifiés comme étant rebouchés ou n'étant plus opérationnels. On notera aussi que certains sites industriels disposent aussi d'autres forages non comptabilisés et non inscrits dans ADES. Il s'agit généralement d'ouvrages destinés à la seule alimentation en eau industrielle et non utilisés pour le suivi de la qualité des eaux souterraines.

La saisie dans ADES des ouvrages a conduit à une déclaration quasi systématique dans la banque nationale du sous-sol BSS³, ce qui a nécessité quelques compléments d'information. En dehors des forages pour lesquels l'information n'est pas connue (45 %), les profondeurs atteintes sont toutes comprises entre 4 et 31 m, à l'exception de 3 ouvrages dépassant les 100 m de profondeur. Du fait cependant de l'absence de coupe pour 65 % des ouvrages, 25 % seulement disposant d'une coupe géologique, les apports sur le plan de la géologie et de l'hydrogéologie restent limités.

III.3 Contexte hydrogéologique et qualité des eaux souterraines

Le secteur décrit concerne les alluvions récentes de l'Isère et du Drac. La plaine alluviale de l'Isère s'établit pour Grenoble à une altitude de 213 m environ. Les formations d'origine glaciaire qui occupent la dépression grenobloise, sont constituées par des dépôts quaternaires peu perméables (lacustre) dans lesquels viennent s'imbriquer, au sud, les alluvions des anciens cônes de déjection du Drac et de la Romanche, le tout étant oblitéré par les alluvions récentes des cours d'eau en surface. Si les alluvions récentes atteignent des épaisseurs entre dix et quelques dizaines de mètres, les dépôts sous-jacents sont très épais (épaisseur connue excédant les 400 m sous Grenoble).

Les alluvions sont le siège d'une nappe alluviale puissante largement exploitée à la fois pour les besoins industriels et d'approvisionnement en eau potable, la nappe est considérée par

³ BSS – Banque de données du Sous-Sol – regroupe des informations brutes géologiques et techniques relatives à des ouvrages souterrains (localisation, objet, description géologique, équipement technique des forages) résultant de l'application du code minier qui rend obligatoire la déclaration de certains ouvrages. Le BRGM est chargé de gérer cette banque et de la mettre à disposition du public - <http://infoterre.brgm.fr>

ailleurs comme particulièrement vulnérable en raison notamment des perméabilités élevées (5.10^{-3} à 10^{-2} m/s) et des fortes transmissivités associées.

Pour la gestion des ressources en eau, tant superficielles que souterraines, un SAGE⁴ a été mis en place et il serait particulièrement souhaitable de pouvoir exploiter en continu et de la manière la plus précise possible, les données d'autosurveillance des industriels,

Tous les forages recensés dans le cadre de l'opération concernent les alluvions sablo-graveleuse du Drac et de l'Isère (code aquifère 325), ainsi que les alluvions de la confluence Drac Romanche.

Sur l'ensemble des 256 ouvrages du secteur, 75 ne disposent d'aucune donnée relative à la qualité des eaux souterraines. Ceci peut être lié à l'absence de mise à disposition des éventuelles campagnes d'analyses, à la mise à disposition d'analyses relatives à des paramètres chimiques non référencés par le SANDRE⁵ et nécessitant une codification ou à une saisie numérique non finalisée. Pour les autres ouvrages, les distributions des ouvrages selon le nombre de campagnes d'échantillonnage et selon les délais de suivi des ouvrages sont précisées ci-dessous (figure 3).

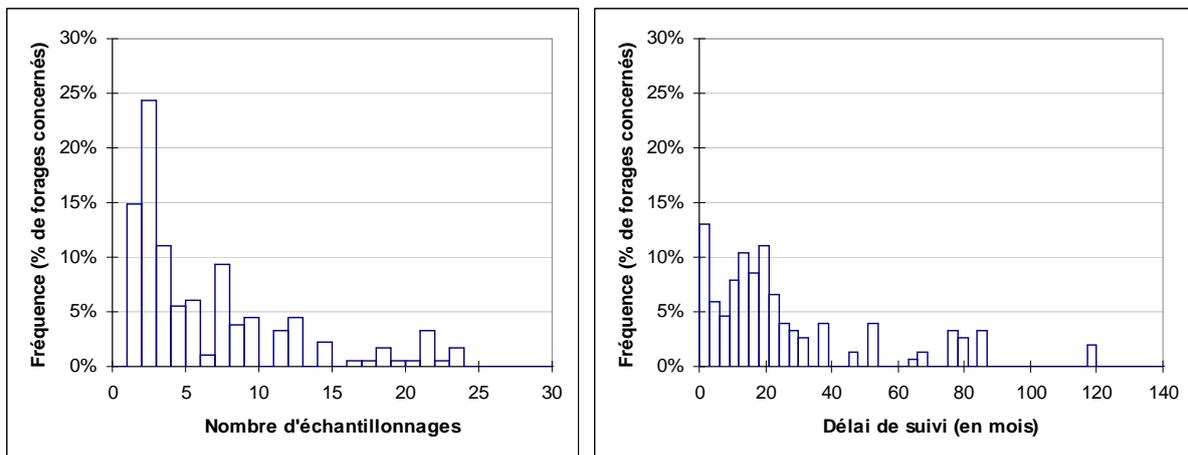


Figure 3 - Distribution des forages selon le nombre d'échantillonnages et les délais de suivi

Le nombre total de campagnes d'échantillonnage mis à disposition est de plus de 1 000. On note que 15 % des ouvrages n'ont été échantillonnés qu'une seule fois, et que la majeure partie des forages (80 %) dispose de moins de 10 campagnes d'échantillonnage et d'analyse (moyenne de 6 campagnes par ouvrage).

Du point de vue des délais de suivis des ouvrages parmi ceux échantillonnés au moins 2 fois (calculés à partir des dates les plus anciennes et les plus récentes d'analyses), une large majorité (70 %) dispose d'une surveillance excédant l'année. Dans une perspective d'interprétation plus poussée et fiable des données, il apparaît nécessaire de poursuivre l'acquisition et la bancarisation d'analyses dont la quantité reste encore faible à jour. Les délais de surveillance disponibles sont par contre suffisants pour que l'étude pluriannuelle des évolutions puisse être esquissée.

⁴ SAGE - Schéma d'aménagement et de gestion des eaux Drac - Romanche

⁵ SANDRE - Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau
<http://sandre.eaufrance.fr>

Les distributions des campagnes par ouvrages et des analyses par campagnes sont présentées ci-après (figures 4 et 5). Les données bancarisées concernent près de 24 000 résultats d'analyses chimiques pour les 181 ouvrages disposant de données. On dispose en moyenne de 22 analyses par campagne et de 130 analyses par ouvrage.

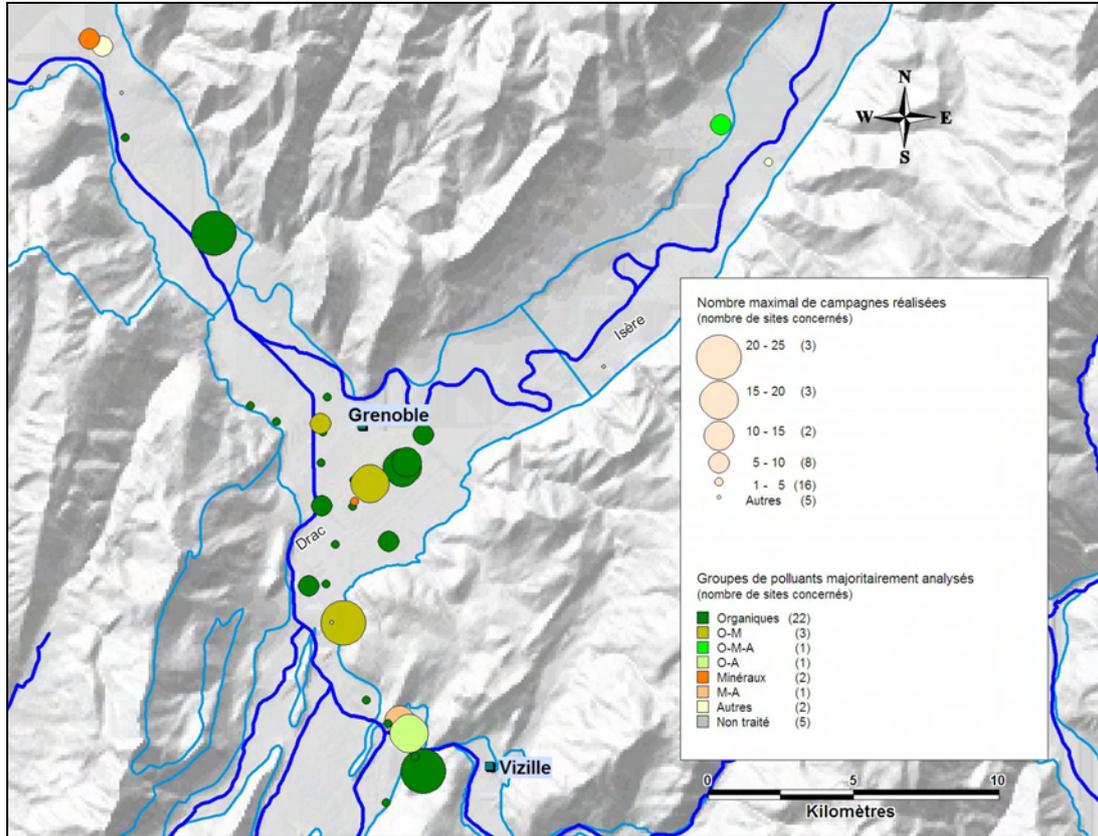


Figure 4 - Nombre maximum de campagnes disponibles et groupes de micropolluants majoritairement recherchés par site

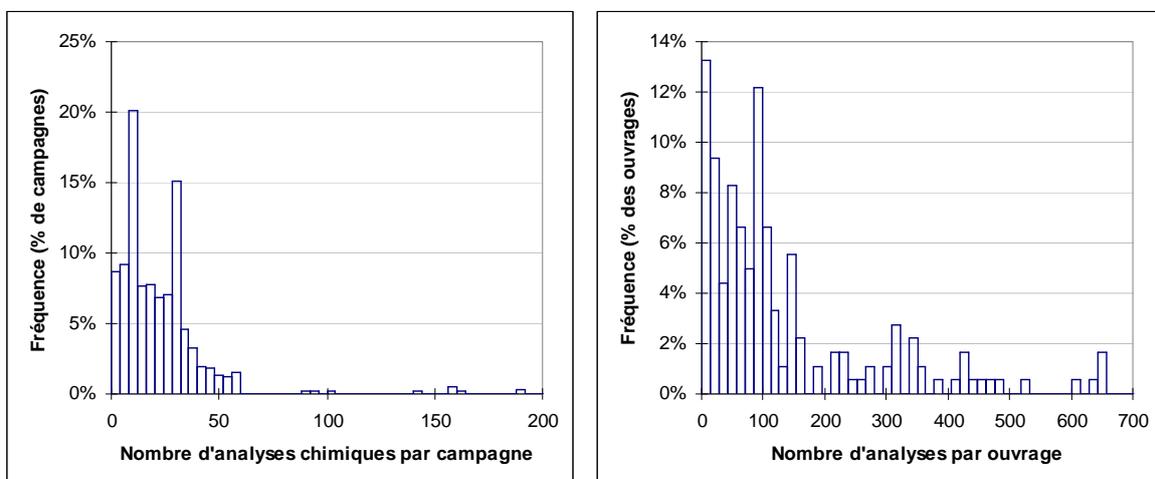


Figure 5 - Distribution du nombre d'analyses par campagne et par ouvrage

Un examen des grandes familles de paramètres et polluants recherchés (figures 4 et 6) permet aussi de constater l'importance à la fois des micropolluants organiques et minéraux, représentant plus de 80 % des données disponibles. L'analyse de l'impact effectivement constaté nécessite cependant une analyse plus approfondie. On peut néanmoins préciser à ce stade que les taux de détection (calculés sur la base du nombre d'analyses) restent faibles : 30 % pour les polluants organiques et 20 % pour les polluants minéraux.

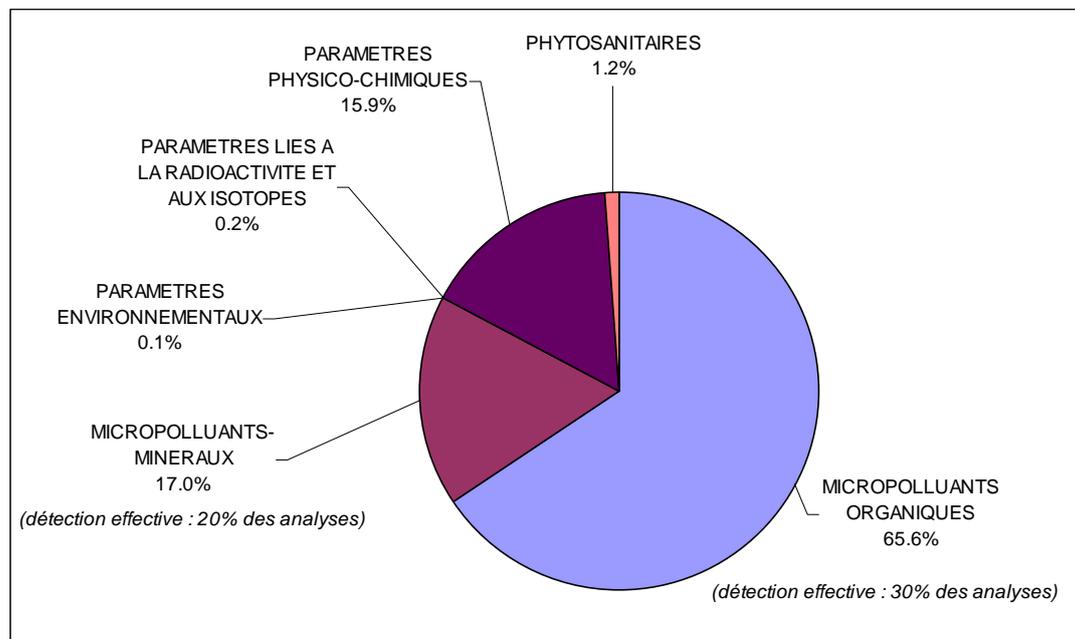


Figure 6 - Principaux groupes de micropolluants recherchés

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus sur la région Rhône-Alpes sont très satisfaisants et ont permis de faire largement progresser la connaissance des impacts des pressions d'origine industrielle sur les nappes. Le bilan établi par le BRGM qui porte à la fois sur les dispositifs de surveillance mis en place et les résultats de cette surveillance va aussi amener la DRIRE, dans certaines situations, à modifier ou adapter les modalités réglementaires de suivi (positionnement des points de surveillance, paramètres recherchés) ou de gestion des sites.

Au niveau national, le MEDAD travaille actuellement, en coordination avec l'ensemble des partenaires concernés, sur les modalités pratiques de saisie des données dans la banque de données ADES à différents horizons temporels. Dans ce cadre, un mode de saisie direct par les exploitants, leurs prestataires ou les laboratoires est envisagé. Sous réserve de règles de validation des données, ce type de saisie permettrait à chacun de travailler sur les mêmes données, saisies une seule fois.

Le souhait des partenaires impliqués dans l'opération est de permettre l'accessibilité des données à ceux qui le désirent selon un principe de transparence (conformément à la convention d'Aarhus et à la directive concernant l'accès du public à l'information en matière d'environnement). Cet enjeu du partage de l'information est fort particulièrement pour les

nappes à la fois exploitées pour la satisfaction des besoins en eau potable et sièges d'implantations industrielles à risque. Ceci devrait être rendu possible à court terme.

De même, la mise à disposition de ces données sur un serveur unique pourra permettre aux exploitants de sites de réorganiser leur dispositif de suivi en tenant compte des suivis réalisés par d'autres gestionnaires situés dans le même secteur géographique et éventuellement d'organiser en commun la surveillance des zones géographiques qui regroupent de nombreuses activités industrielles. ■

Références bibliographiques

Chartier R., Clozel.B., Bault.V., Py I., Putot E., 2007, Suivi de la qualité des eaux souterraines au droit des installations classées du Rhône et de l'Isère - Phase 3 (85 sites). Rapport final. 32 p., 7 fig., 1 ann.

Risque de pollutions chimiques ou bactériennes dans la construction et l'exploitation des infrastructures de transport : inventaire, classification, prévention, remèdes

Christine ONDEL

EGIS Rail - 25, cours Émile Zola - 69625 Villeurbanne Cedex - christine.ondel@egis.fr

L'acte de construire est susceptible de produire des pollutions de la nappe par le simple fait de l'intrusion d'un corps étranger dans le milieu naturel ou par la mise en communication des nappes avec des milieux pollués. L'exploitation des ouvrages peut, elle aussi, occasionner ou entretenir une pollution des nappes, directe ou indirecte.

Les différentes sources de pollution à chaque étape de la construction et en exploitation sont présentées avec le niveau de risque associé et les possibilités de prévention de ces risques. Les efforts effectués ces dernières années pour faire évoluer techniques et produits sont illustrés par quelques exemples. Les rémanences de pratiques polluantes sont expliquées par le contexte et constituent autant d'axes de recherche de nouvelles méthodes et de sensibilisation des entreprises à l'objectif de suppression et de prévention des pollutions.

I - INTRODUCTION

L'acte de construire, comme toute activité humaine, exerce une influence sur le milieu environnant. La construction des grandes infrastructures de transport ne fait pas exception à cette règle. Elle est de plus suivie par l'exploitation des réseaux de transport qui apporte elle aussi quelques pollutions, sur une durée bien plus longue.

De ce contexte naît une réflexion sur les méthodes à utiliser pour limiter, lors de la construction, les pollutions de la nappe, ou des systèmes d'assainissement et d'épuration des eaux. Ces atteintes à l'environnement en phase de construction sont en général de courte durée ; toutefois certains traitements ont un impact persistant. Cela conduit à une réflexion sur la persistance des pollutions du milieu aquatique tout au long de la vie de l'ouvrage, tant par la rémanence des pollutions de la phase construction que par les pollutions sans cesse renouvelées, ponctuellement ou de manière continue, lors de l'exploitation.

II - ORIGINES DES POLLUTIONS

On distinguera deux mondes très différents par leur impact, tant en phase de construction qu'en exploitation :

- le monde souterrain d'une part, qui recouvre le domaine du métro essentiellement, même si des tramways et des bus, guidés ou non, empruntent eux-aussi de plus en plus des sections souterraines en milieu urbain ;
- l'espace voirie d'autre part, sur lequel circule également toute la gamme de véhicules cités précédemment, sur une plate-forme dédiée ou non.

Il est évident que la construction souterraine a un impact plus direct sur les nappes, mais les aménagements de surface produisent aussi des effets directs ou indirects sur le patrimoine qu'est l'eau.

Quant à l'exploitation, elle produit l'essentiel de sa pollution par le rejet dans le système d'assainissement des eaux usées et des eaux de ruissellement récupérées dans les postes d'épuisement.

Cependant l'entretien courant et la maintenance lourde (réparations) des infrastructures peuvent produire des pollutions de même nature que celles qui surviennent en phase de construction.

III - INVENTAIRE DES POLLUTIONS

Une pollution par définition est la dégradation d'un milieu par l'introduction d'un polluant.

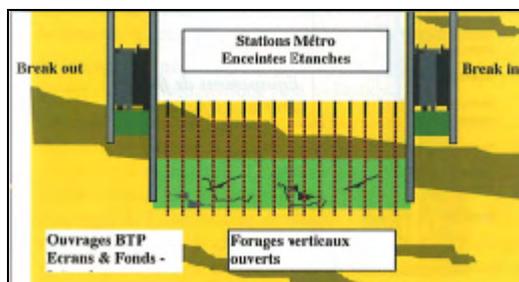
Une vision négative du sujet voudrait que tout corps étranger introduit dans la nappe soit de fait porteur de pollution. De même toute modification du milieu naturel constituerait une pollution.

Une vision plus positive consiste à graduer les impacts produits par les différentes actions sur le milieu naturel et à classer comme polluants seulement les produits ou actions dont les effets sont inacceptables à court ou long terme.

III.1 - Constructions souterraines

La **construction de structures souterraines** nécessite les actions suivantes :

- construction ou mise en fiche de soutènements pour tranchée couverte ;
- étanchement de sols : bouchons étanches sous le fond de fouille en tranchée couverte et aux tympans des stations dans le cas d'un creusement au tunnelier ;
- confortement des sols, soit pour constituer un écran ou un soutènement, soit pour consolider un terrain ;
- drainage de la nappe, pompage et rejet des eaux pompées ;
- terrassements, comprenant les déblais mais aussi les remblais, qui peuvent ne pas être de réemploi ;
- creusement de tunnels au tunnelier ;
- creusement de tunnels avec des méthodes autres, dont l'abattage à l'explosif ;
- mise en œuvre de produits d'étanchéité des structures définitives.



©AFTES TOS.

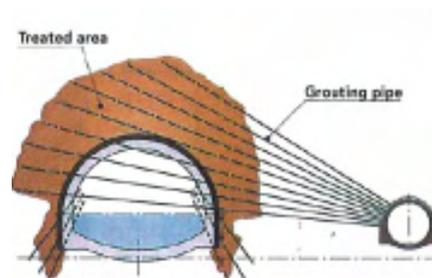


Figure 1 - Exemple de mise en place de produits d'étanchéité

L'exploitation normale des structures souterraines nécessite essentiellement les actions liées au nettoyage et à l'assainissement, à savoir l'évacuation dans le réseau d'assainissement des eaux :

- de ruissellement, récupérées en pied d'escalier, dans les ouvrages de ventilation, dans les fosses d'ascenseurs ;
- de lavage de certains locaux (local entretien, locaux techniques) ;
- des sanitaires (WC, douches, lavabos, etc.) ;
- d'infiltration en tunnel des eaux de la nappe par les défauts d'étanchéité ;
- de drainage permanent si c'est ce principe de construction qui a été retenu.

L'exploitation sur le long terme de structures souterraines peut nécessiter deux sortes d'interventions :

- réparation lourde des défauts d'étanchéité constatés en cas d'aggravation inacceptable et si ceux-ci ont entraîné une dégradation des structures, réparation des structures concernées ;
- modification des structures pour différentes raisons, comme l'évolution de la réglementation, l'évolution du trafic, le changement de matériel roulant ou de système d'exploitation.

III.2 - Constructions en surface

Les **constructions en surface** incluent bien évidemment les constructions en élévation que sont les viaducs ou les plates-formes sur remblai de grande hauteur, mais aussi les dépôts et ateliers nécessaires à l'entretien du matériel roulant.

Ces constructions nécessitent les actions suivantes :

- décapage de la couche superficielle (revêtement de voirie, terre végétale, friche industrielle ou autres...) ;
- déviation de réseaux de concessionnaires ;
- purge éventuelle de terrains non portants (vase, dépôts limoneux, dépôts anthropiques, déchets...) ;
- remblaiement de hauteur variable ;
- constitution des couches de fondation, de forme et du revêtement (ballast, béton, béton bitumineux, dallage, pavés, gazon, etc.) ;
- constructions diverses : murs de soutènements, ponts, viaducs, trémies ponctuelles, etc. ;
- aménagements des espaces connexes.

En phase exploitation on ne note pas de différence dans la nature et l'intensité de la pollution des eaux par rapport à celle des voiries courantes.

Il n'y a de spécificité des transports en commun par rapport aux autres usagers de la surface qu'une part de pollution bien moindre.

IV - CLASSIFICATION DES ACTIONS EN FONCTION DES POLLUTIONS

Les actions citées plus haut sont répertoriées pour chaque type de construction (souterrain ou surface) ainsi qu'en regard de chacune d'elles, le type de pollution qui peut se produire, l'impact sur l'environnement en fonction de la destination des eaux de percolation au contact de la zone concernée ou de la source des eaux extraites.

On distinguera les pollutions accidentelles et les pollutions inhérentes.

Les risques de pollution évoqués ci-dessus sont tous, mise à part l'erreur humaine purement accidentelle, des risques globalement maîtrisables si les études depuis l'amont du projet ont été menées dans une démarche de développement durable.

Les études hydrogéologiques viennent en premier chef, suivies des études d'impact.

On notera au passage l'importance de l'enquête réseaux de concessionnaires.

IV.1 - Constructions souterraines – Phase Construction (Tableau 1 en annexe)

Le choix des procédés de construction intégrant les traitements de sol et leurs conséquences dans toutes les étapes de la construction (soutènement, terrassement, rabattement de nappe, drainage de fond de fouille, etc.) est crucial pour la limitation ou l'élimination des pollutions.

Si certains types de traitement ne peuvent être évités, des études hydrogéologiques complémentaires doivent permettre en phase de réalisation de préciser les conditions de sol et d'écoulement de la nappe aux endroits concernés, pour éviter les déboires recensés plus haut.

Enfin, dans le choix des produits, l'entreprise devra opter systématiquement pour la prudence maximale en fonction des objectifs à atteindre. Une observation des tendances de la réglementation à l'étranger ou dans d'autres localités doit la conduire à éviter d'utiliser des produits qui sont encore autorisés sur le site concerné mais déjà interdits ailleurs ou interdits pour des sites de niveau 3.

La mise au point de procédures d'application parfaitement adaptées au site et au procédé d'exécution - et leur strict respect en phase construction - sont bien évidemment le complément indispensable à l'atteinte de l'objectif de pollution minimale.

IV.2 - Constructions souterraines – Phase Exploitation (Tableau 2 en annexe)

En phase exploitation normale, il ne s'agit plus de risques mais de fonctionnement productif de pollutions.

Les niveaux de pollution des milieux 1 à 3 sont déterminés par les choix faits au moment de la conception. On note en particulier un choix important qui peut être de rejeter toutes les eaux recueillies dans la structure dans un même poste de relevage. Les eaux ainsi rejetées dans le réseau d'assainissement de surface contiendront aussi bien des eaux-vannes que des eaux de drainage de tunnel contenant des produits chimiques issus de la synérèse de coulis d'injection.

Quant à la pollution liée aux réparations lourdes, elle est de même nature que celle rencontrée en phase de construction. Il faut signaler que, sauf cas particulier, les choix de procédés de construction, leur mise en œuvre et le contrôle tant intérieur qu'extérieur des travaux doivent

permettre d'éviter des désordres d'étanchéité et de structures nécessitant des interventions lourdes affectant la nappe.

Certaines constructions bien connues de l'auteur, malgré de longues années d'existence, sont toujours en parfait état et ne requièrent qu'une maintenance légère et ordinaire.

IV.3 - Constructions de surface – Construction et exploitation (Tableau 3 en annexe)

La lecture du tableau 3 montre que les structures de surface présentent des risques inhérents très faibles comparativement à ceux des constructions souterraines. Il s'ensuit que les risques de pollution directe ou indirecte (par le réseau d'assainissement) sont majoritairement des risques dits accidentels mais qui sont en fait des risques liés au manque de prise de conscience des acteurs.

La gestion actuelle des projets sous une pression économique sans précédent à tous les niveaux, maître d'ouvrage, ingénierie, maîtrise d'œuvre et entreprise, entraîne de nombreuses conséquences qui sont sources potentielles, entre autres effets, de pollution pour la nappe.

Citons les délais qui ne laissent pas le temps de mettre en œuvre des mesures de protection du milieu naturel, les coûts qui conduisent à un allègement des contrôles aussi bien chez les maîtres d'œuvre que chez les entreprises et à un défaut de formation et de sensibilisation des personnels exécutants.

V - CONCLUSION

Malgré le développement depuis deux décennies du débat sur le développement durable, la gestion des ressources et autres questions environnementales, les conditions économiques et le décalage entre la réflexion initiale et l'entrée en application des grandes orientations ont pour effet de retarder une prise en compte globale de tous les axes de protection de l'environnement.

L'espoir d'une prise de conscience allant jusqu'à la mise en pratique parfaitement contrôlée, réside dans le constat que commencent à faire nombre d'acteurs de la construction, à savoir que protection de l'environnement et développement durable sont concourants avec de substantiels gains de productivité et de coûts sociaux s'ils sont traités dès la conception des projets et suivis jusqu'au parfait achèvement de l'ouvrage. ■

BIBLIOGRAPHIE

Revue Tunnels et ouvrages Souterrains (TOS AFTES).

ANNEXES

Tableau 1 : Constructions souterraines – Phase Construction

Tableau 2 : Constructions souterraines – Phase Exploitation

Tableau 3 : Constructions de surface – Construction et exploitation

PHASES / ACTIONS	TYPES DE POLLUTION		NIVEAU DE RISQUE			DURÉE	RÉSOLUTION
	POLLUTIONS ACCIDENTELLES	POLLUTIONS INHÉRENTES	Niveau 3	Niveau 2	Niveau 1		
(Tableau 1)			Impact sur les eaux rejetées dans le système d'assainissement.	Impact sur les eaux du milieu naturel.	Impact sur eaux à proximité immédiate d'une construction de captage ou transport d'eau potable.		
PHASE CONSTRUCTION							
Construction ou mise en fiche de soutènements							
Battage ou vibrofonçage de palplanches ou pieux.	Introduction de souillures chimiques (produits pétroliers essentiellement) et de souillures bactériennes (interception de collecteurs d'assainissement non repérés ou traversée de terrains pollués).	(Pour mémoire pour les parois moulées Mise en dépôt spécialisé de déblais imprégnés de bentonite)	Eau de lavage des salissures en surface.	Pollution chimique et/ou bactérienne de nappe.	Peu probable sauf pour des canalisations mal identifiées, des précautions particulières étant toujours prises à proximité des champs de captage.	Fonction de l'écoulement de la nappe et de sa capacité de dispersion ou d'auto-épuration.	Amont par approfondissement des reconnaissances de sols et de réseaux enterrés. Aval par traitement préalable des contraintes locales et application de procédures spécialement adaptées.
Perforation de tranchées pour parois moulées.							
Traitement de sols							
Confortement par injection de ciment.		Charges minérales du coulis de ciment.	Pas d'impact sensible sauf excédent de charge de rejet.	Pas d'impact sensible.	Pas d'impact sensible.		Les risques sont inverses : l'écoulement de la nappe peut en effet diluer le coulis, l'empêchant ainsi de faire prise et de remplir son rôle. Importance à nouveau des études amont sur les vitesses d'écoulement ou les cheminement préférentiels.
Soutènement par colonnes de jet grouting.							

Tableau 1 - Constructions souterraines – Phase Construction

PHASES / ACTIONS (Tableau 1, suite 1)	TYPES DE POLLUTION		NIVEAU DE RISQUE			DURÉE	RÉSOLUTION
	POLLUTIONS ACCIDENTELLES	POLLUTIONS INHÉRENTES	Niveau 3	Niveau 2	Niveau 1		
PHASE CONSTRUCTION							
Injections de sols en vue de leur étanchement							
Injections engagées : radiers injectés.	Déversement accidentel de produits chimiques.	Coullis à base de silicates.	Certains réactifs organiques autorisés. Réactifs minéraux bicarbonates et aluminates autorisés.	Emploi de réactifs organiques non conseillé.	Emploi de réactifs organiques interdits. Bicarbonates seuls autorisés.	Modification durable des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à proximité des sols traités par injection. Migration de certains polluants.	Amont, par approfondissement des reconnaissances de sols, des études d'écoulement de nappe et par l'adaptation des procédés de construction au site.
	Entraînement des produits dans les eaux de lavage des dispositifs d'injection. Mauvais dosage des mélanges de produits.		Attention aux excédents de certains composants dans les eaux de pompage pour le drainage du fond de fouille.	Réactifs minéraux bicarbonates et aluminates autorisés.			
Injections engagées : bouchon d'entrée/sortie de tunnelier dans un puits ou une station, injections pour préparation du terrain avant creusement d'un tunnel.	Dilution, cheminement et entraînement des coullis hors de la zone traitée par des circulations d'eau.	Résines chimiques polymérisées.	Autorisées avec comme critère limitant, les monomères résiduels (non polymérisés). Epoxy Polyuréthane Acrylate Méthacrylate	Autorisées avec, comme critère limitant, les monomères résiduels (non polymérisés). Epoxy Polyuréthane Acrylate Méthacrylate	Résines ayant obtenu une attestation de conformité.	Modification durable des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à proximité des sols traités par injection. Migration de certains polluants.	Aval, par traitement préalable des contraintes locales, choix des produits d'injection et application de procédures spécialement adaptées.
	Dégradation des gels par agressivité du milieu, ou présence de matières organiques empêchant la gélification.						

Tableau 1 (suite 1) - Constructions souterraines – Phase Construction

PHASES / ACTIONS	TYPES DE POLLUTION		NIVEAU DE RISQUE			DURÉE	RÉSOLUTION
	POLLUTIONS ACCIDENTELLE	POLLUTIONS INHÉRENTES	Niveau 3	Niveau 2	Niveau 1		
PHASE CONSTRUCTION							
Terrassements et creusements							
Pompages de rabattement, de drainage de fond de fouille.	Déversement accidentel de produits chimiques.	En cas de traitement préalable des sols par injection, possibilité de dissolution ou d'entraînement de produits dans les eaux pompées.	Rejet au réseau d'assainissement d'eaux chargées ou polluées chimiquement.	Rejet dans le milieu naturel d'eaux chargées ou polluées chimiquement.	NA	Modification durable des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à proximité des sols traités par injection. Migration de certains polluants.	Amont, par approfondissement des reconnaissances de sols, des études d'écoulement de nappe et par l'adaptation des procédés de construction au site. Aval, par traitement préalable des contraintes locales, choix des produits d'injection et application de procédures spécialement adaptées.
Terrassements en tranchées couvertes.	Déversement accidentel de produits chimiques. Traversée d'horizons pollués (dépôts anthropiques, décharges municipales ou industrielles).	Aucune, <i>a priori</i>	Rejet au réseau d'assainissement d'eaux chargées ou polluées chimiquement.	Rejet dans le milieu naturel d'eaux chargées ou polluées chimiquement.	NA	Modification durable des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à proximité des travaux en zone polluée. Migration de certains polluants (lixiviats).	Amont, par approfondissement des reconnaissances de sols, des études d'écoulement de nappe et par l'adaptation des procédés de construction au site. Aval, par traitement préalable des contraintes locales et application de procédures spécialement adaptées.

Tableau 1 (suite 2) - Constructions souterraines – Phase Construction

PHASES / ACTIONS	TYPES DE POLLUTION		NIVEAU DE RISQUE			DURÉE	RÉSOLUTION
	POLLUTIONS ACCIDENTELLES	POLLUTIONS INHÉRENTES	Niveau 3	Niveau 2	Niveau 1		
PHASE CONSTRUCTION							
Terrassements et creusements (suite 1)							
Creusement de tunnels au tunnelier à pression de terre.		Additifs dans la chambre d'excavation pour amélioration des caractéristiques du terrain excavé (tensioactifs et fluidifiants).	Pas d'impact sensible dans la nappe. Mise en dépôt des terres excavées sans contraintes particulières vu le dosage très faible de produits biodégradables.	NA			Pas d'impact sensible.
	Creusement de tunnels au tunnelier à pression de boue.	Boue bentonitique qui assure la tenue du front de taille et le marinage des déblais.	Rejet au réseau d'assainissement d'eaux chargées en bentonite malgré le passage en centrale de traitement.	Migration importante de la bentonite dans un milieu de granulométrie trop ouverte. Dépôt de déblais imprégnés de bentonite en milieu naturel sous contrôle et autorisation spéciale	NA	Faible pour les rejets et les migrations. Longue pour les dépôts de déblais.	La pollution du réseau d'assainissement par des eaux chargées en bentonite peut être facilement contrôlée par une application très rigoureuse des procédures (bacs de décantation complémentaires). Les migrations accidentelles de bentonite dans des horizons crus font partie des risques géotechniques qui peuvent être réduits par des reconnaissances approfondies et des choix de tracé adaptés. Les dépôts de déblais pollués sont inhérents au procédé ; le choix des sites de dépôt est la seule possibilité d'atténuation.

Tableau 1 (suite 3) - Constructions souterraines – Phase Construction

PHASES / ACTIONS	TYPES DE POLLUTION		NIVEAU DE RISQUE			DURÉE	RÉSOLUTION
	POLLUTIONS ACCIDENTELLES	POLLUTIONS INHÉRENTES	Niveau 3	Niveau 2	Niveau 1		
PHASE CONSTRUCTION							
Terrassements et creusements (suite 2)							
Creusement de tunnels par autres méthodes.	Déversement accidentel de produits chimiques. Pollution par les engins de terrassement (produits pétroliers).	En cas de traitement préalable ou à l'avancement des sols par injection, possibilité de dissolution ou d'entraînement de produits dans les eaux pompées et dans la nappe.	Mêmes conditions et critères que pour les injections correspondantes.	Mêmes conditions et critères que pour les injections correspondantes.	Mêmes conditions et critères que pour les injections correspondantes.	Voir ci-dessus les commentaires sur les injections.	Voir ci-dessus les commentaires sur les injections.
			Mêmes conditions et critères que pour les injections correspondantes.	Mêmes conditions et critères que pour les injections correspondantes.	Mêmes conditions et critères que pour les injections correspondantes.	Voir ci-dessus les commentaires sur les injections.	Voir ci-dessus les commentaires sur les injections.
Étanchéité des structures.	Déversement accidentel de solvants.	Migration des composants contenus dans les membranes d'étanchéité.	NA	Impact localisé en concentration mais migration lointaine en faible concentration.	NA	Longue.	Choix des matériaux les plus stables et sans toxicité des composants volatiles à forte dilution.

Tableau 1 (fin) - Constructions souterraines – Phase Construction

PHASES / ACTIONS	TYPES DE POLLUTION		NIVEAU DE RISQUE			DURÉE	RÉSOLUTION
	POLL. ACCIDENTELLES	POLLUTIONS INHÉRENTES	Niveau 3	Niveau 2	Niveau 1		
(Tableau 2 début)			Impact sur les eaux rejetées dans le système d'assainissement.	Impact sur les eaux du milieu naturel.	Impact sur eaux à proximité construction de captage ou transport d'eau potable.		
PHASE EXPLOITATION NORMALE							
Eaux de ruissellement							
Eau de pluie directement tombée dans les émergences à ciel ouvert ou véhiculée par les usagers.	Déversements accidentels de produits polluants en voirie.	Pollution courante des revêtements de voirie	Risque faible en temps normal quoique les eaux de surface soient de plus en plus polluées par les hydrocarbures, les produits de combustion, les métaux lourds, etc.	NA	NA	Brève si ces eaux sont traitées en station d'épuration, longue si ces eaux sont rejetées dans le milieu naturel sans traitement (cas des déversoirs d'orage).	Dans la mesure du possible, rehausser la première marche des escaliers et le périmètre des autres émergences, et régler les formes de pente pour limiter le plus possible les entrées d'eau par ruissellement. Caler tous les niveaux pour échapper aux crues. Prévoir un dispositif exceptionnel de protection (pompiers) pour les cas de pollution accidentelle.
Eau de ruissellement aboutissant à ces émergences.			Fort en cas de pollution accidentelle forte.				
Eaux en provenance des cours d'eau, en cas d'inondation ou de débordement.							
Eaux liées à l'activité interne aux stations							
Lavage des locaux.	Déversements accidentels de produits polluants.	Charges courantes en nettoyage	Pas d'impact sensible sauf excédent accidentel.	NA	NA	Brève si ces eaux sont traitées en station d'épuration, longue si ces eaux sont rejetées dans le milieu naturel sans traitement (cas des déversoirs d'orage)	
Eaux en provenance des sanitaires.		Pollution bactérienne	Pas d'impact sensible en système séparatif ou unitaire.	NA	NA		

Tableau 2 - Constructions souterraines – Phase Exploitation

PHASES / ACTIONS (Tableau 2 fin)	TYPES DE POLLUTION		NIVEAU DE RISQUE			DURÉE	RÉSOLUTION
	POLLUTIONS ACCIDENTELLES	POLLUTIONS INHÉRENTES	Niveau 3	Niveau 2	Niveau 1		
PHASE EXPLOITATION NORMALE							
Eaux en provenance du drainage des structures							
Eaux d'infiltration par défaut d'étanchéité.		<p>Pollution identique à celle de la nappe environnante, c'est-à-dire faible en tranchée couverte sans traitement de sol particulier, plus ou moins forte en tunnel en fonction du mode de creusement et des traitements de sols préalables.</p> <p>La construction au tunnelier nécessite peu ou pas de traitement de sols, et les joints entre voussoirs sont relativement étanches.</p> <p>La construction traditionnelle en nécessite souvent davantage, et le revêtement présente des reprises de bétonnage qui peuvent être le siège de fuites.</p>	Faible quantité. Pas d'impact sensible.	NA	NA	Faible grâce au colmatage naturel ou au traitement interne de réparation des fuites.	Choisir en connaissance de cause le degré de fuites admissible en fonction du contexte et de la durabilité de l'ouvrage.
Eaux en provenance de systèmes de drainage permanent de la nappe.			En cas de fortes quantités de produits en dilution, impact sensible.	NA	NA	Longue durée.	Proscrire les systèmes de drainage permanent dans le cas des tunnels traditionnels.
PHASE EXPLOITATION LOURDE							
Tous travaux.		Mêmes pollutions que pour des travaux neufs, accentuées parfois par la complexité du travail.	Mêmes niveaux de risques en fonction de la nature des travaux réalisés.				<p>Concevoir des ouvrages comportant une bonne adéquation entre les investissements, les coûts d'exploitation et leur durée de vie.</p> <p>Concevoir des ouvrages faciles à modifier en cas de besoin.</p>

Tableau 2 (fin) - Constructions souterraines – Phase Exploitation

PHASES / ACTIONS	TYPES DE POLLUTION		NIVEAU DE RISQUE			DURÉE	RÉSOLUTION
	POLLUTIONS ACCIDENTELLES	POLLUTIONS INHÉRENTES	Niveau 3	Niveau 2	Niveau 1		
(Tableau 3)			Impact sur les eaux rejetées dans le système d'assainissement.	Impact sur les eaux du milieu naturel.	Impact sur les eaux à proximité immédiate d'une construction de captage ou transport d'eau potable.		
PHASE CONSTRUCTION							
Terrassements et creusements							
Terrassements	Déversement accidentel de produits chimiques. Traversée d'horizons pollués (dépôts anthropiques, décharges municipales ou industrielles).	Aucune, <i>a priori</i> .	Rejet au réseau d'assainissement d'eaux chargées ou polluées chimiquement.	Rejet dans le milieu naturel d'eaux chargées ou polluées chimiquement.	NA	Modification durable des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à proximité des travaux en zone polluée. Migration de certains polluants (lixiviats).	Amont, par approfondissement des reconnaissances de sols et par l'adaptation des méthodes de construction au site. Aval, par traitement préalable des contraintes locales et application de procédures spécialement adaptées.
Construction de la plateforme							
Plate-forme en béton, ballast, béton bitumineux, etc.	Pas de risques spécifiques.						
Revêtement de plate-forme en béton désactivé	Traitement à l'acide non maîtrisé.		Risque mesuré, en raison du degré de dilution.				Application des procédures, et surveillance des chantiers.
PHASE EXPLOITATION							
Pas de risques spécifiques autres que ceux d'une exploitation de voirie ordinaire.							

Tableau 3 - Constructions de surface – Construction et exploitation

Dynamique du carbone organique dissous dans les nappes souterraines à l'aplomb de bassins d'infiltration

Florian Malard ⁽¹⁾, Arnaud Foulquier ⁽¹⁾, Thibault Datry ⁽²⁾

⁽¹⁾ UMR CNRS 5023, Écologie des Hydrosystèmes Fluviaux – Université Lyon I, Bât. Forel, 43, boulevard du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex, France
malard@univ-lyon1.fr - arnaud.foulquier@univ-lyon1.fr

⁽²⁾ CEMAGREF, Biologie des Écosystèmes Aquatiques – 3 bis, quai Chauveau 69336 Lyon Cedex 09, France - datry@lyon.cemagref.fr

I. INTRODUCTION

Désormais pratiquée dans de nombreuses agglomérations, l'infiltration artificielle des eaux de ruissellement pluvial doit permettre :

- 1) d'évacuer des flux d'eau très importants en période pluvieuse ;
- 2) de retenir et de dégrader les polluants organiques et métalliques provenant du lessivage de l'atmosphère et des surfaces urbaines ;
- 3) de recharger les nappes urbaines très sollicitées, sans toutefois affecter leur qualité.

Selon (1), plus de 10 millions de m³ d'eau de ruissellement pluvial seraient infiltrés chaque année dans les nappes phréatiques de l'agglomération lyonnaise. Les bassins d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial sollicitent pleinement les capacités d'épuration du sol, de la zone non saturée et des niveaux supérieurs de la nappe puisqu'ils consistent à infiltrer rapidement (temps de rétention < 2 jours) sur des surfaces réduites (surface de bassin < 1 ha) des quantités massives d'eau contaminée généralement collectées sur de grands bassins versants urbains (surface > 100 ha). Selon (1), les flux de carbone organique dissous (COD) atteignant la surface libre de la nappe sous un petit bassin d'infiltration de l'agglomération lyonnaise (bassin-versant : 2,5 ha) seraient 300 fois supérieurs à ceux mesurés sur un site de référence.

Un apport excessif de COD biodégradable au toit des nappes peut stimuler fortement les respirations microbiennes et provoquer ainsi une disparition de l'oxygène dissous (OD) dans les horizons supérieurs de la nappe (2). Le COD en excès et les produits des respirations anaérobies (NH₄⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, HS⁻, CH₃⁻) peuvent alors migrer à l'aval des ouvrages d'infiltration et/ou en profondeur dans la nappe.

Les exemples de désoxygénation partielle des eaux souterraines à l'aplomb d'ouvrages d'infiltration sont courants dans la littérature (3, 4) mais les causes exactes de cet appauvrissement en oxygène ont rarement été élucidées. Le modèle conceptuel le plus souvent évoqué afin de comprendre les relations entre COD et OD au toit des nappes suppose que les respirations ont effectivement lieu dans la nappe lorsque la concentration en COD des eaux souterraines augmente. Alternativement, l'augmentation des concentrations en COD peut traduire un apport de COD réfractaire non directement respirable par les communautés microbiennes. Les désoxygénations observées traduiraient alors un apport d'eau appauvrie en OD mais la consommation d'oxygène interviendrait au sein de l'ouvrage d'infiltration, dans le sol et/ou la zone non saturée (ZNS).

L'objectif de cette communication est de présenter les résultats des mesures effectuées à l'aplomb de plusieurs bassins d'infiltration de l'agglomération lyonnaise dans le cadre de l'observatoire de terrain en hydrologie urbaine (OTHU). Il s'agit plus spécifiquement de :

- 1) quantifier l'enrichissement en COD et l'appauvrissement en OD des eaux souterraines à l'aplomb de bassins d'infiltration ;
- 2) d'apporter des éléments de réponse sur les mécanismes à l'origine des désoxygénations observées.

II. MATÉRIELS ET méthodes

II.1 Sites étudiés

La nappe de l'Est lyonnais couvre une zone de 400 km² (Fig. 1). Elle est subdivisée en 3 couloirs fluvio-glaciaires séparés par des buttes morainiques. Les perméabilités des trois couloirs fluvio-glaciaires sont assez homogènes ($7 \cdot 10^{-3}$ à 10^{-2} m/s) et bien supérieures à celles des buttes morainiques (10^{-8} à 10^{-4} m/s) (5).

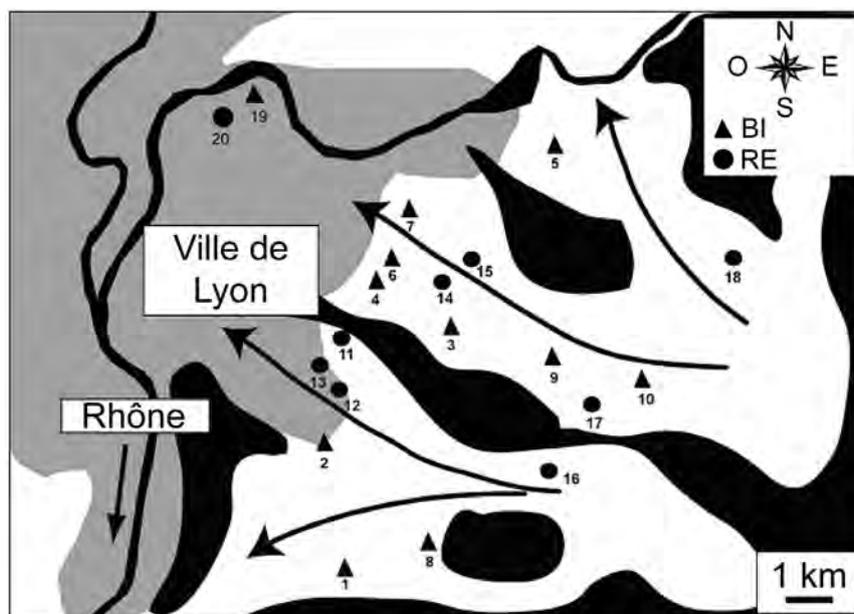


Figure 1 - Localisation des bassins d'infiltration (BI) et sites de références (RE) échantillonnés au sein de l'agglomération lyonnaise.

Les flèches schématisent le sens d'écoulement de la nappe au sein des 3 couloirs fluvio-glaciaires. Les moraines sont figurées en noir.

L'étude est menée sur 20 sites, 12 bassins d'infiltration et 8 sites de référence, tous situés sur la nappe de l'Est lyonnais.

Les sites de références correspondent à des secteurs de la nappe non influencés par une infiltration induite des eaux de ruissellement pluvial. La superficie drainée par les bassins d'infiltration varie de 2,5 à 185 ha et l'épaisseur de la ZNS sous ces bassins varie de 2 à 20 m.

II.2 Dispositifs de mesure

L'ensemble du dispositif de mesure a été installé dans le cadre de l'observatoire de terrain en hydrologie urbaine (OTHU : 6, 7). Chaque site est doté d'un piézomètre permettant d'effectuer des prélèvements d'eau dans le premier mètre de sédiment sous la surface libre de la nappe.

Les piézomètres sont équipés d'une sonde multiparamétrique YSI 600 XLM qui enregistre la hauteur d'eau, la conductivité, la température, l'oxygène dissous, le pH et le potentiel d'oxydoréduction. Deux bassins d'infiltration et 2 sites de référence sont équipés d'une flûte de pan à 5 piézomètres permettant d'obtenir des prélèvements aux profondeurs de 1, 2, 3, 4 et 5 m sous la surface de la nappe (résolution verticale métrique) (8). Dix-huit flûtes de pan à 5 piézomètres ont été insérées sur 3 bassins d'infiltration et 3 sites de référence afin d'obtenir des profils verticaux de concentration à une échelle décimétrique (*i.e.* 20, 40, 60, 80 et 100 cm sous la surface libre de la nappe).

Les prélèvements d'eau de nappe sont effectués sur les bassins et sites de référence lors des périodes de temps sec et des épisodes pluvieux. Certains épisodes pluvieux sont l'objet d'un suivi temporel permettant de préciser les changements physico-chimiques des eaux souterraines lors de l'écoulement du panache d'eau pluviale à l'aplomb des bassins d'infiltration. Le carbone organique dissous (filtration à 0,45 µm) est mesuré par oxydation par voie humide et/ou catalytique et détection dans un analyseur à infrarouge (9).

II.3 Analyses statistiques

Les résultats sont soumis à une analyse de variance permettant de tester l'influence sur les concentrations en COD et en oxygène dissous dans la nappe des facteurs « type de site » (bassin d'infiltration ou site de référence), « catégorie d'épaisseur de ZNS » (< ou > 10 m) et de leur possible interaction.

III. RÉSULTATS

III.1 Différence de concentrations en COD et en oxygène dissous dans la nappe entre les bassins d'infiltration et les sites de référence

L'infiltration des eaux pluviales enrichit localement les eaux souterraines en COD et diminue les concentrations en OD (ANOVA, $p < 0,001$) (Fig. 2).

Les différences observées entre bassins et sites de référence dépendent toutefois de l'épaisseur de la ZNS.

L'enrichissement en COD et l'appauvrissement en OD sont d'autant plus marqués que l'épaisseur de la ZNS est faible.

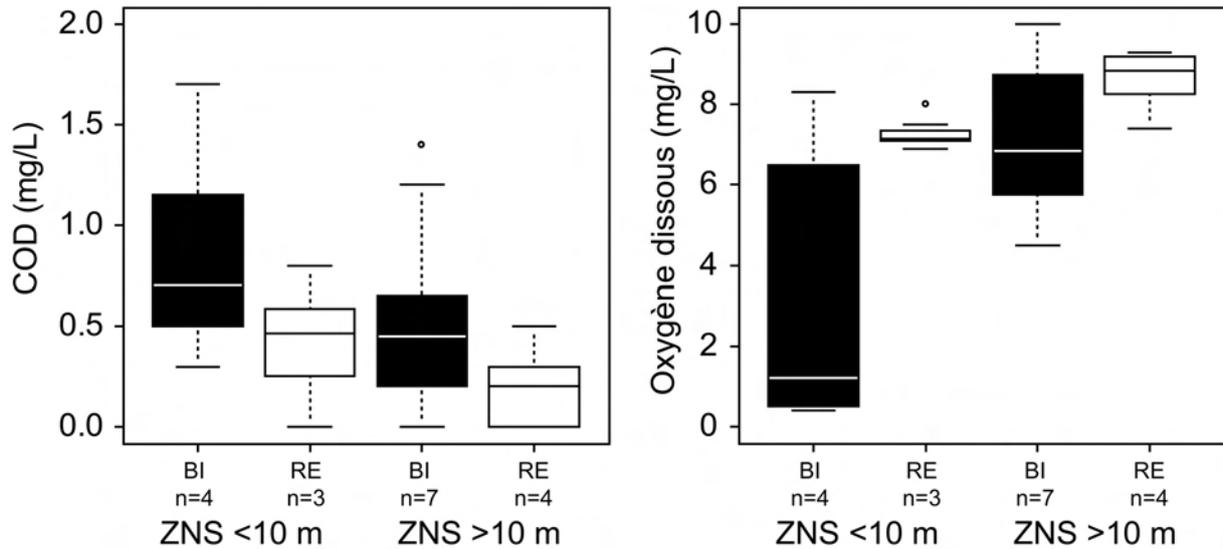


Figure 2 - Concentration en carbone organique dissous (COD) et en oxygène dissous dans la nappe à l'aplomb des bassins (BI) et des sites de référence (RE) pour une épaisseur de zone non saturée (ZNS) inférieure et supérieure à 10 m.

III.2 Profils verticaux de concentrations sous la surface libre de la nappe

L'enrichissement en COD intervient dans les 2 premiers mètres sous la surface libre de la nappe lors des épisodes pluvieux (Fig. 3). Il n'y a pas ou peu de différences de concentration en COD entre les sites de référence et les bassins d'infiltration : i) lors des périodes de temps sec ; ii) en profondeur dans la nappe (au-delà de 2 mètres).

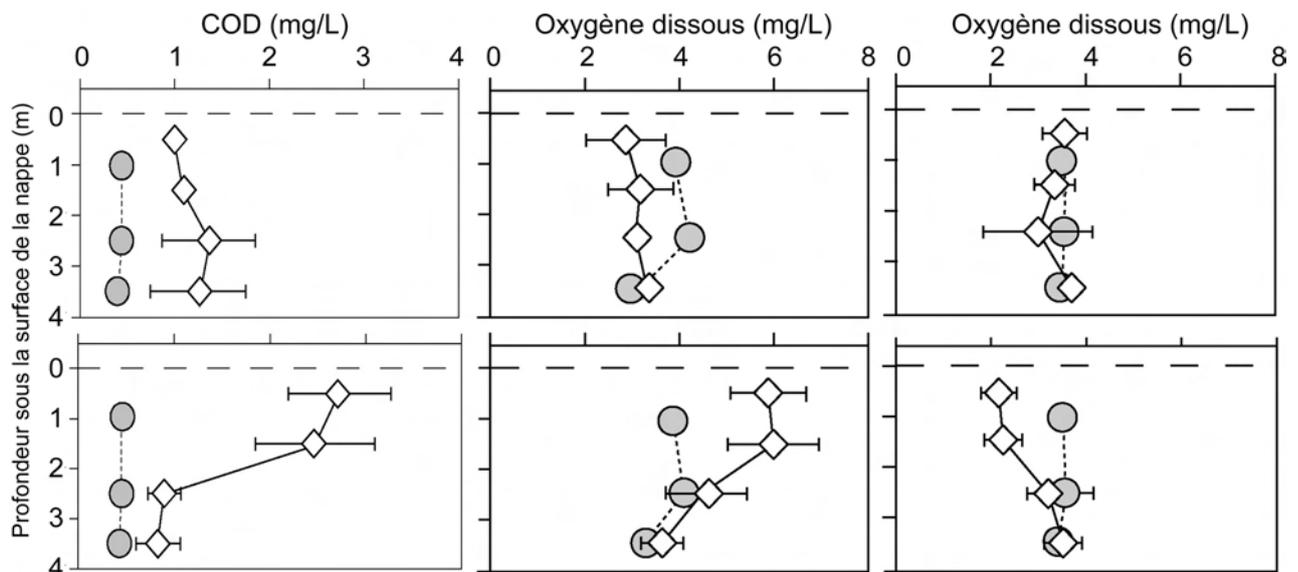


Figure 3 - Profils verticaux des concentrations en carbone organique dissous (COD) et en oxygène dissous dans la nappe à l'aplomb du bassin d'infiltration de l'IUT (losanges blancs) et de son site de référence (cercles gris).

Panneaux du haut : étiage ; panneaux du bas : épisodes pluvieux.

Oxygène dissous : panneaux du centre : épisodes pluvieux hivernaux (froids) ; panneaux de droite : épisodes pluvieux estivaux (chauds).

L'augmentation des concentrations en COD dans les horizons supérieurs de la nappe est observée à la fois durant les épisodes pluvieux hivernaux (froids) et estivaux (chauds). Au contraire, les profils verticaux de la concentration en OD se modifient au cours des saisons. Les épisodes pluvieux froids engendrent une oxygénation de la nappe alors que les épisodes pluvieux chauds induisent une baisse de la concentration en OD dans la nappe.

III.3 Suivi temporel des concentrations lors d'un épisode pluvieux

La figure 4 décrit les changements lors d'un épisode pluvieux des profils verticaux en COD à l'aplomb d'un bassin. Le suivi conjoint des concentrations en bicarbonates permet d'estimer la proportion d'eau infiltrée dans la nappe car les eaux pluviales sont plus faiblement minéralisées que les eaux souterraines. L'extension verticale du panache d'eau pluviale à l'aplomb du bassin n'excède pas 2 m. Au-delà de cette profondeur, aucune variation de la concentration en COD n'est observée au cours de l'épisode pluvieux.

Les concentrations les plus élevées en COD sont mesurées dans le premier mètre sous la surface de la nappe lorsque la proportion d'eau pluviale est maximale. Les différences de concentration entre profondeurs se résorbent progressivement lors de l'écoulement du panache d'eau pluviale à l'aplomb du bassin d'infiltration. L'examen des profils en COD dans le premier mètre sous la surface de la nappe (résolution décimétrique) ne montre aucune décroissance verticale de la concentration en COD lorsque la proportion d'eau pluviale ne varie pas avec la profondeur (*i.e.* profil vertical homogène de la concentration en bicarbonates) (Fig. 4).

IV. DISCUSSION

Les apports de matière organique dissous au toit de la nappe à l'aplomb des bassins d'infiltration peuvent paraître faibles car l'augmentation de la concentration en COD dans la nappe est modérée ($< 0,5$ mg/L COD). Cette première impression est toutefois tempérée si les apports sont exprimés sous la forme de flux car les quantités d'eau infiltrée par m^2 à l'aplomb des bassins d'infiltration sont 10 à 100 fois supérieures à celles infiltrées sur les sites de référence.

L'importance des apports est fonction non seulement de l'épaisseur de la ZNS (10) mais également du dimensionnement de l'ouvrage, notamment du ratio de la surface du bassin-versant à la surface du lit d'infiltration.

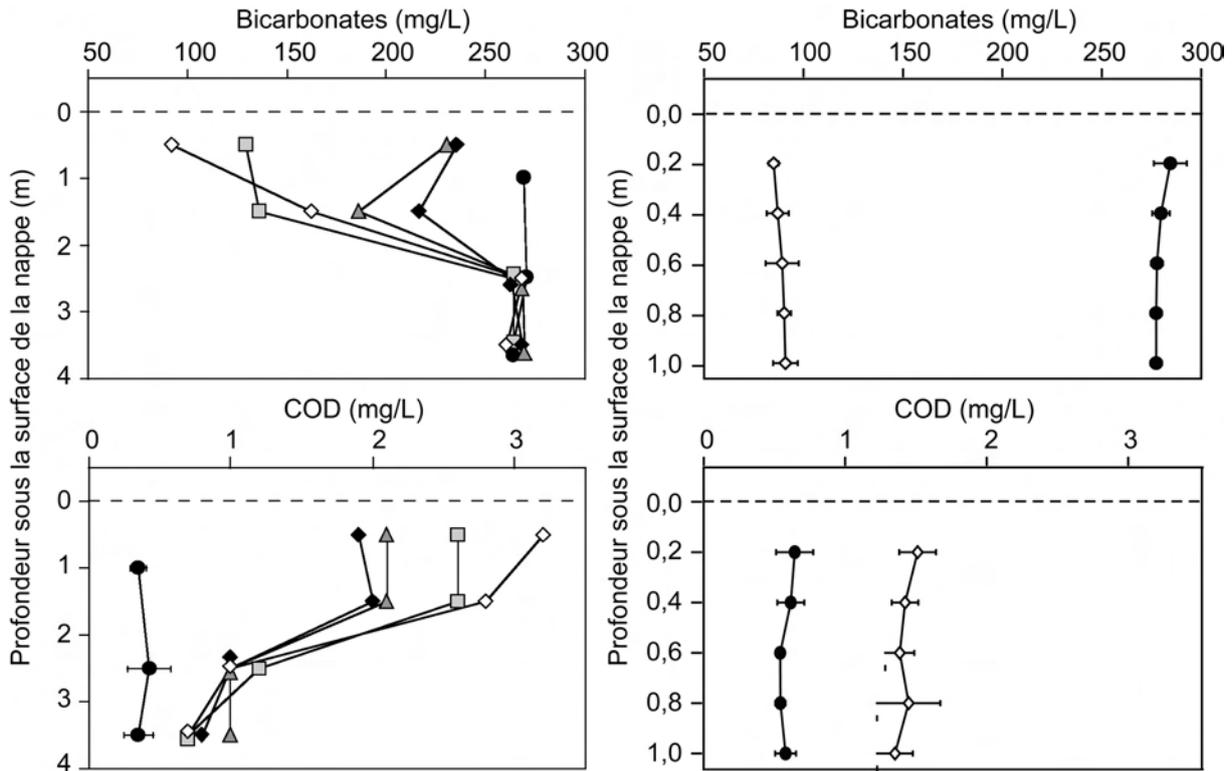


Figure 4 - Changement au cours du temps lors d'un épisode pluvieux des profils verticaux de concentrations en bicarbonates et en carbone organique dissous dans la nappe à l'aplomb du bassin d'infiltration de l'IUT et de son site de référence (cercles noirs). Panneaux de gauche : épisode du 28 juin 2002, résolution verticale métrique. Les losanges blancs, carrés gris, triangles gris et losanges noirs correspondent à des prélèvements effectués respectivement 12, 32, 80 et 108 heures après la pluie. Panneaux de droite : épisode pluvieux du 16 mai 2007.

L'influence de l'infiltration induite des eaux de ruissellement pluvial sur la concentration en OD varie également en fonction de l'épaisseur de la ZNS : les cas d'anoxie prolongée (> 1 mois) sont rares (3 bassins sur 11) et interviennent dans un contexte de ZNS peu épaisse (< 3 m). Les recherches se poursuivent afin de préciser les mécanismes à l'origine de l'abaissement de la concentration en OD à l'aplomb des bassins. Les résultats obtenus incitent à penser que la majeure partie du COD atteignant la nappe, y compris dans un contexte de ZNS peu épaisse, est réfractaire et stimule peu les respirations microbiennes dans la nappe. La consommation d'oxygène interviendrait principalement lors du passage des eaux de ruissellement au travers de l'interface ouvrage / sol qui est très organique (11, 12).

L'abaissement plus accentué de la concentration en OD sous les bassins lorsque la nappe est proche du sol pourrait alors traduire une ré-oxygénation insuffisante des eaux d'infiltration dans la ZNS en raison notamment de l'insuffisance du temps de transit (< 1 h). D'un point de vue opérationnel, les résultats obtenus ont permis d'identifier les principaux leviers dont dispose le gestionnaire afin de réguler les apports de COD et prévenir les risques d'anoxie prolongée à l'aplomb des bassins : i) limiter l'accumulation des sédiments urbains très organiques dans les bassins d'infiltration en améliorant l'efficacité des bassins de rétention ; ii) opter pour des structures de lit d'infiltration qui minimisent les phénomènes de lessivage du COD et la consommation d'oxygène au sein de l'ouvrage ; iii) restreindre le développement d'ouvrages d'infiltration dans des secteurs où la nappe est proche du sol ; iv) réduire la taille des bassins versants drainés lorsque la ZNS est peu épaisse (< 3 m) . ■

Références bibliographiques

- (1) **Datry T., 2003** – Urbanisation et qualité des nappes phréatiques : réponses des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau pluviale. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, Lyon, France, 216 p.
- (2) **Starr R.C., Gillham R.W., 1993** – Denitrification and organic carbon availability in two aquifers. *Ground Water*, 31: 934-947.
- (3) **Fischer D, Charles E.G., Baehr A.L., 2003** – Effects of stormwater infiltration on quality of groundwater beneath retention and detention basins. *Journal of Environmental Engineering*, 129(5) : 464 –471.
- (4) **Datry T., Malard F., Gibert J., 2004** – Dynamics of solutes and dissolved oxygen in shallow urban groundwater below a stormwater infiltration basin. *Science of the Total Environment*, 329: 215-229.
- (5) **Burgéap, 1995** – Étude de la nappe de l'Est lyonnais. Burgéap, Lyon, 71 p.
- (6) **Barraud S., Gibert J., Winiarski T., Bertrand Krajewski J.L., 2002** – Implementation of a monitoring system to measure impact of stormwater runoff infiltration. *Water Science & Technology*, 45 (3): 203-210.
- (7) **Chocat B., Bacot L., Barraud S., Breil P., Malard F., Varnier J.C., Winiarski T., 2005** – A field observatory in urban drainage : the OTHU project – five year experience. *Proceedings of the 10th International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen, Denmark, 22-26 August 2005, 8 p.
- (8) **Malard F., Datry T., 2002** – Plan d'expérimentation pour la mesure des impacts de l'infiltration des eaux pluviales sur la qualité physico-chimique et biologique des nappes en zone urbanisée. Fiche technique N°6, 4 pp. *Actes des Journées Techniques de l'OTHU*, GRAIE (ed.), 25 septembre 2002, Lyon.
- (9) **Rodier J., 1996** – *L'analyse de l'eau*. Dunod, 8^e édition, Paris.
- (10) **Datry T., Malard F., Bouger G., Gibert J., 2005** – Auto-épuration des rejets urbains de temps de pluie par les bassins d'infiltration *Hydroplus*, 153: 57-59.
- (11) **Datry T., Malard F., Vitry L., Hervant F., Gibert J., 2003** – Solute dynamics in the bed of a stormwater infiltration basin. *Journal of Hydrology*, 273: 217-233.
- (12) **Nogaro G., Mermillod-Blondin F., Montuelle B., Boisson J.-C., Bedell J.-P., Ohannessian A., Volat B., Gibert J., 2007** – Influence of a stormwater sediment deposit on microbial and biogeochemical processes in infiltration porous media. *Science of the Total Environment*, 377: 334-348.

Troisième session

USAGES THERMIQUES



La filière géothermie très basse énergie en France

Fabrice Boissier, Alain Desplan

BRGM - 3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2
f.boissier@brgm.fr - a.desplan@brgm.fr

Les pompes à chaleur connaissent un développement très important en France. Les pompes à chaleur géothermiques représentent environ 30 % du marché des maisons individuelles, mais on observe aussi des opérations de plus en plus nombreuses pour des ensembles de logements collectifs ou du secteur tertiaire. Cet article passe d'abord en revue les différentes technologies, présente les tendances observées et les perspectives du marché, et fait le point sur les dispositifs d'accompagnement mis en place par les pouvoirs publics.

I. LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE POMPES A CHALEUR GÉOTHERMIQUES

I.1 Rappel sur le principe d'une pompe à chaleur géothermique

Une pompe à chaleur – parfois désignée par l'acronyme PAC - est une machine thermodynamique permettant le transfert d'une quantité d'énergie d'une source à basse température dite « froide » vers un lieu d'utilisation à température plus élevée dite « source chaude ». La technologie des pompes à chaleur est très répandue et bien maîtrisée. Les pompes à chaleur les plus répandues sont les pompes à chaleur utilisant l'air extérieur comme source « froide », dites pompes à chaleur aérothermiques. Dans le cas des pompes à chaleur géothermiques, la source « froide » est, comme leur nom l'indique, le sous-sol (ou les eaux souterraines).

La figure 1 ci-dessous illustre le fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique utilisant pour alimenter la machine thermodynamique l'énergie électrique.

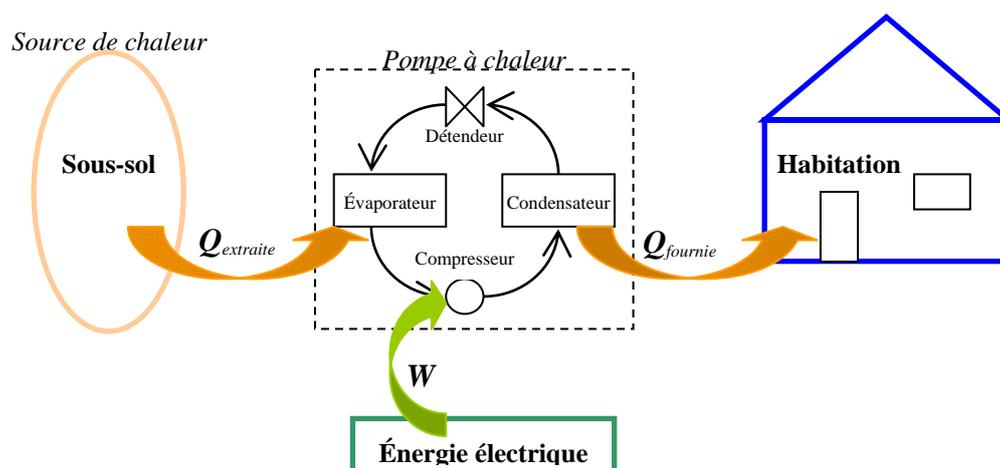


Figure 1 - Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique

Le coefficient de performance ou COP de la pompe à chaleur désigne le rapport entre la chaleur fournie et l'énergie apportée : $COP = Q_{fournie}/W$

Les valeurs de COP sont aujourd'hui classiquement supérieures à 3.

Un point est à noter : en inversant le fonctionnement de la PAC, on peut extraire de la chaleur de l'habitation et la réinjecter dans le sol : de telles pompes à chaleur sont dites réversibles et permettent donc de rafraîchir les locaux.

I.2 Les différentes technologies pour capter l'énergie du sol

Les différents types de pompes à chaleur géothermiques se distinguent par les modalités de la réalisation de l'échange de chaleur avec le sol. Deux familles sont principalement à considérer les pompes à chaleur sur échangeurs fermés d'une part, les pompes à chaleur sur eau de nappe d'autre part.

I.2.1 Les pompes à chaleur sur échangeurs fermés

L'échange de chaleur avec le sol est assuré par la circulation d'un fluide dans un capteur enterré, dont la configuration peut varier. Parmi les situations les plus répandues on a :

Les pompes à chaleur sur capteur horizontal (figure 2)

L'échangeur est un tube (en général en polyéthylène) étalé à une profondeur comprise entre 60 cm et 1 mètre lors du terrassement du jardin. La surface nécessaire d'échange est classiquement égale à une fois et demi la surface à chauffer. Cette technologie convient donc bien aux pavillons individuels.

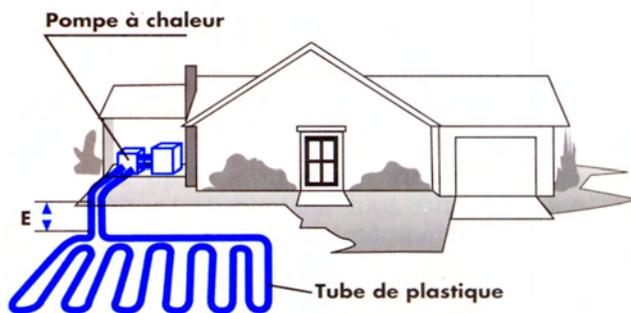


Figure 2 - Pompe à chaleur sur capteurs horizontaux

Les pompes à chaleur sur sonde verticale (figure 3)

Cette fois l'échangeur est un tube en polyéthylène haute densité disposé en double U dans un forage de petit diamètre, d'une profondeur en général entre 50 et 100 mètres. Ce tube est parcouru par de l'eau glycolée (la dénomination commerciale de la PAC est comme précédemment PAC eau glycolée/eau).

La puissance d'un tel dispositif dépend de la conductivité thermique des terrains traversés par la sonde, et vaut de l'ordre de 80 W par mètre linéaire. Si la puissance requise est importante, on peut multiplier ces dispositifs jusqu'à réaliser des champs de sonde de plusieurs dizaines de sondes.

Le fluide qui circule peut être soit directement le fluide frigorigène, la PAC est alors dite à détente directe (la dénomination commerciale de la PAC est alors PAC sol/sol si le fluide frigorigène circule aussi directement dans les planchers chauffants, ou sol/eau si il y a un circuit secondaire du côté de l'habitation), soit un circuit secondaire d'eau glycolée, avec un échangeur au niveau de la PAC (la dénomination commerciale de la PAC est alors PAC eau glycolée/eau).

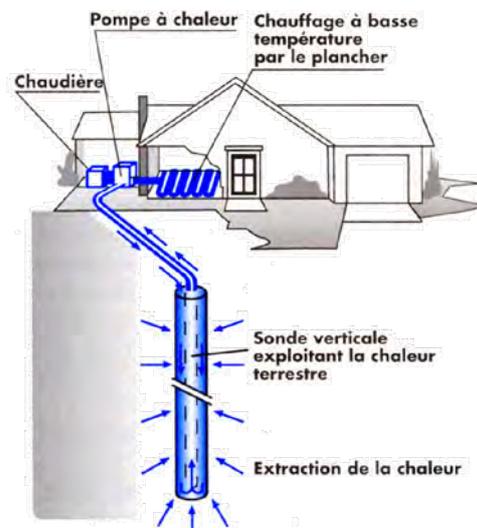


Figure 3 - Pompe à chaleur sur sonde verticale

Les pompes à chaleur sur pieux géothermiques (figure 4)

Pour les bâtiments nécessitant des pieux géotechniques, il est possible d'équiper ceux-ci d'échangeur de chaleur : Ces pieux intègrent lors de leur fabrication un système de captage de l'énergie (tube en polyéthylène noyé dans le pieu renforcé par une armature en fer et dans lequel il est possible de faire circuler de l'eau).

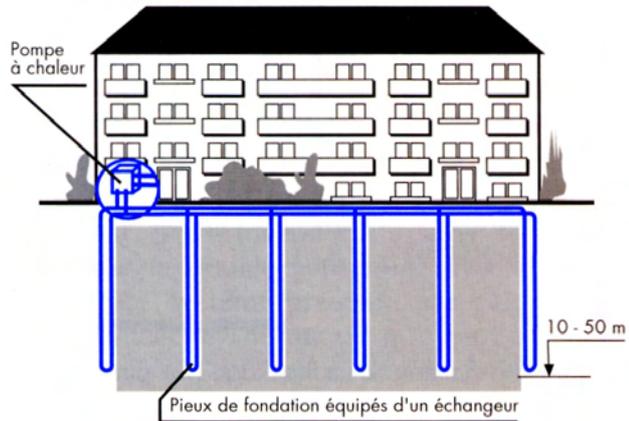


Figure 4 - Pompe à chaleur sur pieux géothermiques

Il est à noter que d'autres types de capteurs tendent à se développer, avec des géométries variées. Le but est toujours de maximiser l'échange de chaleur avec le sous-sol, tout en minimisant le coût d'investissement (forage, terrassement...) et le caractère « intrusif » de la réalisation (place au sol, facilité de mise en œuvre...).

I.2.2 Les pompes à chaleur sur eau de nappe

L'échange de chaleur est ici assuré en pompant l'eau d'une nappe phréatique. Les calories sont prélevées dans un échangeur, et l'eau de la nappe est renvoyée au milieu naturel. Dans la plupart des situations, la préservation quantitative de la ressource impose de réinjecter l'eau une fois refroidie dans la nappe d'où elle est extraite.

La dénomination commerciale de la PAC est PAC eau/eau.

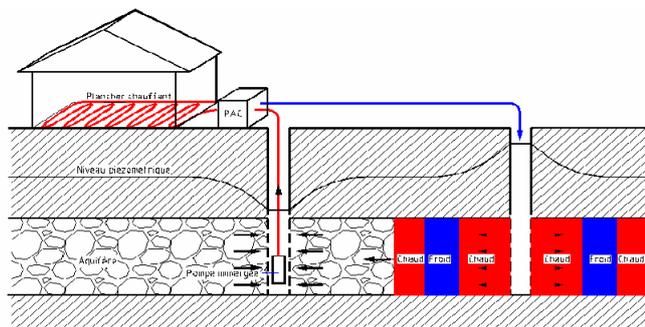


Figure 5 - Pompe à chaleur sur eau de nappes

II. LE MARCHE DES POMPES A CHALEUR

II.1 Adaptation des différentes technologies au segment du marché.

On distingue généralement deux grands segments du marché : celui des maisons individuelles, et celui des ensembles collectifs ou tertiaires, désigné parfois sous le terme « géothermie intermédiaire » (pour la distinguer de la géothermie des réseaux de chaleur urbains). Dans ce deuxième segment, les secteurs économiques peuvent être très variés : habitat collectif, immeuble de bureau, hôpital, maison de retraite, hôtel, administration...

Les différentes technologies exposées ci-dessous présentent des contraintes (coût, encombrement, contrainte géologique...) et des potentiels différenciés (puissance...). Elles sont donc plutôt destinées à certains segments de marché présentant des caractéristiques

compatibles. C'est in fine la situation particulière d'un projet qui amènera au choix de la technologie la plus performante dans la situation donnée.

Le tableau 1 ci-dessous résume les conditions les plus courantes d'utilisation des différentes technologies :

Concept	Conditions d'utilisation
Capteurs horizontaux	- Pavillon avec jardin
Sondes verticales	- Maison individuelle - Investissement plus important que les capteurs horizontaux mais encombrement réduit et contrainte géologique faible
Champs de sondes	- Habitat collectif, tertiaire...
Fondations thermoactives	- Bâtiment important avec pieux géotechniques
PAC sur aquifère superficiel	- Du petit collectif, tertiaire, au grand collectif - Contraintes hydrogéologiques

Tableau 1 - Conditions d'utilisations des différents types de PAC

II.2 L'évolution du marché

Les statistiques disponibles ne sont que partielles, en effet, si l'AFPAC (Association française des pompes à chaleur) publie chaque année les statistiques de ventes pour les pompes à chaleur individuelles, on n'a pas de statistiques pour les opérations du secteur collectif et tertiaire, d'autant plus que certaines sont réalisées sans recours à des subventions publiques. Cependant, il est clair que l'on observe une croissance continue du marché depuis le début des années 2000, comme l'illustrent les statistiques de ventes de l'AFPAC présentées dans la figure 6 et le tableau 2.

Pour les particuliers, le marché est majoritairement dominé par les capteurs horizontaux à détente directe, mais la croissance des ventes concerne toutes les technologies.

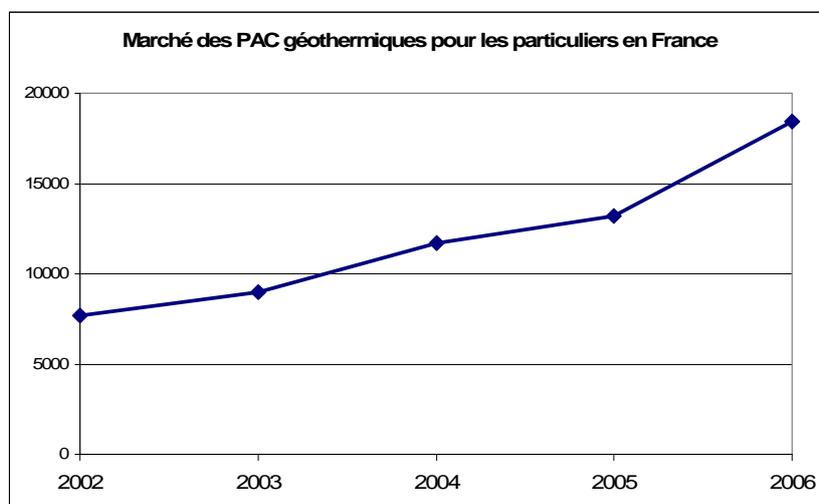


Figure 6 - Évolution des ventes de PAC individuelles depuis 2002

	Ventes 2006	Croissance par rapport à 2005
Détente directe, dits sol/sol ou sol/eau (capteurs horizontaux)	9 600	+ 23%
Eau glycolée/eau (capteurs horizontaux et sondes verticales)	6 350	+ 75%
Sur nappe, dits eau/eau	2 500	+ 47%
TOTAL PAC GÉOTHERMIQUES	18 450	+ 40%

Tableau 2 - Statistiques des ventes de PAC 2006 par type de PAC

II.3 Les perspectives

Le développement des pompes à chaleur géothermiques est à remettre dans le cadre des objectifs de la politique énergétique française, qui veut intégrer de plus en plus d'énergies renouvelables dans son mix énergétique. En particulier, la loi-programme d'orientation de l'énergie (dite loi POPE) promulguée le 13 juillet 2005, fixe une augmentation de 50 % de la contribution des énergies renouvelables thermiques. On peut citer aussi la décision du conseil européen du 9 mars 2007 de porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie européenne.

Pour atteindre ces objectifs, une contribution de tous les types d'énergies renouvelables est attendue. Pour ce qui concerne les pompes à chaleur géothermiques, les perspectives dressées par le ministère de l'industrie lors de la préparation de la planification pluriannuelle des investissements « chaleur » (document prévu en application de la loi POPE) montrent qu'une contribution importante est attendue de celles-ci, supérieure par exemple à celle des chauffe-eau solaires (tableau 3 ci-dessous).

Ce qui est de plus notable, c'est que les taux de croissance attendus restent durablement très forts, pour atteindre par exemple de multiplier par 12 le parc de PAC géothermiques installées à l'horizon 2015.

Énergie finale	2005	2010	2015
Géothermie intermédiaire (PAC)	50 ktep	75 ktep	150 ktep
PAC géothermiques domestiques	32 ktep	140 ktep	400 ktep
Géothermie profonde (réseaux de chaleur)	130 ktep	185 ktep	350 ktep
PAC aérothermiques domestiques	106 ktep	210 ktep	500 ktep
Solaire thermique	39 ktep	140 ktep	410 ktep
Biogaz	56 ktep	90 ktep	160 ktep
Déchets urbains solides (UIOM)	351 ktep	450 ktep	700 ktep
Biomasse	8,93 Mtep	11,5 Mtep	15,7 Mtep
TOTAL ENRth	9,69 Mtep	12,8 Mtep	18,4 Mtep

Tableau 3 - Perspectives de contribution des différentes énergies renouvelables thermiques établies lors de la préparation de la PPI « chaleur »

III. L'ACCOMPAGNEMENT DU DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE

Compte tenu des perspectives présentées ci-dessus et de l'évolution actuelle du marché, les pouvoirs publics et les professionnels ont mis en place deux types d'action pour accompagner cette évolution la croissance du marché des pompes à chaleur :

- tout d'abord, il convient de maîtriser cette croissance, afin que l'explosion du marché ne se fasse pas au détriment de la qualité des installations et avec un impact négatif sur l'environnement. Pour cela, des actions en direction de l'offre sont réalisées, avec comme cible l'accompagnement des professionnels ;
- ensuite, afin d'atteindre les objectifs de contribution des énergies renouvelables, des dispositifs de soutien et des aides ciblées sont mises en place.

Quelques-uns de ces instruments sont présentés ci-dessous.

III.1 L'accompagnement des professionnels

1) La norme NFPAC

La norme NFPAC est une certification mise en place à l'initiative de l'AFPAC, qui vise les pompes à chaleur elles-mêmes en tant que matériel. Mise en place au printemps 2007, elle permet d'assurer à l'acheteur que le matériel répond à des normes de qualité de réalisation et d'efficacité énergétique. Les constructeurs doivent faire certifier les PAC par modèle. La première liste de fabricants bénéficiant de cette norme sera publiée début 2008.

2) La charte qualité QUALIPAC

Cette charte qualité, lancée aussi par l'AFPAC au printemps 2007, a pour but d'apporter au client une garantie que l'installation du matériel choisi se fera en respectant les règles de l'art. Les installateurs adhérents à la charte qualité prennent dix engagements, concernant à la

fois le respect des règles de l'art techniques et le service client. L'adhésion est soumise à des conditions de compétence, et au suivi d'un cursus de formation. Des audits sont par ailleurs réalisés sur le terrain pour vérifier le respect de la charte.

3) L'engagement des entreprises de forage des sondes géothermiques à une démarche qualité

De la même manière, l'ADEME, EDF et le BRGM animent une démarche d'engagement qualité pour les entreprises de forages de sondes géothermiques. Elle repose sur un engagement volontaire des entreprises de respecter les règles de l'art, mais également la réglementation administrative ; elle s'appuie sur des informations techniques, un suivi administratif et des contrôles sur le terrain.

4) Formation ADEME/BRGM à la conduite de projet

Dans le cadre de leurs missions de formation, l'ADEME et le BRGM proposent une formation consacrée au montage de projet de pompe à chaleur sur eau de nappe ou sur champs de sondes géothermiques pour des immeubles du tertiaire ou du résidentiel collectif.

Cette formation, dispensée sur trois jours, est destinée aux promoteurs, services techniques, bureaux d'études, ...

5) Guides techniques

L'ADEME, le BRGM, l'ARENE et EDF, en partenariat avec des Conseils régionaux ont publié un manuel concernant la conception et la mise en œuvre des pompes à chaleurs sur nappes. Il comporte des éléments techniques du sous-sol et de la surface, des éléments réglementaires concernant la conception et la réalisation de projets.

III.2 Les politiques de développement de la demande

1) Les aides financières

Pour les particuliers, l'aide prend la forme d'un crédit d'impôt. Celui-ci couvre le coût des seuls équipements dont la finalité essentielle est la production de chaleur, (pompes à chaleur, échangeurs, pompes de circulation, ...).

Le taux du crédit d'impôt est fixé à 50 % pour les pompes à chaleur (loi de finances 2006, application en 2007). Pour être éligible le coefficient de performance de la PAC doit être supérieur à 3,3.

Pour les projets plus importants, divers dispositifs existent :

- l'ADEME et les collectivités territoriales (région, département, agglomérations, ...) aident les études de faisabilité à hauteur de 50% maximum. Dans certaines conditions l'investissement peut bénéficier également d'une aide. Pour connaître les conditions d'octroi de ces financements, il est nécessaire de se rapprocher de l'ADEME ;
- depuis le 1^{er} juillet 2006, les projets de pompe à chaleur sur eau de nappe sont éligibles au dispositif des certificats d'économie d'énergie (fiche standard PAC eau/eau). Les informations relatives aux certificats d'économie d'énergie sont disponibles sur le site Web du ministère de l'Industrie www.industrie.gouv.fr ;

- d'une manière générale, des dispositifs favorisent l'utilisation par les entreprises des énergies renouvelables (amortissement exceptionnel, Fonds de Garantie des Investissements de Maîtrise de l'Énergie).

L'ADEME travaille actuellement à la mise en place d'un important système d'aide au développement de la « Chaleur géothermique » dont bénéficierait la filière des Pompes à chaleur géothermiques du secteur tertiaire et petit collectif.

2) La garantie AQUAPAC[®]

La technologie des PAC sur eau de nappe présente des contraintes géologiques liées à la présence d'un aquifère suffisamment productif au droit du site à une profondeur atteignable compte tenu de la taille du projet. Un maître d'ouvrage peut donc hésiter à s'engager dans la réalisation d'un forage compte tenu du risque géologique : il n'a pas l'assurance de trouver au droit du site concerné, un débit d'eau suffisant. Pour lever ce frein la garantie AQUAPAC[®] a été créée il y a plus de vingt ans par l'ADEME, EDF et le BRGM.

AQUAPAC[®] offre une double garantie portant sur la présence et la pérennité de ressources en eau souterraines utilisées à des fins énergétiques par le biais de pompes à chaleur :

- une **garantie de recherche** couvrant les risques liés à la découverte de la ressource en eau nécessaire au fonctionnement prévu du projet. Cette garantie couvre donc le risque d'échec du forage vis-à-vis du débit escompté ;
- une **garantie de pérennité** (courant sur 10 ans) ayant pour objet de couvrir le risque de diminution ou de détérioration de la ressource en cours d'exploitation.

AQUAPAC[®] s'adresse aux maîtres d'ouvrage ou à leurs mandataires, s'applique au chauffage par PAC de tout type de bâtiment pour lesquels la profondeur du forage est inférieure à 100 mètres, la puissance thermique de la pompe à chaleur est d'au moins 30 kW, les montants couverts étant limités à 115 000 € pour les études, ingénierie, travaux et matériel spécifiques à l'opération PAC.

3) Systèmes d'information géographiques régionaux sur le potentiel des aquifères superficiels pour les PAC sur nappe

Le BRGM réalise dans différentes régions, en partenariat avec l'ADEME, les collectivités locales, et souvent EDF, des inventaires des potentiels des aquifères superficiels pour les PAC sur nappe.

Cet outil d'aide à la décision, présenté sous forme de système d'information géographique, très interactif permet de savoir, au droit d'un site déterminé pour un éventuel projet, si le sous-sol recèle ou non un ou plusieurs aquifères exploitables. Des caractéristiques concernant les paramètres géométriques (profondeur, épaisseur) et hydrogéologiques (perméabilité, chimie...) des réservoirs sont communiqués dans un atlas associé au SIG.

Cet outil réalisé sur la base des données connues sur le sous-sol régional ne remplace bien évidemment pas l'étude de faisabilité. Il est déjà disponible sur internet (www.geothermie-perspectives.fr) pour l'Île-de-France, la région Centre et la Lorraine. ■

Une expérience réussie de géothermie en région Rhône-Alpes : la CAF de Lyon Bilan des neuf années de fonctionnement

José NAVETEUR ⁽¹⁾, Christian BRUSS ⁽²⁾

⁽¹⁾ EDF Département EnerBat - BP 46 - 77818 Moret-sur-Loing - jose.naveteur@edf.fr

⁽²⁾ Caisse d'Allocations Familiales de Lyon - 63, boulevard Vivier Merle - 69003 Lyon
christian.bruss@caflyon.cnafmail.fr

Depuis neuf ans la CAF de Lyon est équipée d'une installation de pompe à chaleur sur nappe phréatique. Cette installation fait l'objet d'un suivi énergétique par EDF R&D. Les principaux résultats sont analysés sur une moyenne des huit années de fonctionnement. La technologie de thermofrigopompe, le bilan des consommations et les coûts d'exploitations énergétiques sont présentés.

I. INTRODUCTION

Fin 1997, la CAF de Lyon, s'installe dans ses nouveaux locaux situés boulevard Vivier Merle à Lyon (fig. 1). Ce bâtiment comporte des bureaux, des salles de réunion, une salle de conférence et un accueil pour les allocataires.

Soucieuse du futur coût d'exploitation la CAF de Lyon avait demandé à son bureau d'études, d'étudier différents modes de chauffage et rafraîchissement du site. Les études ont montré que la solution Pompe A Chaleur (PAC) sur nappe phréatique était la plus performante.



Figure 1 - Immeuble de la CAF de Lyon - Boulevard Vivier Merle

I.1 Caractéristiques techniques du site

Le bâtiment a une surface de 16 633 m², le coefficient de déperdition par les parois est de 0,42 W/m³ °C (pour un coefficient G1¹ de référence de 0,53 W/m³ °C).

¹ G1 : coefficient de déperdition par les parois.

L'installation (fig. 2) comporte deux PAC eau/eau (600 kW chaud, 600 kW froid), qui alimentent un réseau de ventilo-convecteurs 4 tubes et des centrales de traitement (fig. 3) comportant des récupérateurs afin de limiter la consommation d'énergie.

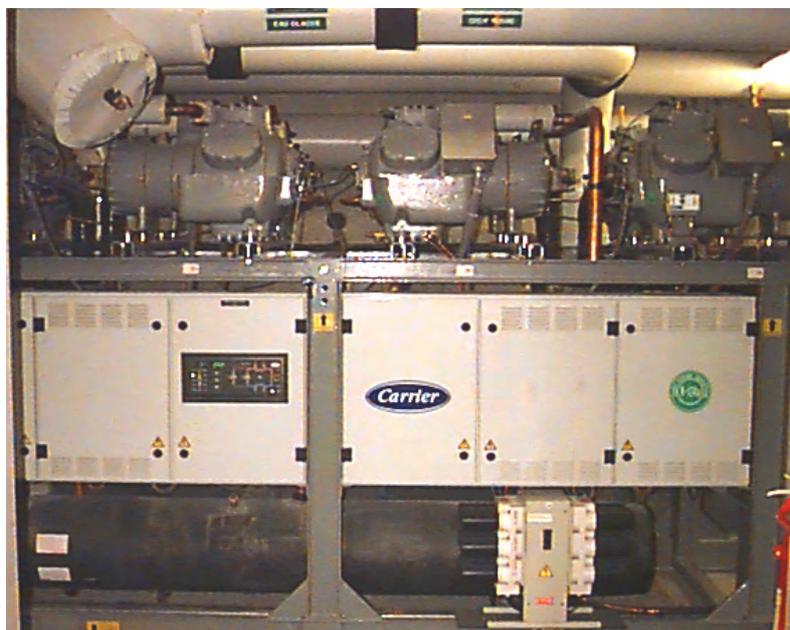


Figure 2 - Pompe à chaleur

Les réseaux hydrauliques sont équipés de pompes à vitesse variable. Le puits comporte deux pompes de forage à vitesse variable dont le débit maximum unitaire est de 100 m³/h.

Les coûts d'investissements étaient en 1995 de :

- 149 €/m² pour le chauffage, la climatisation, la ventilation ;
- 21 €/m² pour la Gestion Technique de Bâtiment (GTB) ;

soit un total de 170 €/m².

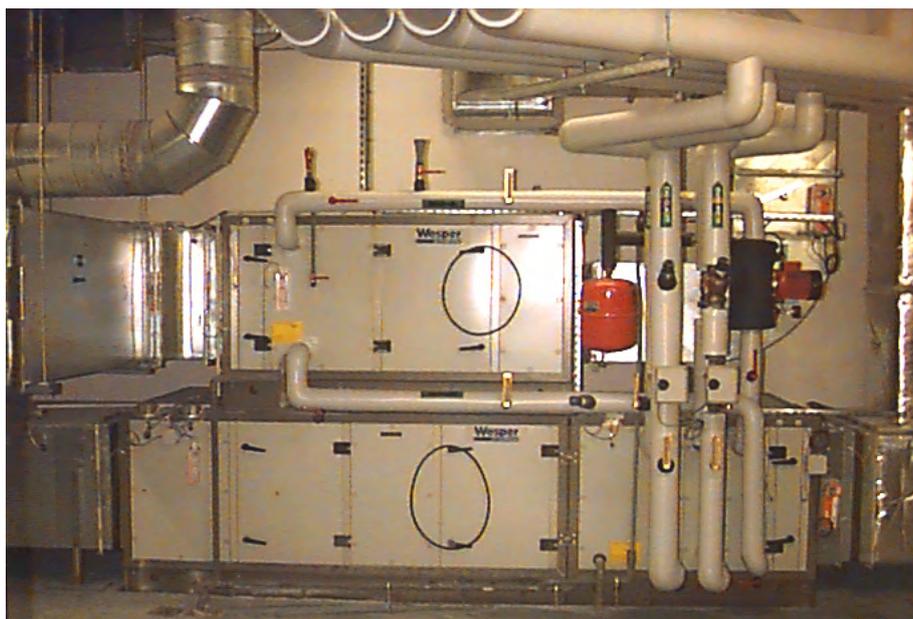


Figure 3 - Centrale de traitement de l'air

I.2. Détails de quelques spécificités techniques

Les pompes à chaleur sont pilotées en mode thermofrigopompe, c'est-à-dire alternativement pour le froid et pour le chaud. Elles constituent une solution optimale en termes de coût énergétique pour les bâtiments qui ont des besoins de froid et de chaud.

Régime de fonctionnement :

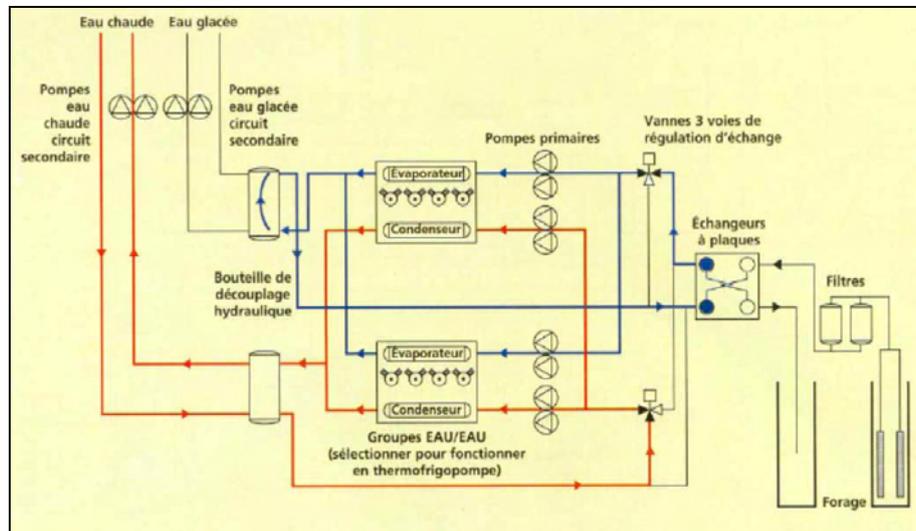
- en eau glacée : de 7 à 12 °C l'été, de 10 à 12 °C l'hiver ;
- en eau chaude : de 35 °C pour +20 °C à l'extérieur, de 45 °C pour 0 °C à l'extérieur.

L'ensemble de l'installation est piloté par une GTB.

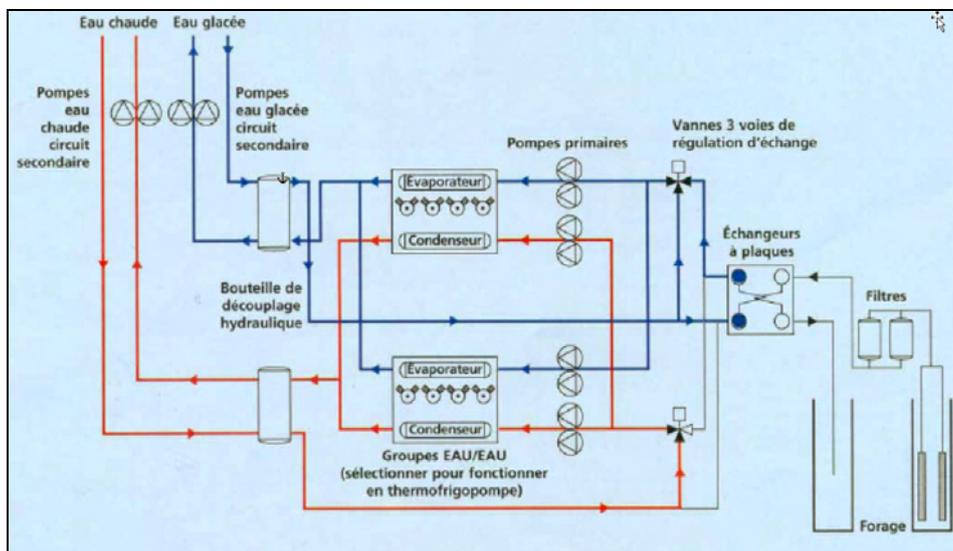
II FONCTIONNEMENT D'UNE THERMOFRIGOPOMPE

Une thermofrigopompe peut fonctionner sous cinq modes différents :

1. **Chaud seulement.** Ce mode intervient en période froide. Pour assurer l'équilibre thermique, le froid produit par les groupes est intégralement évacué dans le puits.

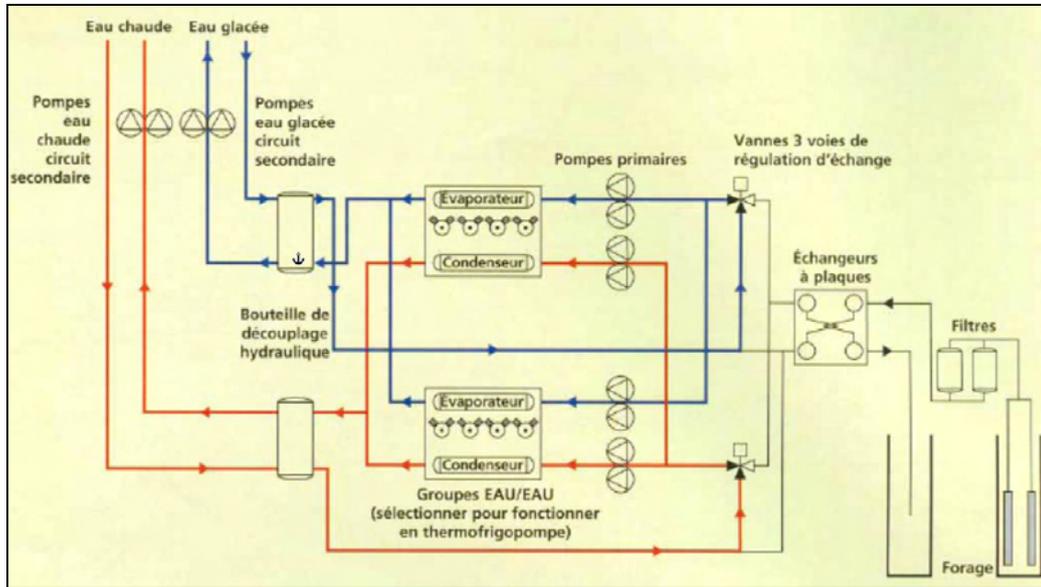


2. **Chaud majoritaire et froid minoritaire.** Le bâtiment consomme plus de chaud que de froid (mi-saison et début d'hiver) Le froid excédentaire est évacué dans le puits.

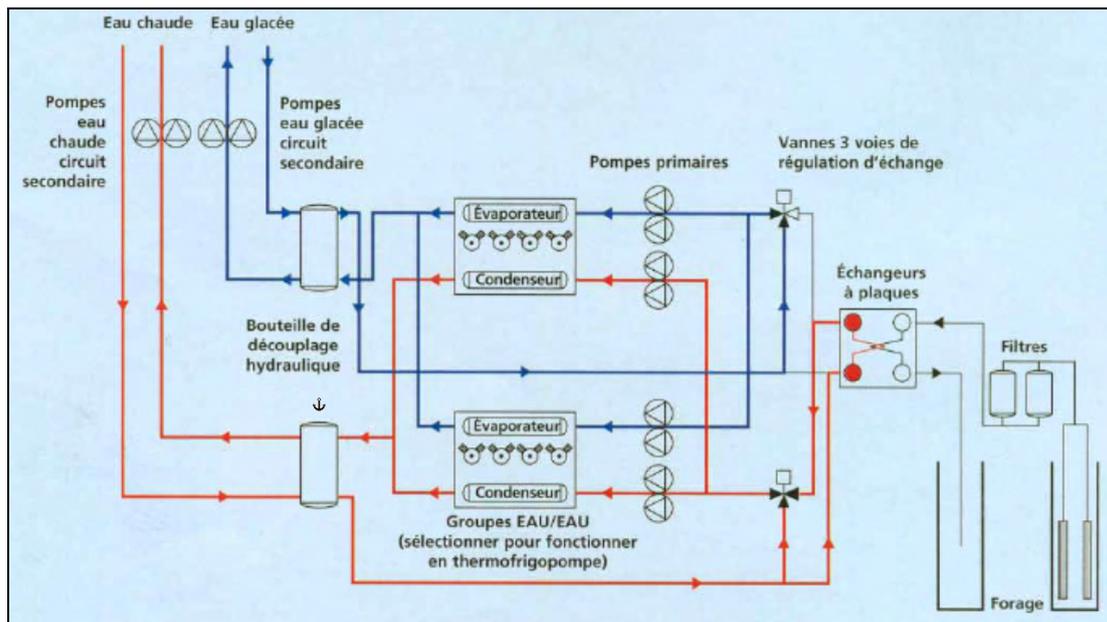


3. Chaud égale froid

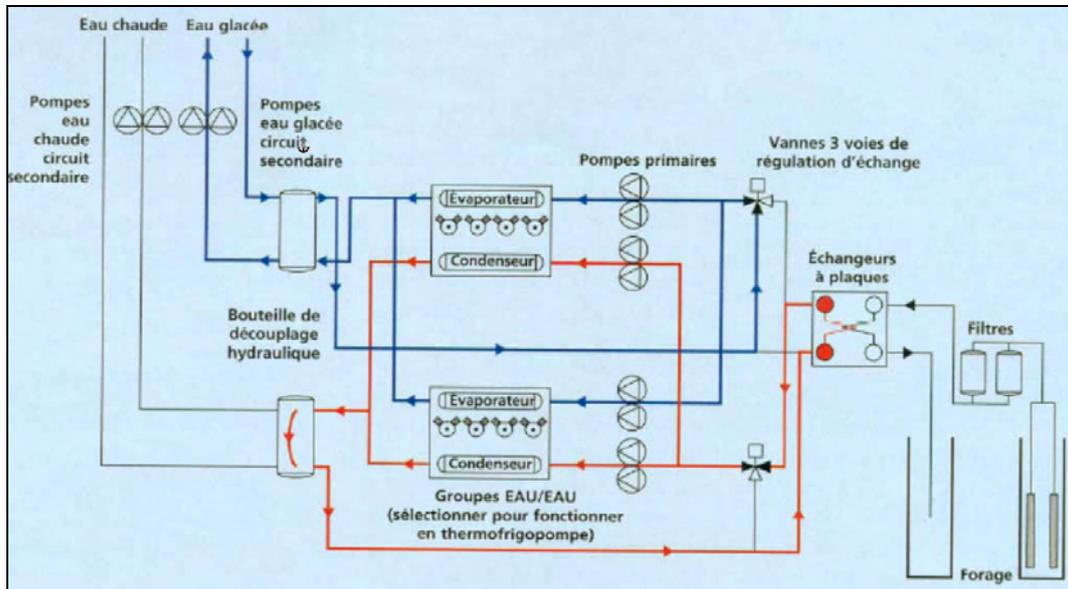
Ce mode intervient, lorsque le bâtiment consomme tout le froid et tout le chaud produit. Le COP est maximum et aucune énergie n'est rejetée dans le puits.



4. **Chaud minoritaire, froid majoritaire.** Le bâtiment consomme alors plus de froid que de chaud (mi-saison chaude et début d'été). Le chaud excédentaire est alors rejeté dans le puits.



5. **Froid seulement.** Le bâtiment ne consomme que du froid (saison chaude). La chaleur produite par les groupes est intégralement rejetée dans le puits.



La régulation repose sur un principe fondamental « toujours répondre à la plus forte demande ».

La GTB doit mesurer en permanence les écarts de température sur les deux réseaux (chaud et froid). Selon le réseau le plus demandeur, elle détermine le mode de fonctionnement de la thermofrigopompe, en donnant la priorité au fonctionnement en chaud ou froid.

II. RÉSULTAT DES MESURES ET BILAN DE FONCTIONNEMENT

Ce site fait l'objet d'un suivi énergétique depuis 1998. L'installation a été instrumentée par EDF R&D au moyen de :

- 9 compteurs d'énergie électrique (dont 6 télé-relevables) ;
- 1 compteur de calories ;
- 1 compteur de frigories ;
- 1 système d'interrogation et de suivi à distance de la GTB.

Moyenne des consommations et des performances sur 9 années (1998 à 2006).

La consommation moyenne totale est 154 kWh/m² (puissance max appelée 760 kW).

La consommation a été au minimum de 145 kWh/m² en 2000 et au maximum de 169 kWh/m² en 2003. À noter qu'en moyenne dans le secteur des bureaux, le ratio de consommation annuelle se situe à environ 250 kWh/m².

Le coût d'exploitation moyen est de 8,40 €HT/m². Il a été minimum à 7,70 €HT/m² en 2000 et maximum à 9,03 €HT/m² en 2003. On considère qu'un bâtiment a un coût d'exploitation énergétique satisfaisant si son coût d'exploitation n'est pas supérieur à 10 €/m².

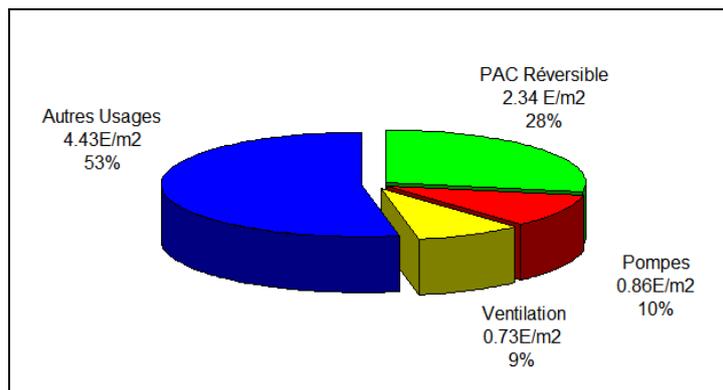
La consommation de la PAC et des pompes de puits est 39 kWh/m² (2.49 €HT/m²).

Elle a fourni en moyenne 66 kWh Chaud/m² et 81 kWh Froid/m².

Le coût moyen de production de MWh chaud/froid est **de 16 €HT/MWh**.

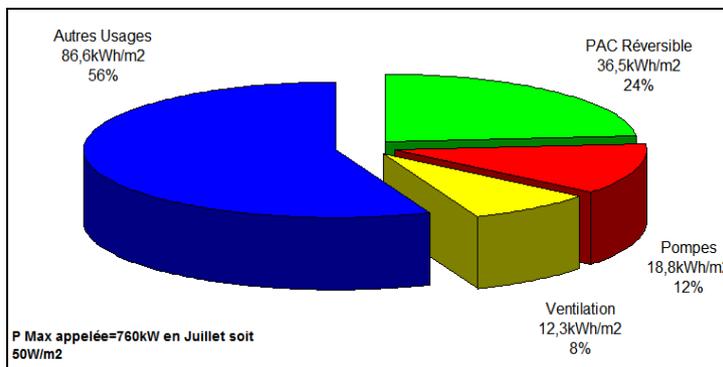
Par rapport à une solution traditionnelle (chaufferie gaz et groupe froid) la solution PAC sur nappe permet une économie annuelle de 0,94 € HT/m², soit une diminution du coût énergétique de la production de chaud et froid de 37 %.

Elle permet et une diminution des rejets de CO₂ de 14,8 kg/CO₂/m² soit une baisse de 70 %.



Coût des consommations, moyenne annuelle 1998-2006

Coût total = 139 042 euros HT, soit 8,36 euros/m²



Moyenne annuelle des consommations 1998-2006

Consommation totale = 2 565 148 kWh, soit 154 kWh/m²

Le Coefficient de Performance (COP)² de l'installation est sur les neuf années en moyenne de 3,8. C'est-à-dire que pour 1 kWh électrique consommé, l'installation en a fourni 3,8 sous forme de chaud ou froid.

² COP= Énergie fournie au bâtiment en froid et chaud / Énergie électrique consommée par les PAC + la pompe de puits.

Économie apportée par les pompes à vitesse variable

EDF avait préconisé la pose de pompes à vitesse variable sur les réseaux chaud et froid et sur les pompes de forage. Les économies engendrées par ces variateurs sont pour :

- les pompes de puits : 90 985 kWh soit 4 237 €;
- les pompes du circuit d'eau chaude : 81 858 kWh soit 3 707 €;
- les pompes circuit d'eau glacée : 77 969 kWh soit 3 859 €

Soit une moyenne de 250 722 kWh/an et 11 803 €/an, ce qui représente **10 % de la consommation annuelle du bâtiment et 40 % de celle des PAC réversibles.**

Le surcoût lié au découplage hydraulique plus variateurs de vitesse était de 36 k€HT, ce qui conduit à un temps de retour de 3 ans !

III. CONCLUSION

Le suivi a montré qu'une installation de pompe à chaleur sur nappe phréatique est performante sur la durée, elle permet des économies d'énergies et financières tout en limitant l'impact sur l'environnement. ■

Utilisation énergétique d'une nappe – Nécessité d'un recensement – Exemple de la Ville de Grenoble

**Claire Charguéron⁽¹⁾, Bruno Canaleta⁽¹⁾, Marc Boisson⁽¹⁾,
Frédéric Jacques⁽²⁾**

⁽¹⁾ SOGREAH – 6, rue de Lorraine – 38130 Echirolles
claire.chargueron@sogreah.fr - bruno.canaleta@sogreah.fr - marc.boisson@sogreah.fr

⁽²⁾ Ville de Grenoble – Service Environnement – Le Forum – 3, rue Malakoff – BP1066 –
38021 Grenoble Cedex 1 - frederic.jacques@ville-grenoble.fr

I. INTRODUCTION

La nappe de Grenoble est de plus en plus utilisée pour des systèmes de rafraîchissement ou de pompes à chaleur. Ceci peut entraîner, en particulier, des impacts thermiques, des remontées locales de la nappe induisant des ennoiements de structures enterrées à proximité (cave, parking...) ainsi que des conflits d'usages. La Ville de Grenoble, dans le cadre de sa politique environnementale et en tant qu'aménageur, souhaitait mettre en place des outils pour une meilleure gestion de la nappe. Une étude a ainsi été entreprise et confiée à Sogreah. Les principaux aspects de celle-ci sont présentés ici.

II. POLITIQUE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DE LA VILLE DE GRENOBLE : UNE INCITATION À L'UTILISATION ÉNERGÉTIQUE DE LA NAPPE

La politique de développement durable de la Ville de Grenoble s'exprime réglementairement au niveau de son Plan Local d'Urbanisme (PLU) mais aussi dans ses pratiques d'aménagement qu'elle met en place dans les ZAC, notamment par le biais des cahiers des charges imposés aux constructeurs/aménageurs.

Au-delà de ces leviers, dont la ville de Grenoble a la maîtrise, celle-ci a publié un « Guide pour la Qualité Environnementale dans l'Architecture et l'Urbanisme » de façon à promouvoir dans toutes les opérations d'aménagement le réflexe d'une démarche de développement durable.

C'est dans ce contexte que la ville de Grenoble préconise l'utilisation de la nappe. Ainsi à titre d'exemple, le cahier des recommandations « Accessibilité et haute qualité environnementale », destiné aux aménageurs de la ZAC de Bonne, préconise une « production de 'froid' respectueuse de l'environnement, effectuée par des pompes à chaleurs réversibles ou l'utilisation plus simple de l'eau de la nappe ».

En effet, l'exploitation thermique des nappes d'eaux souterraines comme source de frigories pour le refroidissement d'installations industrielles ou pour la climatisation, est une technique relativement ancienne mise en œuvre depuis plusieurs décennies.

Le chauffage de bâtiments par extraction de calories sur les nappes à partir de pompes à chaleur (PAC) a pris un réel essor à la fin des années 1970, lors de l'accroissement brutal du coût des énergies traditionnelles.

La présence en France d'un grand nombre de nappes superficielles exploitables à partir de forages peu profonds (donc peu onéreux), les faibles amplitudes thermiques observées dans ces nappes, et des coefficients de performances (COP) élevés, contribuent à rendre les systèmes de PAC sur nappes de plus en plus attractifs. En puisant des calories dans le milieu naturel, les PAC sur nappe contribuent à économiser l'énergie électrique. Avec 1 kW d'énergie électrique consommé, les PAC peuvent produire 3 à 5 kW d'énergie thermique.

Ces systèmes d'utilisation énergétique de la nappe seront amenés à se développer au cours des prochaines décennies car ils correspondent à des techniques de chauffage (et de rafraîchissement) particulièrement adaptées aux secteurs tertiaire et résidentiel pour lesquels la démarche Haute Qualité Environnementale (HQE) est de plus en plus recherchée. Plus spécifiquement, les systèmes de rafraîchissement sur nappe deviennent une alternative aux tours de refroidissement au titre de la prévention des risques sanitaires et notamment des risques de diffusion de légionelles.

Aussi la nappe phréatique de Grenoble offre une ressource exploitable, qu'il convient de gérer de façon durable : gestion quantitative et qualitative, enjeux sanitaires, en maîtrisant en particulier les facteurs qui peuvent limiter son utilisation.

Ainsi, bien que le contexte de la nappe de Grenoble soit a priori favorable (nappe présentant une bonne transmissivité) il existe certaines contraintes qui doivent être prises en compte dans la gestion des aménagements et de la nappe. Celles-ci sont relatives d'une part, à la réalisation localement de système de prélèvement et de rejet et d'autre part, à l'impact plus global sur la nappe et sur les potentialités de celles-ci pour de futures installations.

III. LES CONTRAINTES RELATIVES A LA CRÉATION DE DOUBLETS ET LES IMPACTS INDUITS SUR LA NAPPE

Du point de vue d'un aménageur, les contraintes pour la réalisation d'un doublet géothermique sont liées principalement à des considérations de débit, de température et de modifications des écoulements souterrains à proximité.

Pour ce qui concerne les débits, il importe de connaître la capacité de la nappe à fournir (via un ouvrage de captage approprié) les débits requis et également les possibilités de rejet dans la nappe et/ou le réseau.

Par ailleurs, l'efficacité d'un système de rafraîchissement ou d'une PAC dépend de l'écart entre la température de l'eau prélevée et la température de l'eau rejetée. La connaissance de la température initiale de la nappe est donc nécessaire pour le dimensionnement de tels systèmes.

Une difficulté potentielle supplémentaire réside dans le fait que l'ouvrage de prélèvement peut être situé à proximité d'un ouvrage de rejet, l'eau captée pouvant alors provenir pour partie de l'ouvrage de rejet, et donc avoir une température différente de la température non influencée de la nappe, ce qui diminue la performance du dispositif. Par exemple, pour un système de rafraîchissement, cela consiste à prélever de l'eau « tiède » au lieu d'une eau

« froide » et donc, in fine, réduire l'écart entre la température de l'eau prélevée et celle de l'eau rejetée. Cette difficulté est due au fait que les aménageurs réalisent des doublets sur leur emprise foncière, or celle-ci est parfois réduite et de ce fait le puits de rejet se trouve proche du puits d'injection. Cela peut être également dû à la présence d'autres doublets à proximité ce qui peut entraîner alors des conflits d'usage.

Enfin, le rejet dans la nappe va entraîner une augmentation locale du niveau piézométrique qui peut provoquer des ennoiements de structures souterraines (cave, parking...) ou un apport d'eaux parasites dans les réseaux non étanches.

Plus globalement *au niveau de la gestion globale de la nappe* les questions qui se posent sont liées à des conflits d'usage, à l'impact thermique de l'ensemble des installations sur la nappe et la détermination des potentialités thermiques de la nappe afin d'orienter de façon pertinente les installations futures. La ville de Grenoble a ainsi souhaité se doter d'outils permettant une meilleure gestion de la nappe. Une étude a ainsi été confiée à SOGREAH pour :

- Établir un état de l'existant :

- en recensant les installations utilisant la nappe à des fins énergétiques ;
- en mesurant la température de la nappe sur l'ensemble de l'agglomération, afin de constituer un état de référence pour évaluer l'évolution de la température de la nappe en fonction notamment des installations futures ;
- évaluer les impacts thermiques de ces installations et définir des cartes d'aptitudes et de contraintes à fournir en termes de recommandations aux maîtres d'ouvrage et architectes.

Les recommandations issues de cette étude et concernant l'utilisation du potentiel géothermique de la ville seront ensuite intégrées au « Guide de la qualité environnementale dans l'architecture et l'urbanisme » destiné aux maîtres d'ouvrage et aux architectes.

Les contraintes évoquées précédemment sont en partie liées aux caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de Grenoble. Celles-ci sont rappelées succinctement dans le paragraphe suivant.

III. 1 Le contexte hydrogéologique de la nappe de Grenoble

Grenoble est située à la confluence entre le Drac et l'Isère, dans une plaine alluviale où la nappe est peu profonde (environ 3 m de profondeur en moyenne).

Un milieu hétérogène du point de vue des écoulements souterrains

La plaine de Grenoble s'est mise en place après le retrait des derniers glaciers par les divagations du Drac et de l'Isère qui, avant leur endiguement, se déplaçaient sur leurs alluvions.

Les dépôts du Drac, cours d'eau plus torrentiel que l'Isère, sont plus grossiers que ceux de l'Isère. Ils sont constitués de sables, graviers et galets, voire par endroits de blocs de grandes dimensions. Ces alluvions sont bien lavées ce qui leur confère une excellente perméabilité.

À l'inverse, les alluvions de l'Isère sont sablo-graveleuses, limoneuses et argileuses. Dans les anciens chenaux de l'Isère comme dans son lit actuel, les graviers sont de plus faible dimension que ceux du Drac en raison de son caractère moins torrentiel.

Des dépôts marécageux sont rencontrés dans les points bas de la plaine de Grenoble (Quartier de l'Abbaye, les Maisons Neuves), avec des argiles grises à végétaux et même des lits de tourbes.

Sous les alluvions grossières du Drac et de l'Isère, sont rencontrés des sables gris associés à des argiles qui surmontent des argiles plastiques.

En allant du Sud vers le Nord, en se rapprochant de l'Isère, les perméabilités moyennes des alluvions diminuent du fait de l'influence des dépôts fins de l'Isère qui se sont mélangés à ceux du Drac. La perméabilité des alluvions est de ce fait plus faible en moyenne au Nord-est, zone de plus forte influence de l'Isère.

Globalement, les caractéristiques hydrodynamiques des alluvions permettent :

- un écoulement rapide de la nappe sous l'effet d'un gradient hydraulique également élevé (0,35 % en moyenne) ;
- la réalisation de forages à forte productivité : 100 à 400 m³/h.

Toutefois l'hétérogénéité des alluvions implique un zonage du territoire avec des secteurs qui peuvent être plus ou moins favorables à la réalisation de doublets.

L'alimentation de la nappe : essentiellement par le Drac et les eaux d'infiltration

L'examen des cartes piézométriques montre que le Drac alimente la nappe alluviale alors que l'Isère draine cette nappe.

L'alimentation de la nappe par infiltration des eaux du Drac constitue la part la plus importante de l'alimentation de la nappe de Grenoble, cependant l'infiltration des eaux de pluie joue un rôle non négligeable.

Le secteur est marqué par un réseau hydrographique peu développé pour la récupération naturelle des eaux de pluies. Le ruissellement est négligeable sur une grande partie des sols non imperméabilisés ou non aménagés, où l'infiltration possible des pluies est forte. L'infiltration est faible dans les secteurs marqués par la présence d'une couche de limon argileux en surface. Le bilan moyen d'infiltration des pluies sur la plaine de Grenoble est évalué à 0,5 m³/s en moyenne annuelle.

Il est à noter que les eaux d'infiltration ont un impact sensible sur la température de la nappe.

L'influence des réseaux sur le niveau de la nappe

Lorsque la plaine de Grenoble était peu urbanisée et surtout à vocation agricole, elle était parcourue par un réseau de canaux, de fossés, de ruisseaux (ruisseau d'Eybens, le Verderet, la Mogne). Elle recevait par ailleurs les eaux du Canal d'Arrosage de la Romanche (CAR). Ce réseau hydrographique assurait l'alimentation en eau des usines et des terres irrigables à l'amont – en contribuant ainsi à maintenir des niveaux de nappes hautes –, il permettait, d'autre part, le drainage à l'aval des points marécageux, comme les terrains situés au Nord-ouest d'Eybens. Avec l'urbanisation, le réseau d'irrigation a été progressivement abandonné, alors que les fossés et ruisseaux drainants, comme la Mogne ou le Verderet, étaient localement transformés en réseaux pluviaux. Le tracé-même de ces anciens fossés a été modifié. Dans le centre de Grenoble, le réseau d'égouts a été conçu initialement pour drainer la nappe. Il permet, en abaissant le niveau des eaux souterraines, d'assainir et de limiter les risques de submersion de cette partie de la ville.

III.2 Le recensement des forages à usage énergétique

1) Nécessité de contacter de nombreux organismes et entreprises

Pour réaliser le recensement des installations à usage énergétique en place dans la nappe de Grenoble, un travail d'enquête a été mené auprès :

- des administrations locales susceptibles de centraliser des informations sur les installations géothermiques (MISE, DDE, DRIRE) ;
- de la Ville de Grenoble ;
- de l'agence de l'eau RMC ;
- de la BSS du BRGM ;
- des archives SOGREAH ;
- des entreprises de forages régionales (5) ;
- des bureaux d'études spécialisés en thermique (climatisation/chauffage), susceptibles de participer à la construction de telles installations (11) ;
- des entreprises susceptibles d'avoir ce type d'installation (45).

Au niveau administratif, depuis 2005, les dossiers de déclaration et d'autorisation de ce type d'installation doivent être instruits par la MISE. Cependant, ce travail n'a été effectif qu'à partir de 2006. Auparavant, l'administration en charge de ces déclarations était la DDE. Mais suite à sa prise en charge par les régions, les missions de la DDE ont changé à Grenoble et ne concernent plus les eaux souterraines.

Il a été très difficile de recueillir les informations antérieures à 2006 car les archives de la DDE ont été éparpillées voire détruites au niveau de Grenoble.

2) Environ une quarantaine d'installations sur Grenoble et une dizaine actuellement en projet

Ce travail de recherche sur la commune de Grenoble a donné lieu au recensement de :

- **15** installations de pompage avec réinjection en nappe ;
- **23** installations de pompage avec réinjection au réseau ;
- **8** installations de pompage avec réinjection en nappe en projet, plus 2 projets de puits de réinjection en nappe (en remplacement du rejet au réseau) ;
- **5** installations hors service (soit non utilisées, soit supposées détruites et sur lesquelles nous disposons donc de très peu d'informations).

Ces installations (figure 1) sont globalement assez bien réparties sur la commune de Grenoble.

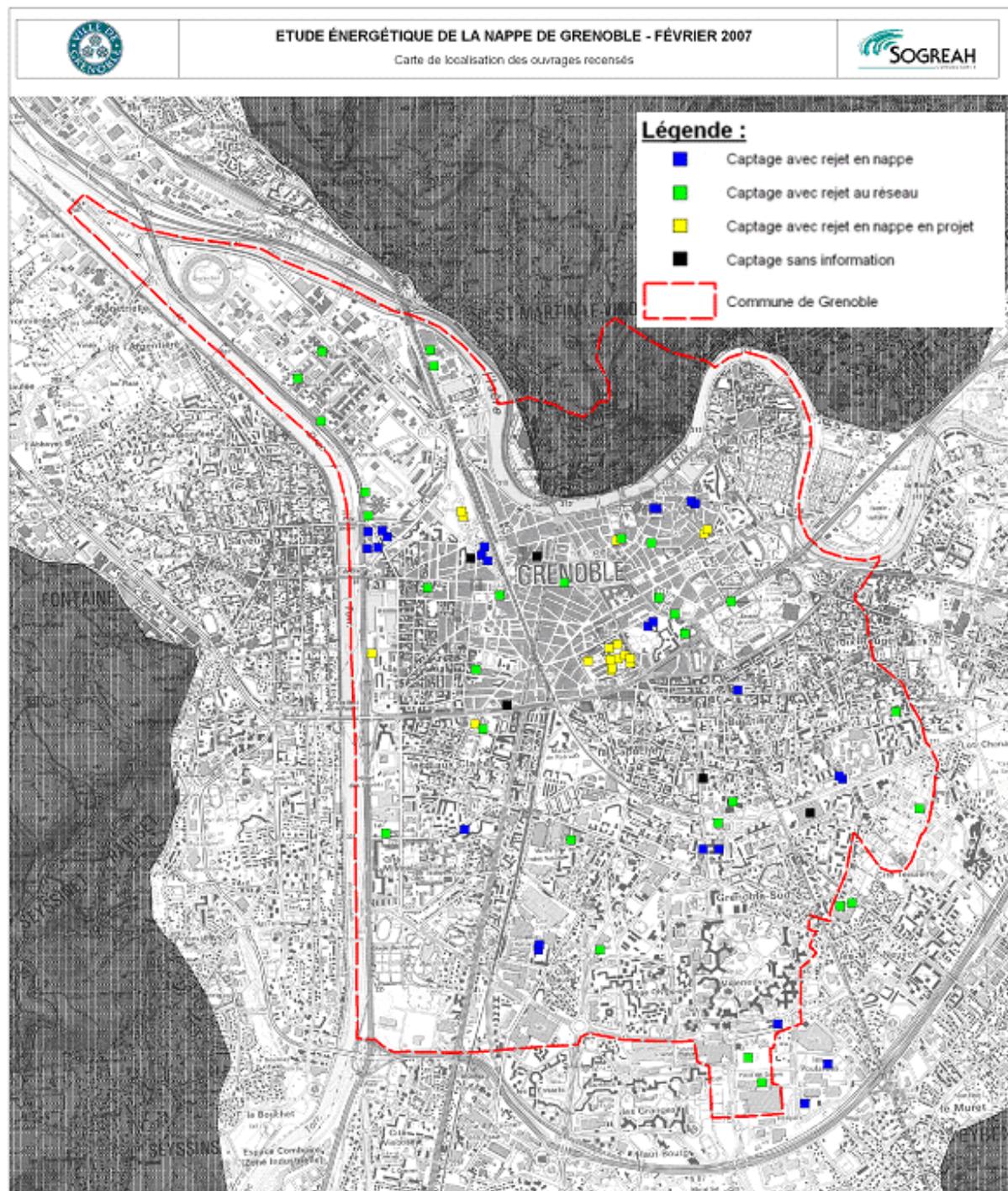


Figure 1 - Carte de localisation des ouvrages recensés en février 2007

Pour apprécier l'impact de ces installations l'incidence thermique a été évaluée pour chaque doublet recensé.

III.3 Une incidence thermique locale sur la nappe

L'injection d'eau à une température différente de celle du réservoir aquifère crée une perturbation thermique qui se propage dans le sens d'écoulement de la nappe (convection), mais à une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau, une part importante des calories/frigories étant captée par les matériaux en place (graviers, galets, sables...).

La perturbation est atténuée du fait des échanges avec les formations voisines (épontes) et des phénomènes de dispersion (et de diffusion) dans le réservoir résultant de la variabilité de la perméabilité.

Une modélisation a été effectuée à l'aide du logiciel FEFLOW (modélisation des écoulements souterrains et de la chaleur) pour chacun des ouvrages recensés. Les principaux paramètres pris en compte sont :

- les débits de chaque installation de façon transitoire,
- la température de rejet,
- le gradient local de la nappe,
- les transmissivités résultant d'une étude globale de la nappe de Grenoble ([2]).

Ces panaches donnent donc plutôt des ordres de grandeur de l'impact thermique. Les panaches calculés sont ceux correspondant à une extension maximale (à la fin de la période d'utilisation des doublets). Un exemple de panache thermique calculé à l'aide du logiciel FEFLOW, est présenté en figure 2.

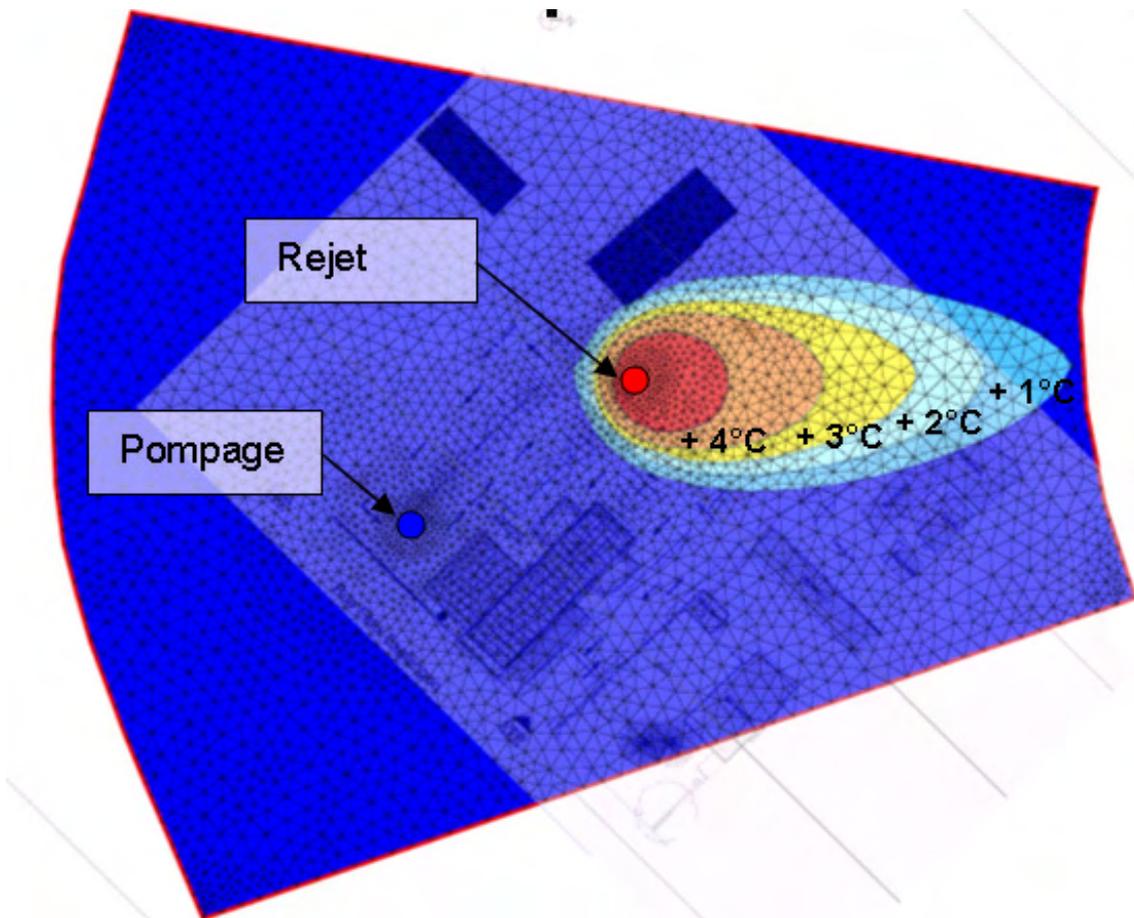


Figure 2 - Panache thermique d'un doublet modélisé

Les extensions obtenues (isoligne +1 °C) vont d'une quarantaine de mètres à environ 250 mètres. Même s'il convient de considérer avec quelques réserves, les évaluations calculées des panaches thermiques, effectué à partir de caractéristiques moyennes des aquifères, on constate que **l'incidence thermique des installations existantes (ou en projet) sur la nappe de Grenoble reste limitée.**

Cependant cette incidence thermique peut s'avérer contraignante à court terme dans le cas où des aménagements proches de ceux existants seraient envisagés. Il est important également de préciser que d'autres facteurs sont susceptibles d'avoir une incidence thermique de façon significative sur la nappe : apports d'eaux par exfiltration des réseaux EU ou EP, ou rejets directs d'eaux pluviales en nappe ; ces incidences n'ont pas été évaluées ici.

III.4 La température de la nappe de Grenoble : en profondeur une température moyenne autour de 14 °C avec quelques anomalies à 15 et 16 °C

1) La campagne de mesures

Une campagne de mesures a été réalisée par une équipe de Sogreah, sur les piézomètres de la Ville de Grenoble (64 ouvrages accessibles) ainsi que sur cinq puits appartenant à la Ville de Grenoble.

La campagne de mesure s'est déroulée du 21 novembre au 1^{er} décembre 2006.

Le but de cette campagne est d'établir un état de référence sur les paramètres physiques de l'eau de la nappe phréatique : température et conductivité. Il est à noter que cette période ne correspond pas à la fin de la période d'utilisation des installations de rafraîchissement et de ce fait, les résultats présentés doivent être nuancés.

Au cours de la campagne, les mesures suivantes ont été réalisées :

- profondeur du piézomètre ou du puits ;
- niveau de la nappe ;
- température de l'eau en surface de nappe (0,2 m sous le niveau hydrostatique mesuré) et en fond de piézomètre ou de puits ;
- conductivité de l'eau en surface de nappe (0,2 m sous le niveau hydrostatique) et en fond de piézomètre ou de puits.

2) Les résultats de la campagne de mesures

La campagne menée a permis d'établir :

- une carte piézométrique (figure 3)

On constate bien que le Drac alimente la nappe alors que l'Isère la draine. De plus le gradient moyen est de l'ordre de 3 ‰.

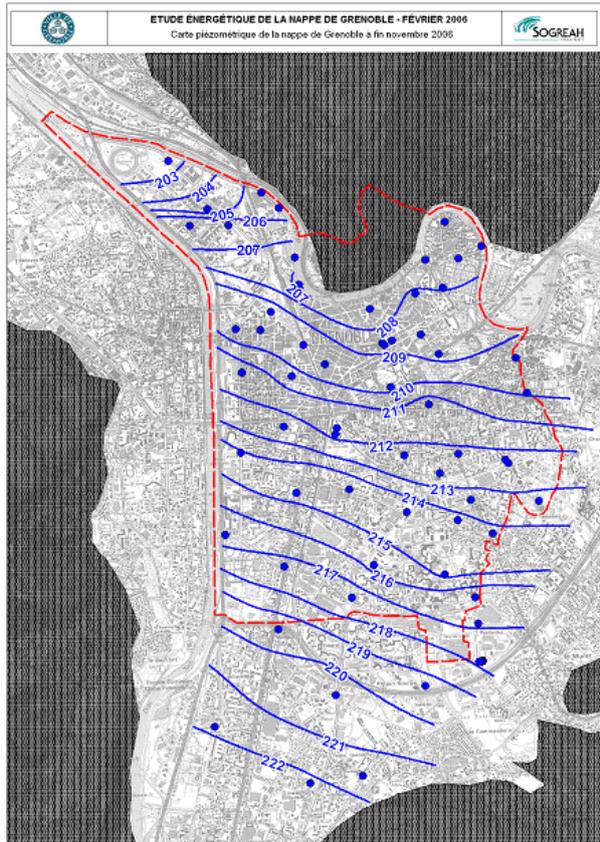


Figure 3 - Carte piézométrique

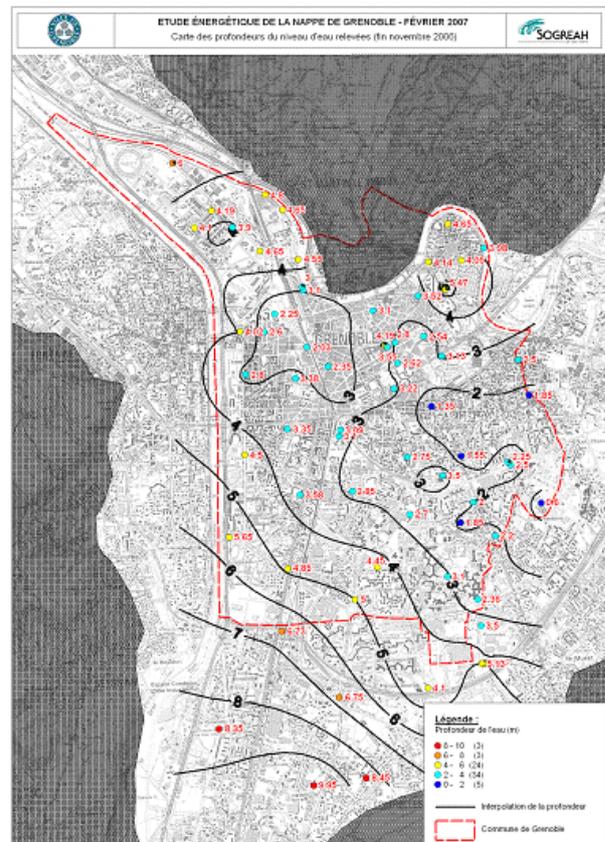


Figure 4 - Carte des profondeurs du niveau d'eau par rapport au sol

- une cartographie des profondeurs de la nappe par rapport au sol (figure 4)

D'après la carte de la figure 6 on constate que la profondeur du niveau d'eau varie entre 1 et 7 m sur la commune de Grenoble. Les profondeurs les plus faibles sont situées à l'Est de la commune et les plus fortes au Sud-ouest.

La profondeur de nappe est un paramètre important qu'il convient de bien prendre en compte lors des études de dimensionnement des doublets de forages.

En effet, un niveau de nappe relativement profond facilite les opérations de réinjection, alors qu'un niveau proche du sol risque de provoquer des débordements de nappe ou l'ennoiement de structures souterraines (caves, parkings...) si les ouvrages de réinjection sont mal dimensionnés. Il convient également de prendre en compte le caractère captif de la nappe dans certains secteurs de la plaine grenobloise. La réinjection d'eau en nappe captive peut alors se révéler délicate.

- une cartographie des températures en surface et en profondeur dans les ouvrages (figures 5 et 6)

La figure 5 représente les températures mesurées en surface dans les ouvrages soit en moyenne 20 cm sous le niveau statique de l'ouvrage.

On constate que les températures les plus basses (11 à 14 °C) sont situées principalement en bordure du Drac du fait des échanges rapides entre la nappe et la rivière.

Les températures les plus élevées sont situées principalement au niveau du centre-ville ainsi que dans les secteurs Est (16 à 17 °C), soit dans les secteurs éloignés de l'influence des cours d'eau.

Différents facteurs (autres que les facteurs naturels liés aux variations saisonnières), peuvent influencer sur les températures mesurées sur les piézomètres :

- Exfiltrations d'eaux provenant soit des égouts soit du réseau pluvial
- Rejet d'eaux pluviales en nappe
- Réinjection d'eau réchauffées ou refroidies provenant d'équipements géothermiques

La figure 6 présente les températures mesurées au fond des ouvrages, soit généralement à plus de 10 m de profondeur. Ces mesures sont donc plus représentatives des températures de la nappe.

Au niveau de ces températures « profondes », de légères différences sont notées selon les secteurs :

- le long du Drac, les gammes de températures sont **10 à 13 °C** ;
- sur le reste de la nappe, les températures sont comprises entre **14 à 15 °C**.

La température moyenne de la nappe est de **14,3 °C**.

Quelques anomalies thermiques localisées sont constatées avec des températures légèrement plus élevées **15 à 16 °C**. Pour certaines ces anomalies peuvent éventuellement être imputables à des doublets géothermiques proches.



Figure 7 - Cartographie des températures mesurées en surface

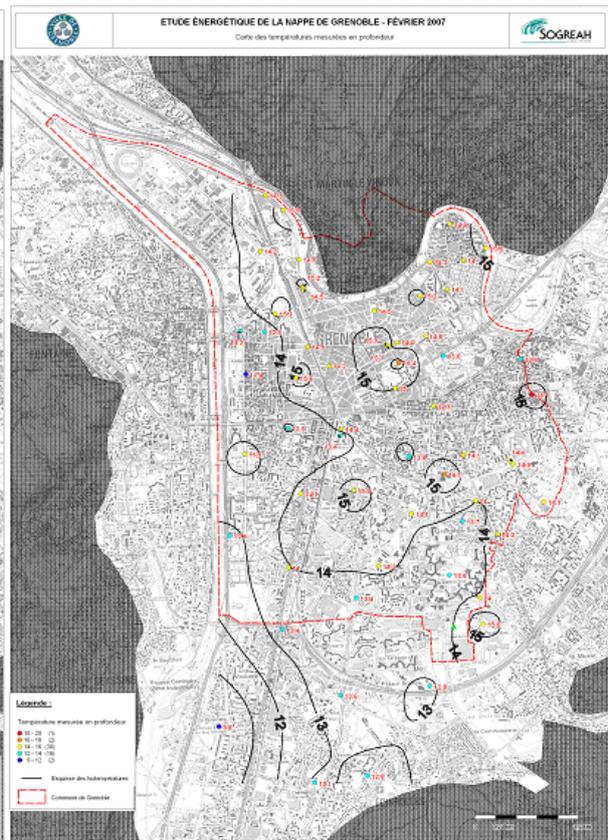


Figure 8 - Cartographie des températures mesurées en profondeur

III.5. Un potentiel thermique de la nappe faiblement utilisé

Une étude sur le potentiel thermique de la nappe avait déjà été réalisée par Sogreah en 1988 ([2]). Les résultats initiaux ont été réactualisés en fonction des éléments recueillis lors de la présente étude.

Les mesures de température réalisées en novembre 2006 sur la nappe phréatique de Grenoble, et le recensement des équipements à usage thermique installés sur cette nappe, tendent à montrer que le potentiel thermique de la nappe phréatique reste encore faiblement utilisé.

Un développement des équipements à usage thermique sur cette nappe peut donc être envisagé dans le cadre des recommandations correspondant à une gestion durable de la nappe. À cet effet, une carte d'aptitude et de contraintes a été établie, en croisant différents paramètres hydrogéologiques :

- perméabilité de l'aquifère ;
- débit exploitable par forages ;
- présence de terrains de recouvrement argilo-limoneux ou tourbeux ;
- nappe en charge ou nappe libre ;
- profondeur de la nappe sous le sol.

La carte d'aptitude et de contraintes pour l'exploitation thermique de la nappe de Grenoble (figure 7), fait apparaître, sous forme d'un zonage, des secteurs favorables pour l'implantation de doublets géothermiques et des secteurs moins favorables. Dans ces secteurs, il convient d'engager au préalable des reconnaissances hydrogéologiques permettant de s'assurer de la faisabilité de l'opération.

La ville de Grenoble a été ainsi divisée en 3 zones :

- une zone très favorable

Cette zone est située dans le cône de déjection du Drac où les alluvions sont grossières et très perméables. De plus, la nappe est relativement profonde (5 à 7 m) et le nombre d'installations déjà en place dans cette zone est faible. Les débits pouvant être exploités dans cette zone sont très importants ($> 300 \text{ m}^3/\text{h}$).

- une zone favorable

L'influence de l'Isère commence à se faire sentir dans cette zone avec quelques lentilles d'argiles au sein d'alluvions grossières. Le niveau de la nappe est de 2 à 3 m de profondeur. Les débits potentiels de cette zone sont de l'ordre de $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

- une zone moins favorable

En bordure de l'Isère, cette zone est moins favorable pour les installations géothermiques du fait de la forte présence d'argile et de tourbe (5 à 10 m), notamment en surface, qui peut rendre la nappe captive et compliquer ainsi les installations. Le niveau de la nappe est souvent proche du sol (1 à 2 m).

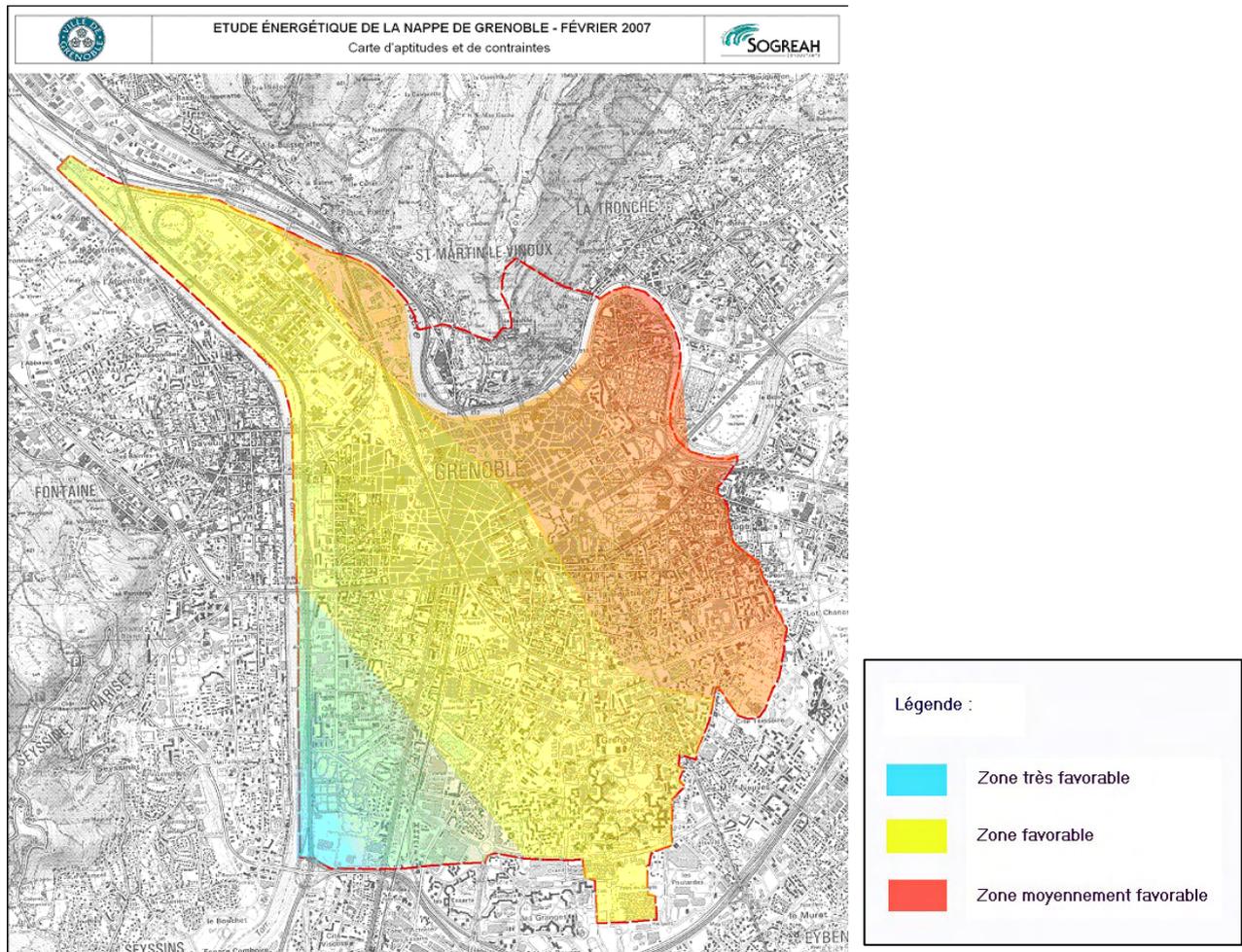


Figure 7 - Carte d'aptitudes et de contraintes

IV. CONCLUSIONS

Les résultats de l'étude illustrent la volonté de la ville de Grenoble de se doter d'outils contribuant à l'élaboration d'une gestion durable de la nappe.

Ceux-ci seront intégrés dans le « guide de la qualité environnementale dans l'architecture et l'urbanisme » destiné aux maîtres d'ouvrage et aux architectes.

Cependant, la mise en place d'une gestion durable implique de poursuivre la démarche initiée, notamment pour les aspects suivants :

- amélioration de la mise à connaissance, par les services déconcentrés de l'état, des nouvelles installations pour l'ensemble des acteurs impliqués dans la gestion de la nappe ;
- nécessité de mettre en place des dispositifs de mesure des débits prélevés et rejetés ;
- poursuite du suivi de la température de la nappe avec une densification du réseau de mesure ;
- évaluation de l'impact thermique non lié aux doublets géothermiques (infiltration des eaux pluviales...). ■

Références bibliographiques

(1) **Charguéron C., Canaletta B., 2007** – Étude sur l'utilisation énergétique de la nappe phréatique de Grenoble. Ville de Grenoble. SOGREAH.

(2) **Jardin P., 1988** – Utilisation énergétique des eaux de la nappe phréatique – site de Grenoble – Point Énergie. SOGREAH.

Atlas sur la Géothermie très basse énergie en région Centre

Jean-Claude MARTIN

BRGM - 3, avenue Claude-Guillemain - BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - jc.martin@brgm.fr

I. CONTEXTE DE RÉALISATION

La France va être confrontée dans les années à venir à de grands enjeux énergétiques : maîtriser sa consommation énergétique globale, sécuriser ses approvisionnements et diviser par un facteur 4 d'ici 2050 ses émissions de CO₂ pour limiter le réchauffement climatique

La Région Centre, dans le cadre de sa mesure phare « Faire de la région Centre un pôle européen en matière d'efficacité énergétique » attache une attention toute particulière au développement des énergies renouvelables et nouvelles. C'est dans ce cadre qu'elle a souhaité promouvoir le développement de la géothermie.

Comme aucun véritable inventaire géothermique n'avait été réalisé sur la région Centre depuis les années 1980, la dernière étude, terminée en 2001, ne concernait que les aquifères profonds du Dogger et du Trias, un projet de création d'un CD-ROM interactif montrant les potentialités géothermiques sur nappes de moins de 100 m de profondeur a vu le jour en 2005 avec le concours financier de la Région Centre, du BRGM, de l'ADEME et d'EDF.

II. OBJECTIFS

L'objectif principal était d'engager en région Centre une démarche visant à mettre à disposition des décideurs des collectivités locales, des informations objectives, concrètes et nécessaires pour une prise de décision quant à la réalisation d'étude de faisabilité pour la mise en place d'installations géothermique « Très Basse Énergie ».

Pour répondre à cet objectif, le BRGM a proposé un programme de travail pour la réalisation d'un atlas géothermique des ressources en eau souterraine, de moins de 100 mètres de profondeur, en région Centre. L'atlas ainsi réalisé donne les premières informations sur la disponibilité de la ressource et sur l'intérêt d'approfondir les études pour la mise en place de pompes à chaleur géothermales sur nappe.

III. PROGRAMME DES TRAVAUX

La réalisation de cet atlas, dont les résultats se présentent sous des formes cartographiques gérées par un système d'information géographique (SIG), a nécessité la réalisation des étapes suivantes :

- La synthèse des connaissances en matière d'hydrogéologie de faible profondeur, à ce titre, onze systèmes aquifères sont concernés. Les débits spécifiques varient de 4 m³/h/m pour les sables et argiles de Sologne, à 80 m³/h/m pour les formations carbonatées de Beauce avec quelques valeurs pouvant dépasser 1 000 m³/h/m dans les zones karstiques (BRGM/RP-54542-FR) ;

- La compilation des données relatives à la piézométrie ainsi que la géométrie des principaux aquifères (BRGM/RP-54715-FR) ;
- L'analyse des sondages et forages de référence (les données de plus de 2 300 forages ont été consultées) ;
- La caractérisation du potentiel géothermique des aquifères concernés basée sur les caractéristiques hydrogéologiques générales, les caractéristiques géologiques des réservoirs, les faciès physico-chimiques des eaux ainsi que sur leurs caractéristiques thermiques.

Sur la base de toutes ces informations, une analyse multicritère a été menée permettant d'aboutir à une cartographie des potentialités géothermiques.



Figure 1 - Carte des potentialités de la ressource géothermique très basse énergie en région Centre selon une échelle de 3 niveaux.

IV. RÉSULTATS OBTENUS

L'ensemble de la région Centre a fait l'objet de ces différents travaux et les résultats sont présentés au travers de quatre rapports ci-dessous référencés. Toutes ces informations ont été ramenées sur une grille au pas de 500 mètres, chaque cellule de la grille comprend plusieurs paramètres (géologie, hydrogéologie, profondeur de l'aquifère...). L'ensemble de ces informations a été transféré sur CD/ROM.

Cette discrétisation des données permet ensuite à l'aide d'un système d'information géographique « navigationnel » de sélectionner un secteur géographique basé sur le choix d'une commune et de restituer les données disponibles à la fois sous forme cartographique et sous forme d'une coupe verticale prévisionnelle montrant les positions du ou des niveaux aquifères pouvant faire l'objet d'une exploitation géothermique (BRGM/RP-55088-FR).

Le document interactif est téléchargeable gratuitement depuis le site internet <http://www.geothermie-perspectives.fr/>. ■

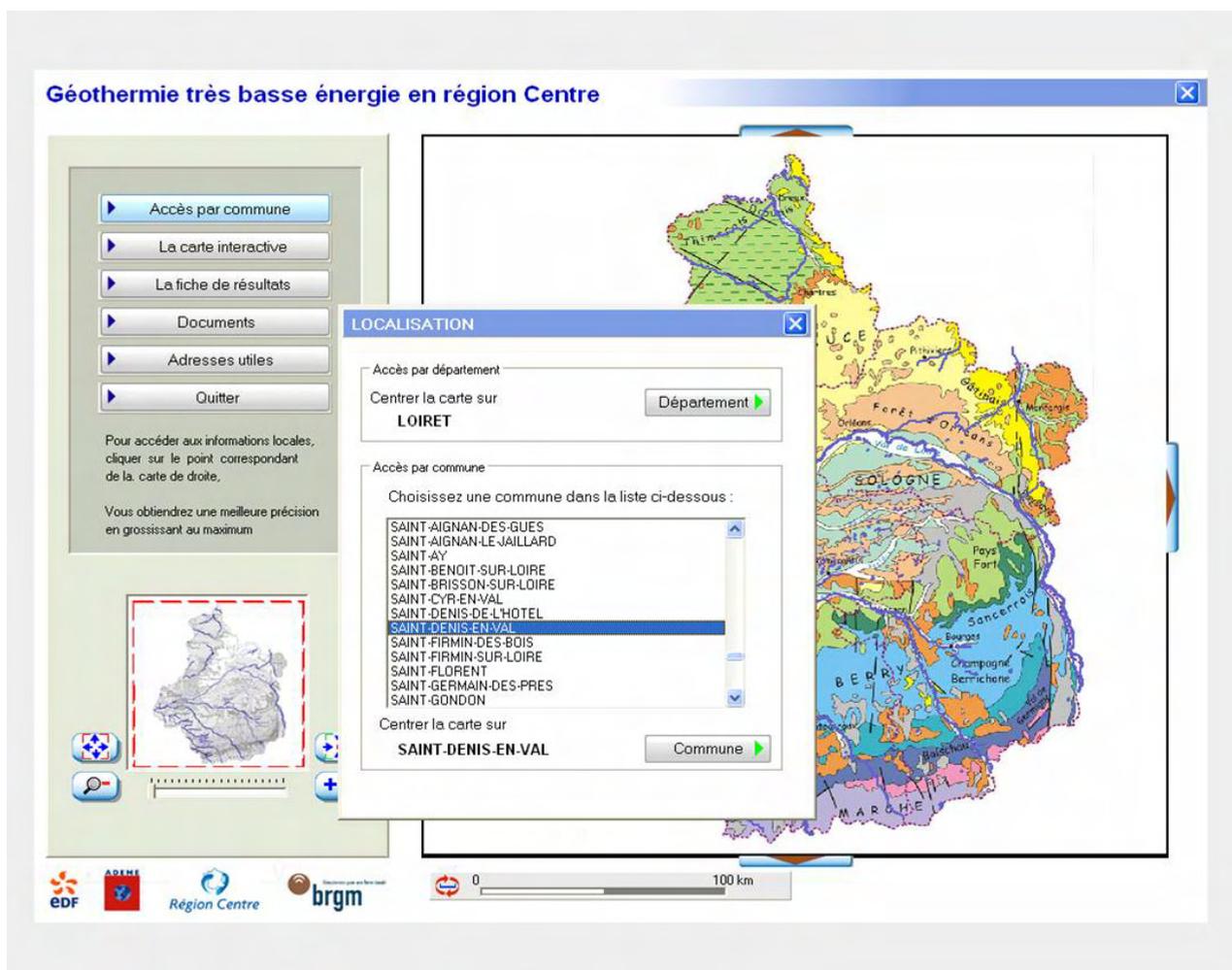


Figure 2 - Sélection géographique ou par commune du site d'étude

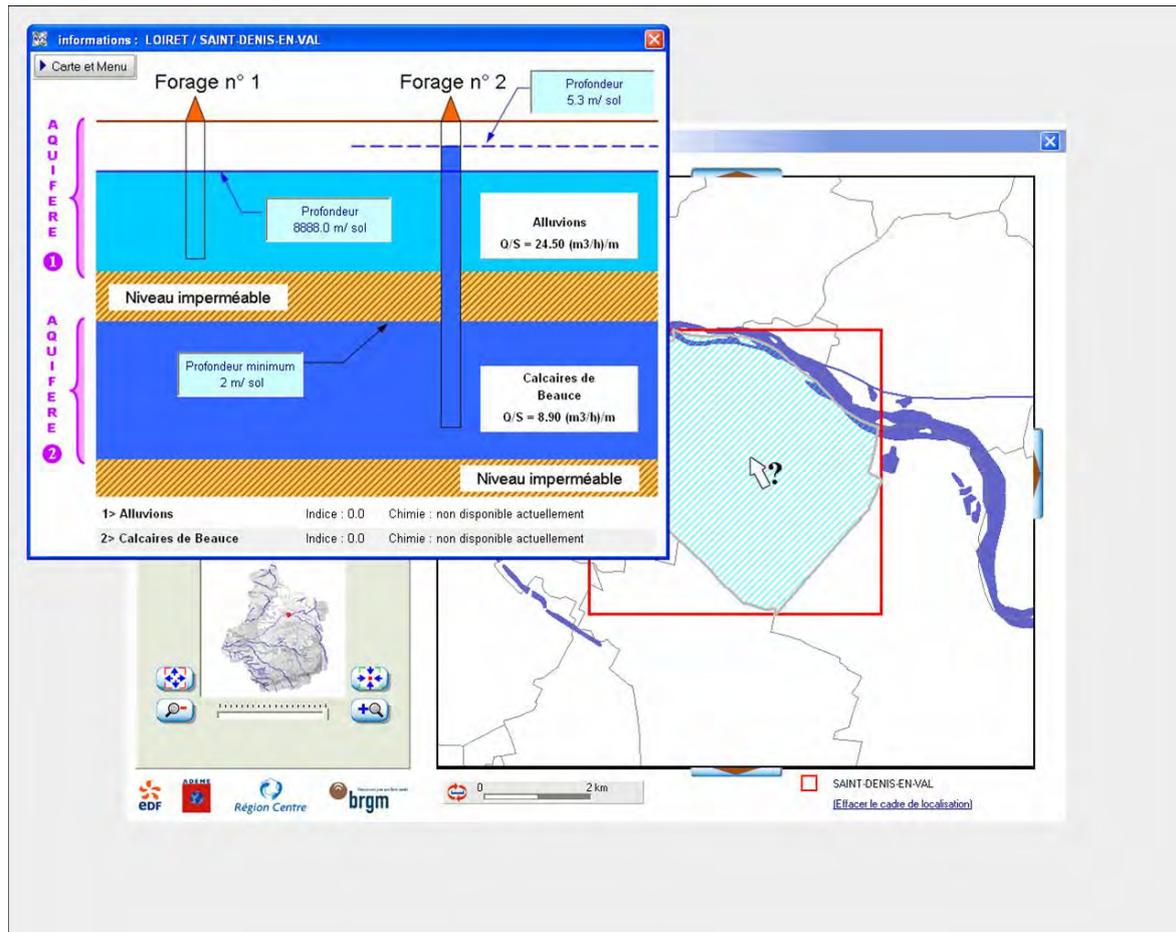


Figure 3 - Restitution des données avec une coupe prévisionnelle.

Références bibliographiques

Les rapports de l'étude (disponibles sur internet, site www.brgm.fr).

BRGM/RP-54340-FR - Rappels sur la géothermie très basse énergie en région Centre, rapport intermédiaire n° 1, décembre 2005.

BRGM/RP-54542-FR - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région centre : Étude cartographique et statistique des débits spécifiques des forages d'eau, rapport intermédiaire n° 2a, février 2006.

BRGM/RP-54715-FR - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région centre : Géométrie et niveaux piézométriques des principales formations aquifères, rapport intermédiaire n° 2b, juin 2006.

BRGM/RP-55088-FR - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région centre, rapport final, décembre 2006.

Utilisation de l'eau de nappe pour le traitement thermique des bâtiments

Christian GERINTE

BARBANEL – 26, villa Baudran – 94742 Arcueil Cedex – cgerinte@barbanel.fr

Les nappes d'eaux souterraines sont fréquemment exploitées en milieu urbain pour assurer une régulation thermique des bâtiments. Les systèmes assurent soit une production de chaud ou de froid, ou les deux alternativement. Dans ce dernier cas, il est expliqué pourquoi, une installation même performante, présentera un bilan déséquilibré et contribuera à réchauffer la nappe.

Les avantages des thermofrigopompes sont présentés en termes d'économie d'énergie et de réduction des émissions nuisibles à l'environnement, dont les CO₂.

Enfin, des éléments de gestion thermique des nappes urbaines sont présentés dans le but d'assurer la maîtrise du développement des exploitations et la faisabilité des projets.

I. UTILISATION DE L'EAU DE NAPPE DANS LES INSTALLATIONS THERMIQUES DES BÂTIMENTS

L'eau de nappe peut être utilisée dans les bâtiments pour produire :

- du chaud ;
- du froid ;
- du chaud et du froid.

I.1 Production de chaud

Si l'on fait abstraction de l'exploitation des nappes d'eau chaude en géothermie, le niveau général de température des nappes (13 à 17 °C) nécessite l'utilisation de machines frigorifiques fonctionnant en pompe à chaleur (type eau/eau ou eau/air) ; l'eau de nappe pompée est refroidie dans l'échangeur dit « basse pression » et l'énergie « pompée » est transférée vers l'échangeur dit « haute pression » pour produire du chaud à un niveau de température exploitable (35 à 65 °C).

I.2 Production de froid

La production de froid à partir des nappes souterraines peut être assurée par :

- Une utilisation directe : l'eau pompée entre 13 et 17 °C dessert directement les installations de refroidissement des bâtiments.
Les systèmes utilisés acceptent des températures d'eau réfrigérée assez élevées (16 à 18 °C) ; ce sont, par exemple, les planchers et plafonds rafraîchissants, les poutres froides.

- Une utilisation indirecte : l'eau pompée sert à évacuer l'énergie thermique produite par une machine frigorifique.

I.3 Production de chaud et de froid

Le bâtiment est desservi par une machine thermofrigorifique qui produit en permanence du chaud et du froid. Suivant les besoins thermiques globaux de l'immeuble, la nappe est utilisée soit pour apporter l'énergie nécessaire au chauffage en hiver, soit pour évacuer l'énergie liée au rafraîchissement en été.

II. POURQUOI L'UTILISATION THERMIQUE DES NAPPES CONDUIT-ELLE A UN RÉCHAUFFEMENT ?

Pour répondre à cette question, on peut revenir aux trois modes d'utilisation et les comparer aux systèmes traditionnellement utilisés.

II.1 Production de chaud

Pour produire du chaud en utilisant l'eau de nappe, l'installation doit comporter :

- un ou plusieurs puits de captage ;
- un ou plusieurs puits ou ouvrages de réinjection ;
- un ou plusieurs échangeurs thermiques permettant l'isolement des réseaux d'eau ;
- une ou plusieurs machines frigorifiques fonctionnant en pompe à chaleur.

Cette description sommaire permet d'apprécier la complexité de ce type d'installation par rapport à des installations plus traditionnelles que sont des chaufferies gaz ou des sous-stations raccordées à des réseaux urbains de chaud.

Par ailleurs, sur le plan administratif, ces installations peuvent nécessiter :

- pour la création des ouvrages de pompage et de réinjection, des dossiers de déclaration ou d'autorisation au titre de la loi sur l'eau ;
- pour les machines frigorifiques, des dossiers de déclaration ou d'autorisation au titre de la rubrique n° 2920 des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

Le coût des énergies gaz, réseaux urbains et électricité ne permet pas actuellement un temps de retour sur investissement pour une installation de pompage sur nappe en utilisation en chaud seule.

Dans ce contexte, l'utilisation des installations de pompage en chaud uniquement ne se développe pas.

II.2 Production de froid

La production de froid dans les bâtiments est assurée par des machines frigorifiques ; ces dernières sont associées à des systèmes de refroidissement du type « à air » ou « à eau » qui doivent être installés en extérieur.

Ceci conduit à des contraintes d'encombrement (surface technique en terrasse) des problèmes d'urbanisme (hauteur, gabarit) et des problèmes phoniques.

Par ailleurs, sur le plan administratif, ces installations nécessitent :

- des dossiers de déclaration ou d'autorisation pour les machines frigorifiques au titre de la rubrique n° 2920 des ICPE ;
- des dossiers de déclaration ou d'autorisation pour les systèmes de refroidissement humides au titre de la rubrique n° 2921 des ICPE.

Sur le plan de la performance énergétique, le refroidissement sur eau de nappe permet d'obtenir des EER (Efficacité Énergétique de Refroidissement) des machines frigorifiques de l'ordre de 4,3 à comparer à ceux des machines refroidies par air, 2,7 à 3 ou refroidies par eau, 3,3 à 3,5.

Le pompage sur nappe est souvent envisagé en refroidissement des machines frigorifiques.

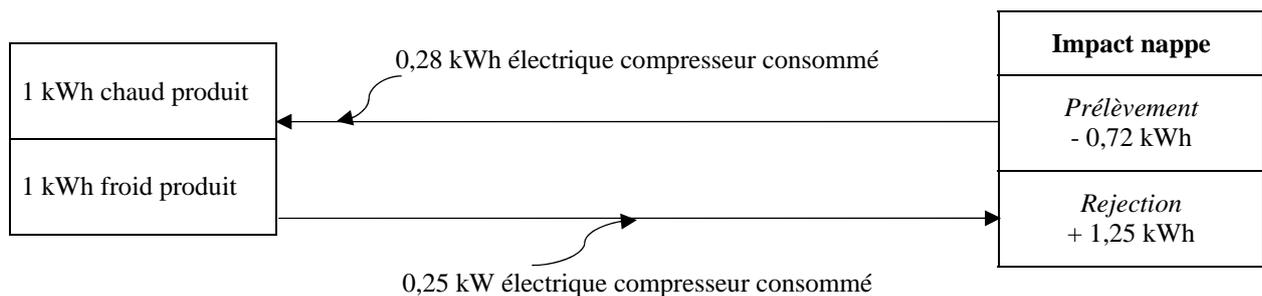
II.3 Production de chaud et de froid

Le principal marché des installations thermiques sur eau de nappe est celui des bâtiments nécessitant d'être équipés d'une production de chaud et d'une production de froid. En tertiaire, on peut citer les immeubles de bureaux, les centres commerciaux, les hôtels, les hôpitaux.

Mais même ce type d'utilisation où la nappe est sollicitée thermiquement en chaud et froid, l'impact est déséquilibré. D'abord pour les besoins thermiques annuels des bâtiments : les bureaux et centres commerciaux ont des besoins thermiques de refroidissement plus importants que ceux de chauffage.

Par ailleurs, le cycle frigorifique conduit à moins impacter, sur le plan thermique, la nappe en refroidissement qu'en chauffage.

Exemple :



III. QUEL EST L'IMPACT DE L'AUGMENTATION DES TEMPÉRATURES ?

- Pour l'utilisation :

- En production de chaud :

L'augmentation des températures de nappe est plutôt bénéfique.

- En production de froid :

Les impacts sont plus importants.

- Directe :

Des températures de l'ordre de 16 à 17 °C sont des maximales admissibles avec les systèmes les plus utilisés.

- En refroidissement de machines frigorifiques :

L'impact se situe principalement sur le débit d'eau pompée ; en effet, la température de rejection d'eau étant généralement limitée à 28 °C, à puissance égale, le débit nécessaire de pompage va être augmenté.

L'EER des machines frigorifiques n'est pas impacté par cette augmentation puisqu'il est fonction de la température de sortie d'eau des échangeurs qui, elle, reste constante à 28 °C.

IV. PEUT-ON REGULER L'AUGMENTATION DE TEMPÉRATURE ?

Il semble difficile de concevoir une installation thermique d'un bâtiment permettant un impact thermique équilibré sur la nappe (1 kWh rejeté en été contre 1 kWh prélevé en hiver).

En revanche, un impact maîtrisé peut être envisagé avec, par exemple :

- l'obligation d'utiliser la nappe en hiver pour les besoins de chauffage quand celle-ci est utilisée en refroidissement l'été ;

- un engagement sur les quantités mensuelles d'énergie thermique prélevée à la nappe.

V. RÉDUCTION DES ÉMISSIONS ET ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

À titre d'exemple, nous comparerons les consommations d'un bâtiment de bureaux équipé de deux systèmes différents, soit :

- **Solution n° 1 – Traditionnelle**

Production de chaud par une chaufferie gaz à condensation, et production de froid par un groupe froid à condensation par air.

- **Solution n° 2 – Thermofrigopompe**

Production de chaud et de froid par une thermofrigopompe (pompe à chaleur sur nappe).

Les besoins thermiques du bâtiment sont identiques pour les deux solutions étudiées :

- Besoins en chaud 40 kWh/m²/an
- Besoins en froid 60 kWh/m²/an

Mais les moyens de production et, par conséquence, les coefficients de performances étant différents, ont obtenu les consommations et dégagements suivants :

	Besoins [kWh/m ² .an]	Énergie		Équivalent		Déchets radioactifs	
		Finale kWh _{ef} /m ² .an	Primaire kWh _{ep} /m ² .an	CO ₂ kg/m ² .an	SO ₂ g/m ² .an	Faibles g/m ² .an	Forts g/m ² .an
Solution N° 1							
- Chaud	40	40	40	9,36	36	-	-
- Froid	60	22	57	0,82	7	1,11	0,22
Total	100	62	97	10,18	43	1,11	0,22

	Besoins [kWh/m ² .an]	Énergie		Équivalent		Déchets radioactifs	
		Finale kWh _{ef} /m ² .an	Primaire kWh _{ep} /m ² .an	CO ₂ kg/m ² .an	SO ₂ g/m ² .an	Faibles g/m ² .an	Forts g/m ² .an
Solution N° 2							
- Chaud	40	13	35	2,43	12	0,68	0,135
- Froid	60	14	35	0,51	14	0,69	0,138
Total	100	27	70	2,94	16	1,37	0,27

Pour un bâtiment de bureau de 10 000 m² SHON, la solution « thermofrigopompe » permet de réduire les émissions de CO₂ de 72 tonnes/an par rapport à une solution traditionnelle.

Les facteurs de conversion utilisés sont ceux du référentiel HQE 2006.

Facteurs d'émissions des combustibles en équivalent CO ₂	kg eq CO ₂ /kWh d'énergie finale
Charbon	0,384
Fioul lourd	0,322
Fioul domestique	0,3
Gaz naturel	0,234
Bois	0
Électricité	0,084
chauffage	0,18
éclairage	0,08
climatisation	0,037
autres	0,052
CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain)	0,153

Source : « RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE DE CERTIFICATION Bâtiments Tertiaires – Démarche HQE® »

VI. PLANS DE GESTION DES NAPPES URBAINES

Le souhait des thermiciens serait de trouver, dans des plans de gestion des nappes urbaines, les informations de base comme :

- la délimitation géographique des nappes pouvant être utilisées ;
- les niveaux de température généralement rencontrés ;
- les risques de pollution pouvant être trouvés et les obligations en termes de traitement de ces pollutions ;
- le potentiel thermique exploitable de la nappe, tant en positif qu'en négatif.

Ces données permettraient de déclencher une étude de faisabilité et d'opportunité pour l'utilisation de la nappe dans les installations thermiques du bâtiment. ■

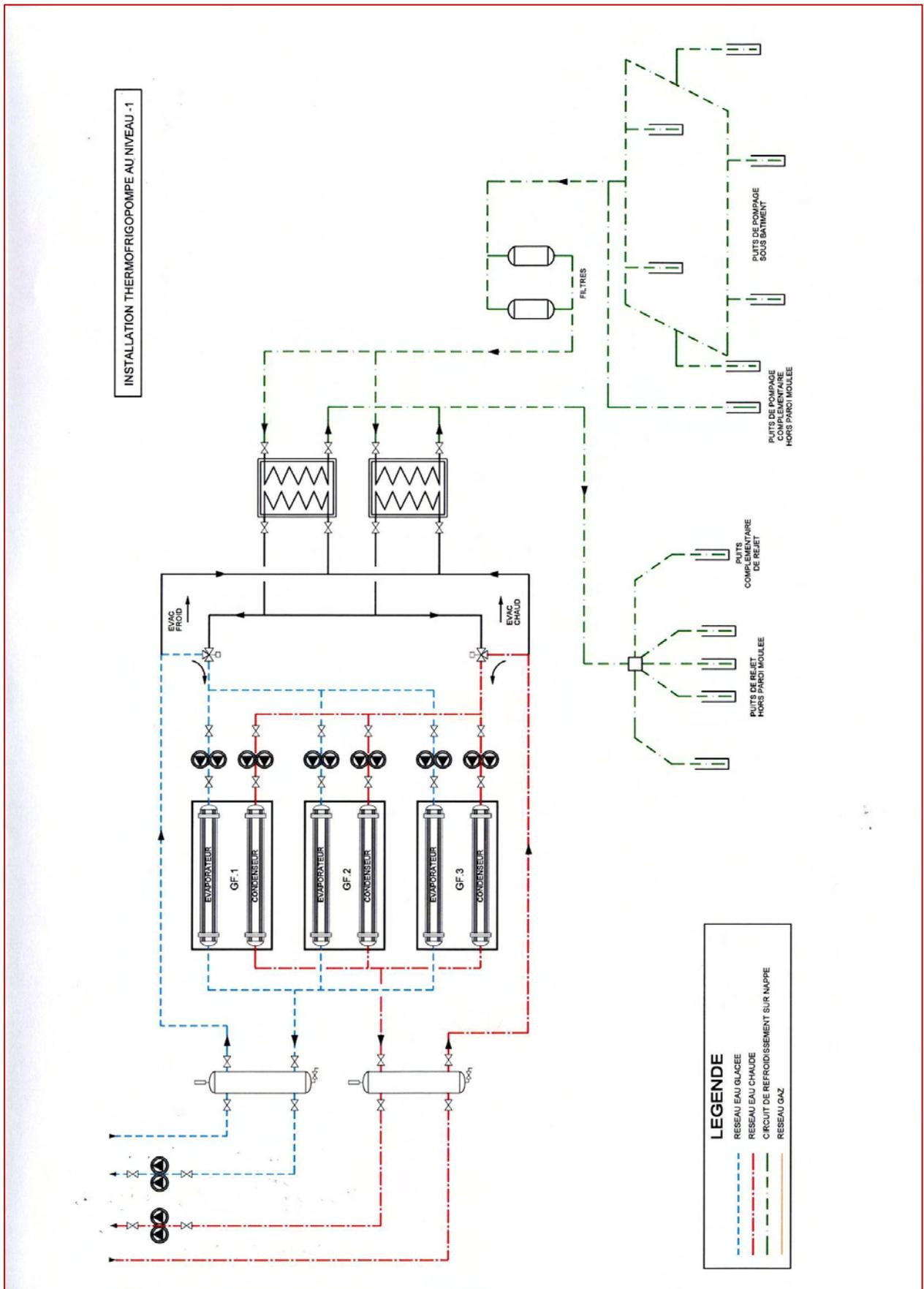


Schéma de principe simplifié – Thermofrigopompe « Salle 3000 » - Lyon

Régime thermique des nappes phréatiques à l'aplomb de bassins d'infiltration

Arnaud Foulquier, Florian Malard, Janine Gibert

UMR CNRS 5023, Écologie des Hydrosystèmes Fluviaux – Université Lyon 1, Bât. Forel
43, boulevard du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex, France

foulquier@univ-lyon1.fr - malard@univ-lyon1.fr - janine.gibert@univ-lyon1.fr

I. INTRODUCTION

Un réchauffement des eaux souterraines est observé sous de nombreuses grandes agglomérations urbaines (1). Cette augmentation de la température des eaux souterraines sous les villes peut atteindre 3 °C si l'on utilise comme valeur de référence la température des nappes situées dans les zones périphériques moins urbanisées. Il s'agit d'un processus complexe, hétérogène dans l'espace et dans le temps, qui résulte de différentes composantes. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (2) responsable d'une augmentation de la température de l'air à l'intérieur des villes est une de ces composantes à laquelle viennent s'ajouter les nombreuses sources de chaleur locales présentes dans les zones urbaines (pertes de chaleurs par les habitations, pompes à chaleurs).

Les pratiques d'infiltration d'eaux de ruissellement pluvial permettent de compenser la recharge des eaux souterraines, réduite en milieu urbain en raison de l'augmentation des surfaces imperméabilisées. Ces pratiques s'appuient sur les capacités, en termes de rétention des polluants, du sol et de la zone non saturée et consistent à infiltrer localement et rapidement d'importantes quantités d'eaux pluviales. L'infiltration artificielle des eaux de ruissellement pluvial peut contribuer au réchauffement des eaux souterraines en augmentant localement les transferts de chaleur par advection vers la nappe. Au niveau de l'agglomération urbaine de Lyon, les transferts de chaleur liés à l'infiltration des eaux de ruissellement sont d'autant plus importants à étudier que l'infiltration artificielle contribue fortement à la recharge des nappes (3).

Les recherches menées dans le cadre de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU, (4)) s'appuient sur un réseau de mesures réalisées en continu aussi bien à l'échelle du bassin-versant qu'en entrée de bassins d'infiltration mais également au niveau des eaux souterraines. Les travaux visent à définir l'influence locale de plusieurs bassins d'infiltration de l'agglomération lyonnaise sur le régime thermique des eaux souterraines tout en précisant les paramètres clés déterminant les transferts de chaleur.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Quinze sites répartis sur l'ensemble de l'agglomération lyonnaise ont été sélectionnés (Fig. 1).

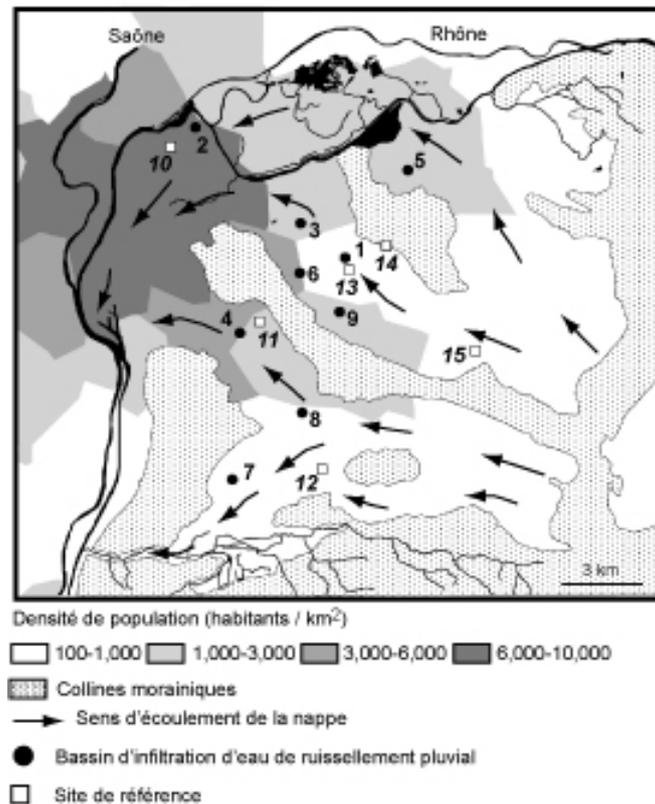


Figure 1 - Répartition des sites étudiés au sein de l'agglomération lyonnaise

Neuf sites correspondent à des zones de recharge situées à l'aplomb de bassins d'infiltration d'eau pluviale et 6 sites de référence correspondent à des secteurs de la nappe non soumis à l'infiltration artificielle d'eau de ruissellement pluvial. Les surfaces de bassins versants et l'épaisseur de la zone non saturée associées aux sites de recharge varient respectivement entre 2,5 et 210 ha et 5 et 20 m. Tous les sites sont équipés d'un piézomètre crépiné au niveau du premier mètre sous la surface libre de la nappe.

Le site de recharge 1 présente la particularité d'être équipé d'une flûte de pan à 5 piézomètres permettant d'effectuer des mesures à des profondeurs de 1, 2, 3, 4 et 5 m sous la surface libre de la nappe. Des enregistrements de la température et de la conductivité des eaux souterraines ont été effectués dans chaque piézomètre, pour chacun des sites, au pas de temps horaire en utilisant une sonde multiparamétrique YSI 600 XLM. La durée des chroniques ainsi obtenues atteint 3 années pour certains sites.

III. RÉSULTATS

Les variations de température des eaux souterraines sont nettement plus importantes sous les bassins d'infiltration que sous les sites de référence que l'on se place à l'échelle de l'événement pluvieux ou à une échelle annuelle (Fig. 2).

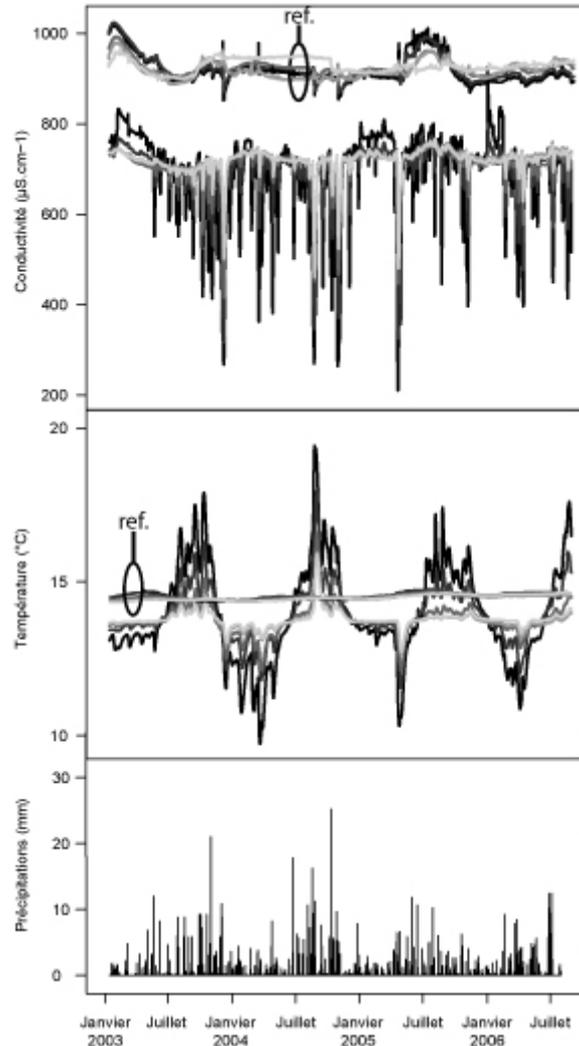


Figure 2 - Variation de la conductivité et de la température des eaux souterraines sur le site de recharge 1 et des précipitations sur le bassin-versant associé. Les données correspondantes pour le site de référence (réf.) sont également représentées. Les cinq profondeurs sous la surface libre de la nappe (1 à 5 m) sont représentées à l'aide d'un dégradé du noir au gris, les teintes claires correspondant aux horizons profonds.

III.1 Échelle de l'événement pluvieux

Sous les sites de recharge, les variations de température sont directement liées à l'infiltration d'eau de ruissellement pluvial ; elles peuvent atteindre 4 °C à l'échelle d'un événement pluvieux (Figure 2). À l'échelle événementielle, la variation de température observée à l'aplomb des bassins d'infiltration est fonction de l'interaction entre le volume infiltré et l'écart de température entre les eaux de ruissellement pluvial et les eaux souterraines.

III.2 Échelle annuelle

Les effets de l'infiltration artificielle s'observent également au niveau de l'amplitude annuelle de la température des eaux souterraines. À l'aplomb des bassins d'infiltration, l'amplitude thermique annuelle est en moyenne 9 fois supérieure à celle des sites de référence. L'amplitude de la température des eaux souterraines sous les sites de recharge augmente de façon logarithmique avec la taille du bassin-versant associé au bassin d'infiltration. Sous les sites de référence, l'amplitude diminue avec l'épaisseur de la zone non saturée.

III.3 Variabilité interannuelle de la température des eaux souterraines

La variabilité interannuelle de la température moyenne des eaux souterraines sous les sites de recharge dépend de la distribution saisonnière des précipitations. La température moyenne des eaux souterraines dans les deux premiers mètres sous la surface libre de la nappe augmente lorsque les précipitations interviennent majoritairement lors de la saison chaude (Fig. 3).

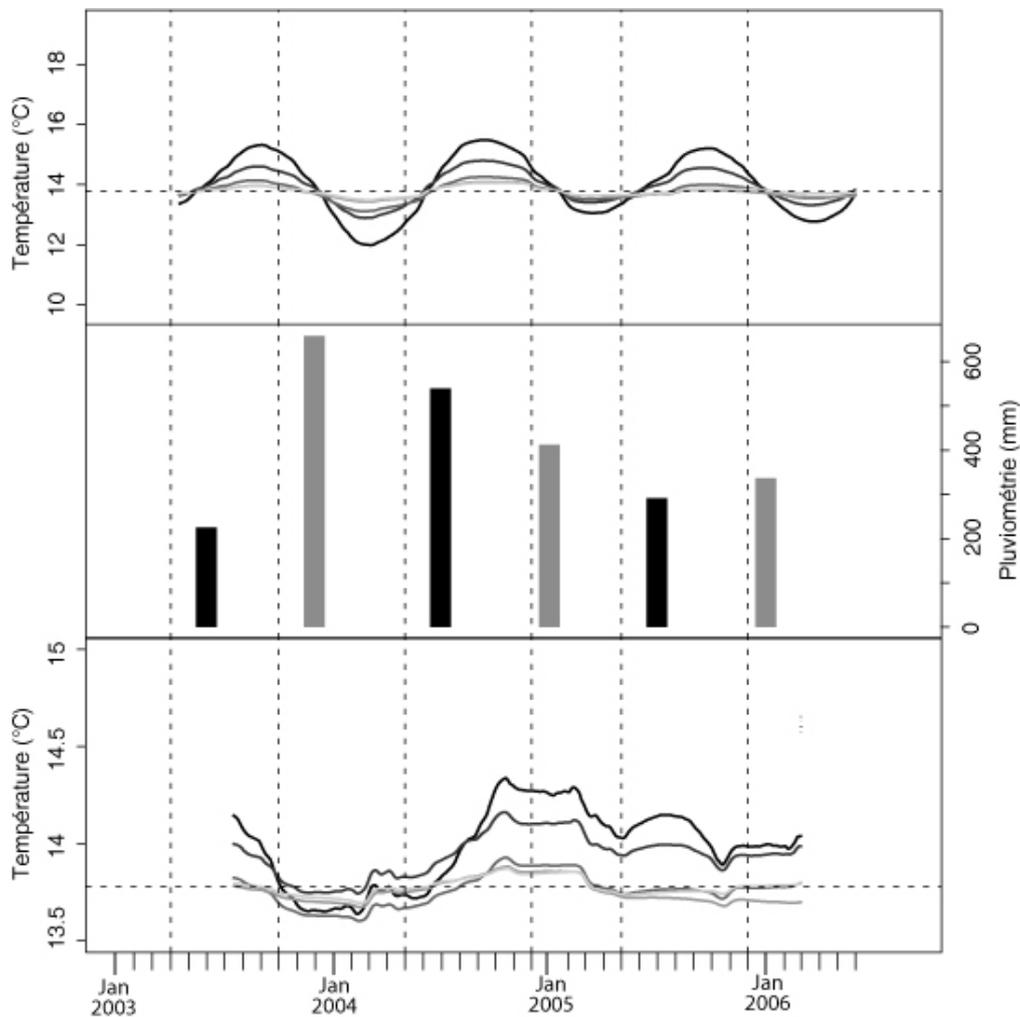


Figure 3 - Relation entre le régime saisonnier des précipitations et la température de la nappe à l'aplomb du site de recharge 1. Le panneau du haut correspond à la composante saisonnière de la température des eaux souterraines. Le panneau du milieu correspond au cumul des précipitations pour les saisons chaudes (noir) et froides (gris). Le panneau du bas correspond à la moyenne annuelle mobile de la température de la nappe. Les cinq profondeurs sous la surface libre de la nappe (1 à 5 m) sont représentées à l'aide d'un dégradé de noir vers le gris, les teintes claires correspondant aux horizons profonds.

IV. DISCUSSION

Les pratiques d'infiltration artificielle d'eau de ruissellement pluvial entraînent de fortes variations de la température des eaux souterraines quelle que soit l'échelle temporelle considérée. Il est toutefois possible de réduire l'amplitude de ces variations en réduisant la surface du bassin-versant associé au bassin d'infiltration.

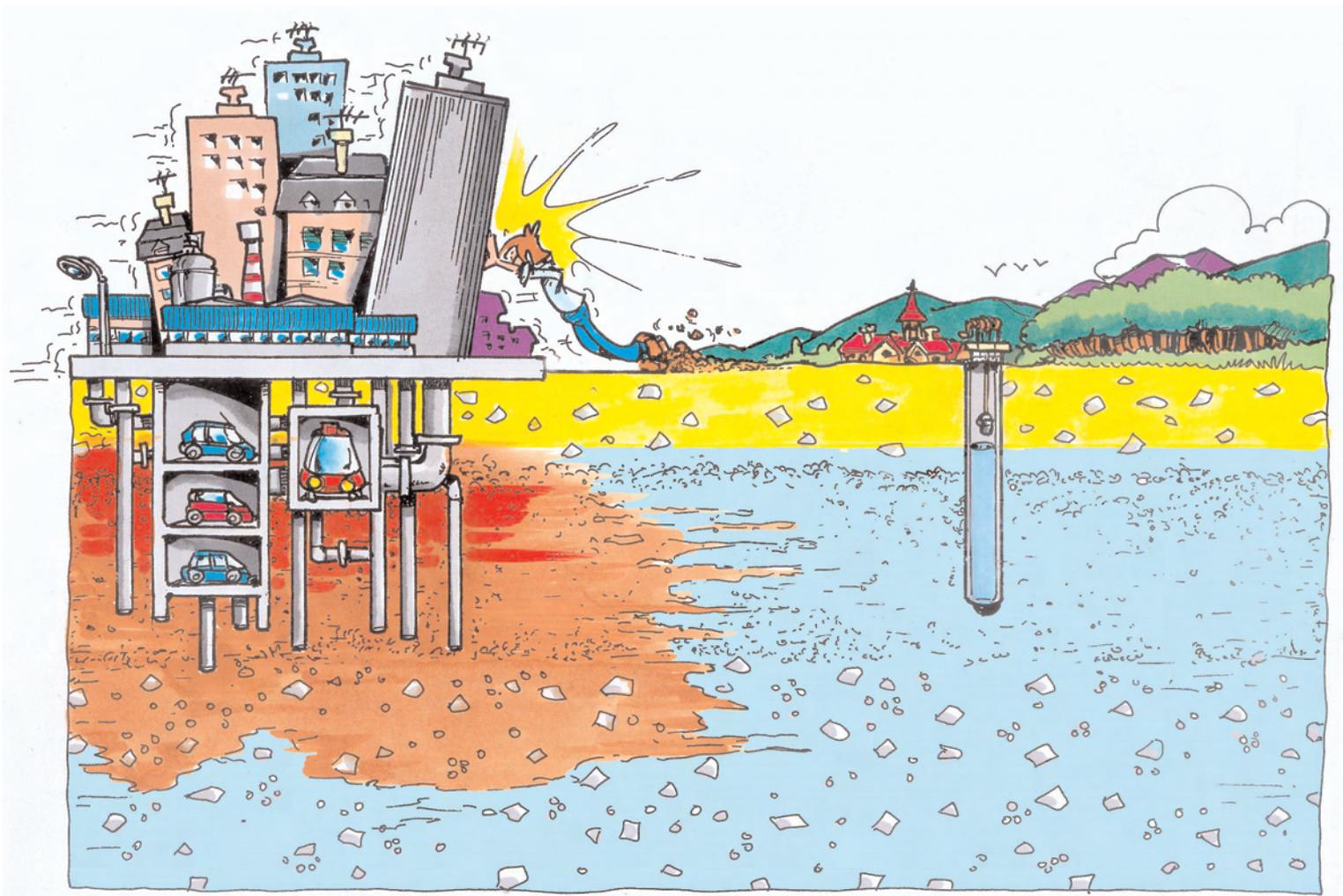
L'effet de l'infiltration artificielle sur la température moyenne des eaux souterraines dépend du type de climat considéré. Cet effet sera celui d'un réchauffement local pour les régions présentant des précipitations plus importantes lors de la saison chaude et un refroidissement lorsque les précipitations ont lieu principalement lors de la saison froide. À Lyon, l'infiltration artificielle d'eau de ruissellement pluvial augmente donc localement la température moyenne des eaux souterraines car les précipitations sont plus importantes lors de la saison chaude. Ce réchauffement local reste faible ($< 0,5$ °C) et bien inférieur à celui engendré par les pompes à chaleur. À une échelle annuelle, le site de recharge 1, associé à un bassin-versant de 180 ha, réinfiltré des eaux de ruissellement pluvial arrivant avec un débit moyen avoisinant les $60 \text{ m}^3/\text{h}$ et une température moyenne de $14,4$ °C (moyenne pondérée par les débits). Pour comparaison, il existerait dans des zones densément peuplées de l'agglomération lyonnaise, pas moins d'une pompe à chaleur tous les 80 ha, avec un débit de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ et une température de rejet supérieure à 20 °C (5). Les recherches se poursuivent en s'appuyant sur les données recueillies sur le site de recharge 1 afin d'établir un modèle des écoulements d'eau de ruissellement pluvial et des transferts de chaleurs, à l'aplomb, mais également à l'aval des bassins d'infiltration. ■

Références bibliographiques

- (1) **Taniguchi M., 2006** – Anthropogenic effects on subsurface temperature in Bangkok, *Climate of the Past Discussions*, 2: 831-846.
- (2) **Bornstein, R.D., 1968** – Observation of the urban heat island effect in New York city. *Journal of Applied Meteorology*, 7 (4): 575-582.
- (3) **Datry T., 2003** – Urbanisation et qualité des nappes phréatiques: réponses des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau pluviale. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, Lyon, France, 216 p.
- (4) **Barraud S., Gibert J., Winiarski T., Bertrand Krajewski J.L., 2002** – Implementation of a monitoring system to measure impact of stormwater runoff infiltration. *Water Science & Technology*, 45 (3), p. 203-210.
- (5) **Horizons, 2000** - Synthèse hydrogéologique et thermique des forages pompes à chaleur. Lyon - Villeurbanne (69). Rapport d'étude DH160, Horizons, Villefontaine, France, 32 p. + annexes.

Quatrième session

GESTION ET RÉGLEMENTATION



Sécurisation de l'alimentation en eau de consommation en situation de crise : le cas de l'agglomération lyonnaise et de son approvisionnement potentiel via sa nappe urbaine profonde

Philippe Corrignan ⁽¹⁾, Yves Delacretaz ⁽²⁾, Noël Mongereau ⁽³⁾

⁽¹⁾ ANTEA - Le Parc du Lyonnais – 392, boulevard des Mercières
69140 Rillieux-La-Pape - p.corrignan@antea-ingenierie.fr

⁽²⁾ LE GRAND LYON - Mission des Risques Majeurs - 20, rue du Lac - BP 3103
69399 Lyon Cedex 3 - ydelacretaz@grandlyon.org

⁽³⁾ Professeur honoraire des Universités – 41, rue Tronchet
69006 Lyon - noel.mongereau@neuf.fr

Une réflexion est menée sur l'exploitation intra-muros des ressources en eau sous-urbaines. Elle est axée sur l'exemple des nappes souterraines du Grand Lyon et développe un nouveau concept d'ouvrage de captage et stockage permettant en cas de crise une distribution d'eau de consommation. Elle intègre l'existence locale d'ouvrages souterrains l'aquifère molassique produisant une eau de qualité non utilisée à ce jour. Ces ouvrages (parcs de stationnement souterrains), d'un accès sécurisé, d'une logistique optimale et présentant une grande surface disponible, sont des captages/stockages potentiels au cœur de la ville. L'hydrogéologie des nappes sous le Grand Lyon est favorable à ce développement car une nappe alluviale superficielle protège un aquifère sous-jacent de qualité.

I. INTRODUCTION

La ville de Lyon compte de nombreux ouvrages souterrains profonds qui, du fait de leur immersion en nappe et de leur mode de réalisation de type radier drainant, induisent des prélèvements importants d'une eau de qualité, qui sont ensuite directement rejetés à la nappe alluviale.

Le présent projet concerne l'exploitation de cette eau dans le cadre de la sécurisation de l'alimentation en eau potable de l'ensemble de l'agglomération lyonnaise en complément du dispositif de sécurisation existant. Ce projet a fait l'objet en 2003 d'un dossier déposé auprès de la Commission Européenne afin d'obtenir des subventions. Ce projet était porté par une maîtrise d'ouvrage comprenant Le Grand Lyon, le BRGM et Lyon Parc Auto, ANTEA étant l'ingénierie responsable du projet.

II. LA PROBLÉMATIQUE DE L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE L'AGGLOMÉRATION LYONNAISE EN CAS DE CRISE

Les caractéristiques générales des installations de production et de distribution d'eau potable sont les suivantes :

- champ captant de 370 hectares ;
- 3 usines de production d'eau et une usine de secours ;
- 80 cuves et réservoirs ;
- 3 000 km de canalisations ;
- 1 400 km de branchements.

En cas de crise correspondant à des accidents, des actes de malveillance ou de guerre, deux situations se présentent :

- il y a rupture de l'alimentation en eau potable ;
- l'alimentation est maintenue mais le caractère potable de l'eau ne peut être assuré : il y a donc nécessité de la fourniture d'une eau de consommation par un autre biais.

Dans les deux cas, ce nouvel apport d'eau de consommation doit être capable de répondre aux besoins d'une population de quelques dizaines de milliers à quelques centaines de milliers de personnes, voire plus.

La solution retenue aujourd'hui pour répondre à une telle situation de crise correspond à la mise à disposition de bouteilles d'eau sur une vingtaine de sites depuis 3 à 4 « greniers à eau » correspondant à des plates-formes de stockage, complétée si besoin par la mise en œuvre d'unités mobiles de traitement. Le principe de cette sécurisation est d'amener dans la ville, depuis l'extérieur, l'eau de consommation.

La réflexion qui suit se place dans une autre perspective puisqu'il s'agit d'exploiter l'eau disponible au cœur de la ville. Ces approches sont donc complémentaires et, mises en œuvre en parallèle, ont l'avantage de renforcer le plan de sécurisation existant.

III. LE CAPTAGE DE L'EAU DE L'AQUIFÈRE MOLASSIQUE VIA LES PARCS DE STATIONNEMENT SOUTERRAIN

III.1. Les parcs de stationnement souterrain en rive gauche du Rhône

Ce projet concerne potentiellement tous les parcs de stationnement souterrain de plusieurs niveaux, situés en rive gauche du Rhône (géologie favorable), de type radier drainant et qui donc de fait présentent une paroi moulée ancrée dans la molasse. Ces ouvrages montrent une coupe moyenne du type :

Nappe alluviale	Située à quelques mètres de profondeur		
	Épaisseur	Perméabilité	Nature
Remblais			
Alluvions	Une vingtaine de mètres	Les alluvions sont a minima 100 fois plus perméables que la molasse	Graviers et sables
Molasse	- 150 m ? - à nulle au niveau en rive droite du Rhône		Sables micacés, plus ou moins grossiers et lités pouvant être plus ou moins argileux

Tableau 1 - Coupe type moyenne d'un parc de stationnement souterrain ancré dans la molasse

Ces ouvrages étant dans les grandes lignes identiques quant au contexte géologique et aux principes d'aménagement, le cas du parc Bonnel-Servient a été pris à titre d'exemple.

III.2. L'exemple du parc de stationnement souterrain Bonnel-Servient

III.2.1. Caractéristiques de l'ouvrage

Le parc de stationnement souterrain Bonnel-Servient, ouvert le 6 mars 1995, est situé au croisement des rues Servient, Créqui, Bonnel et Duguesclin.

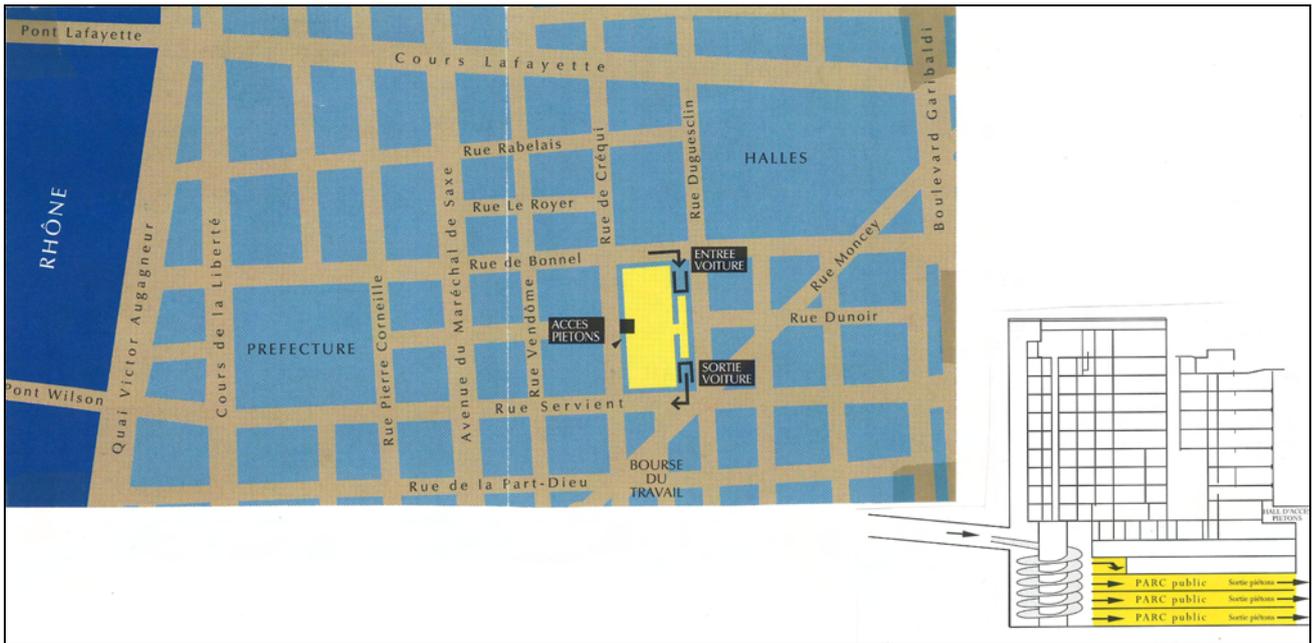


Figure 1 - Plan de situation du parc de stationnement Bonnel-Servient

La coupe de l'ouvrage est la suivante :

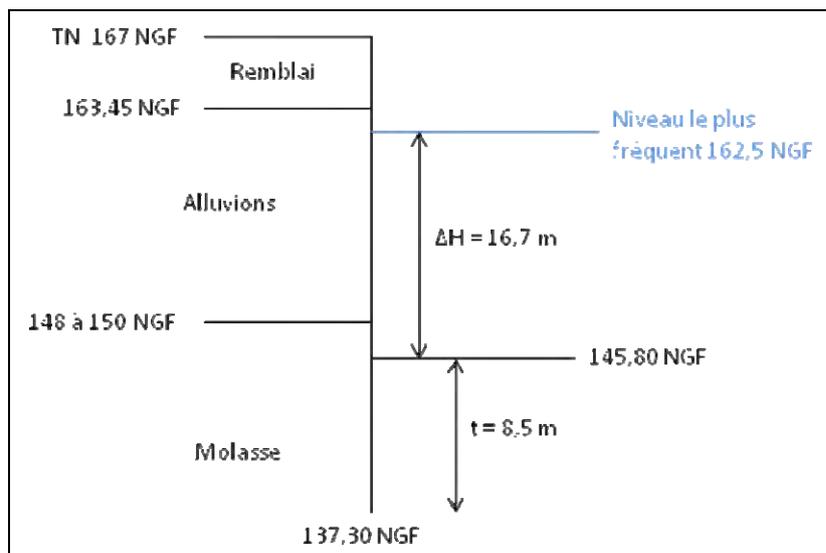
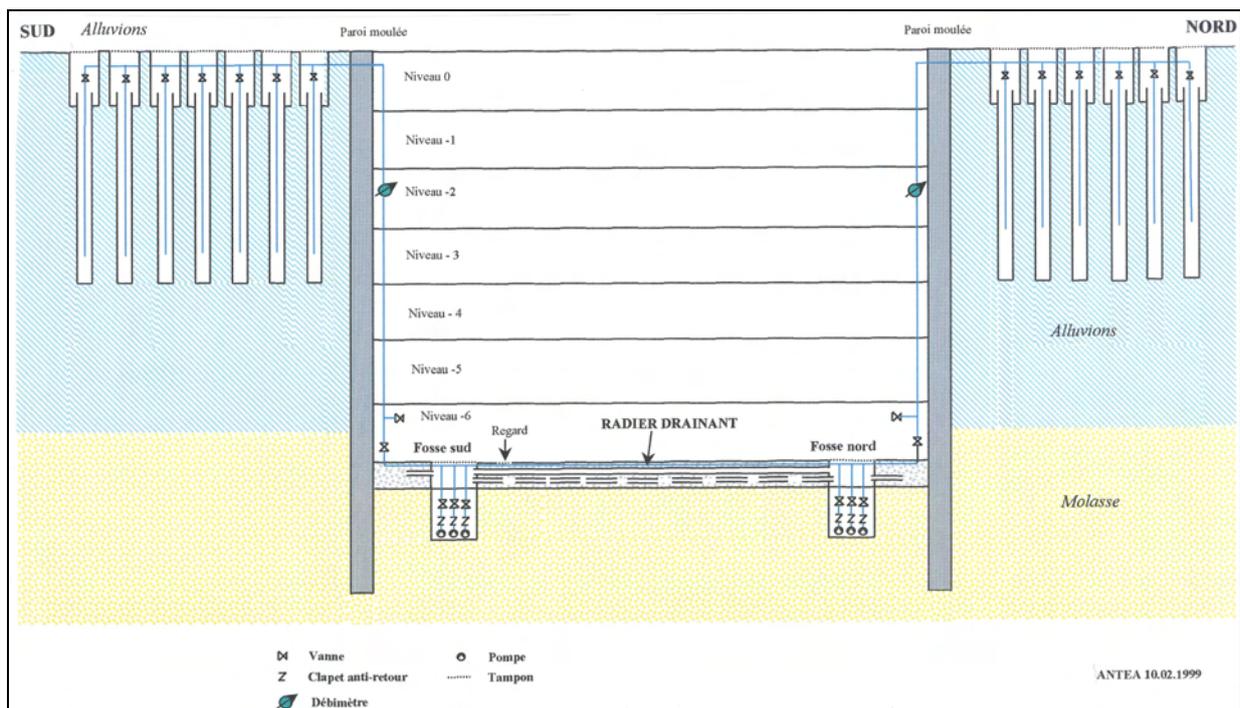


Figure 2 - Coupe de l'ouvrage (parc de stationnement Bonnel-Servient)

Dispositif drainant global

- Radier drainant constitué de drains noyés dans un massif drainant
- Réseau de collecte
- 2 fosses de pompage
- Réinjection de l'eau dans la nappe alluviale via 13 forages de réinjection
- Réseau distinct pour la récupération des eaux dites d'égouttures (eaux résiduelles issues de la paroi moulée + eaux apportées par les voitures) comprenant un prétraitement et un rejet au réseau d'assainissement de la ville.



III.2.2. Qualité de l'eau extraite depuis l'aquifère molassique

L'aquifère molassique capté à l'aplomb du parc de stationnement se trouve naturellement protégé par :

- une zone non saturée d'environ 5 m d'épaisseur ;
- un aquifère supérieur alluvial qui, compte tenu des contrastes de perméabilité (facteur à minima de 100 entre les 2 formations), possède une fonction drainante forte conférant ainsi à cette formation un rôle d'écran vis-à-vis d'éventuelles pollutions de surface ;
- l'absence de captage de la partie supérieure de l'aquifère molassique (une dizaine de mètres) situé à l'interface avec l'aquifère alluvial.

Cette protection naturelle se trouve confirmée par le suivi réalisé depuis 1995 sur l'eau drainée et pompée qui présente les caractéristiques suivantes :

- **Mesures *in situ* :**
 - une centaine de mesures réalisées,
 - paramètres suivis pH, potentiel rédox, température, conductivité, oxygène dissous,
 - constat : grande stabilité physico-chimique ;
- **Analyses physico-chimiques :**
 - une cinquantaine d'analyses réalisées,
 - paramètres mesurés : bicarbonates, calcium, magnésium, sodium, potassium, nitrates, sulfates, silice, chlorures, ammoniac, nitrites, phosphore, fer, manganèse, matières en suspension totales, hydrocarbures totaux,
 - constat : grande stabilité physico-chimique.

<i>Fosse sud</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Écart type</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
HCO ₃ ⁻	276,4	9,0	261,0	290
Ca ⁺⁺	96,7	4,0	90,0	112
Mg ⁺⁺	17,9	0,7	16,7	20
Na ⁺	18,0	1,1	16,8	23
K ⁺	4,1	0,3	3,7	5
NO ₃ ⁻	19,1	1,8	17,4	26
SO ₄ ^{- -}	76,0	3,0	70,0	80
S _i O ₂	14,4	1,3	12,9	18
Cl ⁻	25,6	1,3	23,7	28
Hydrocarbures totaux	Absence			

Tableau 2 - Analyses physico-chimiques de l'eau pompée et drainée par le parc de stationnement souterrain Bonnel-Servient

- **Analyses bactériologiques :**
 - une cinquantaine d'analyses réalisées ;
 - paramètres évalués : micro-organismes aérobies à 37 °C, micro-organismes aérobies à 22 °C, coliformes totaux à 37 °C, coliformes thermotolérants à 44 °C, streptocoques fécaux, spores anaérobies sulfito-réductrices ;
 - constat : qualité d'eau satisfaisante à l'exception de 2 analyses qui présentent uniquement quelques germes indicateurs de contamination fécale.

III.2.3. Débit

Le débit mesuré depuis 1995 est constant et de l'ordre de 350 m³/h.

III.2.4. Mesures préconisées pour fiabiliser la production d'une eau de consommation

- Analyse complète type CEE ;
- Analyses isotopiques tritium et $^{16}\text{O} / ^{18}\text{O}$;
- Suivi de la qualité de l'eau durant 1 an à une fréquence mensuelle ;
- Simulation d'une contamination de l'aquifère supérieur par traçage et évaluation de l'impact sur l'aquifère molassique ;
- Mise en place d'une désinfection type UV si besoin (ex : demande des autorités sanitaires).

III.2.5. Exploitation de cette eau

L'exploitation de cette eau en tant qu'eau de consommation en situation de crise peut être envisagée de différentes manières. Les solutions qui s'offrent, en commençant par celle la plus pragmatique et la plus rapidement mise en œuvre et en finissant par celle la plus ambitieuse, sont les suivantes :

1. Connexion possible au niveau des forages de rejet afin de pouvoir remplir des camions citernes de type alimentaire : ce dispositif est prévu sur la plupart des parcs de Lyon Parc Auto.
2. Fontaines publiques à double fonction
 - de type ludique en situation « normale » ;
 - de type « eau de consommation » en situation de crise.
3. Mise en place d'une ligne de remplissage de bonbonnes au dernier niveau du parc avec stockage sur place (stockage possible sur le seul dernier niveau) :
 - bonbonnes de 18,9 l ;
 - nombre de bonbonnes stockées : 41 664, soit environ 800 000 litres.
4. Détournement d'une part du débit global vers un réseau AEP qui aurait été préalablement modulé (fermetures de vannes présélectionnées) afin de desservir les sites sensibles (cellules de crise, hôpitaux, prisons...).

III.3. Le potentiel disponible

Les ouvrages de stationnement souterrain de type radier drainant susceptibles de fournir une eau de qualité en grande quantité à l'image de celle produite à Bonnel-Servient sont les suivants :

- Bonnel-Servient
- Cité Internationale
- Gare Part-Dieu
- Hôtel de Ville Villeurbanne
- Lyautey (en cours de réalisation)
- Atrium
- Tour oxygène (en cours de réalisation), etc.

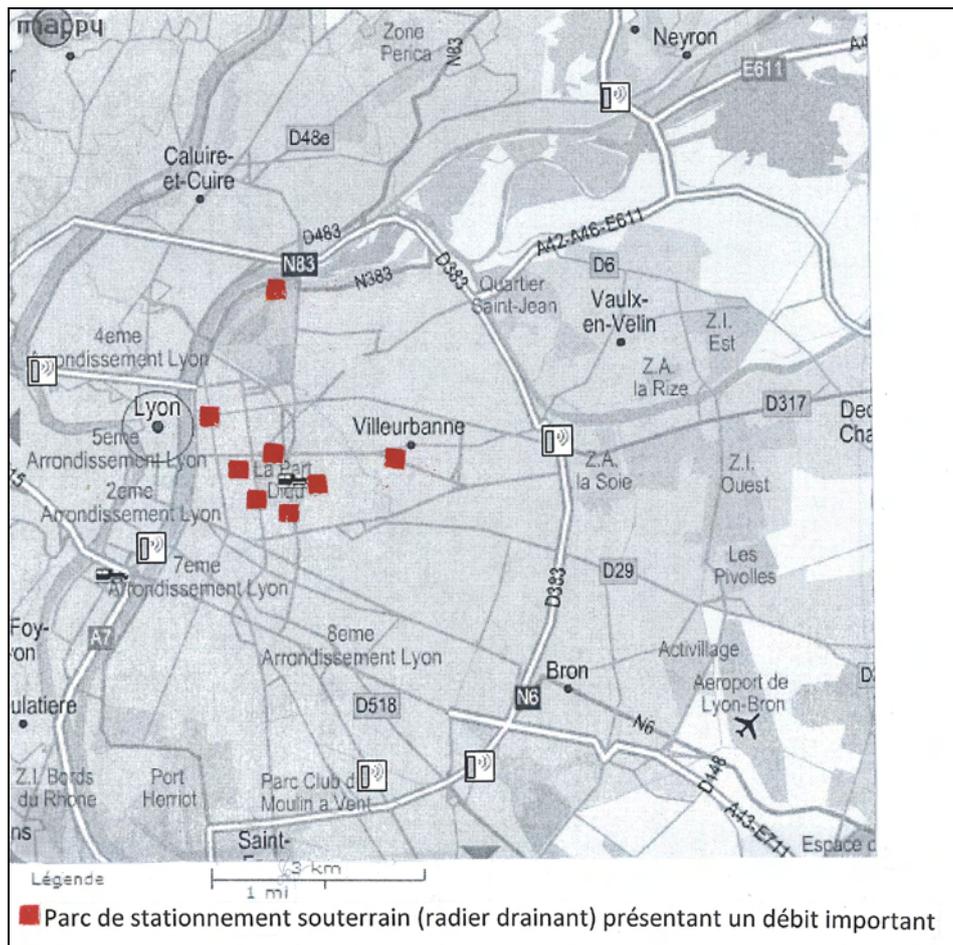


Figure 4 - Les principaux parcs de stationnement de type radier drainant

Le débit global est de l'ordre de 2 500 à 3 000 m³/h soit, à titre indicatif, la mise à disposition pour une population de 1 million d'habitants de 6 litres d'une eau de consommation par jour et par personne (hypothèse retenue : rendement faible de l'ordre de 10 % entre la quantité d'eau produite et celle réellement fournie à la population).

Cela signifie également que, si le rendement entre la production et la desserte est meilleur, le bassin de population intéressé par un tel projet pourrait être de plusieurs millions de personnes.

IV. ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

Un des points « durs » du projet correspond à la réglementation et plus largement au caractère atypique du projet. Ce projet constitue très certainement pour les services instructeurs de l'État un « cas d'école ». De manière résumée, la question peut être posée ainsi : « **Comment faire autoriser un captage d'eau, situé au cœur d'une agglomération, destiné à subvenir, en situation de crise, aux besoins en eau de consommation d'une métropole ?** »

Il est à noter qu'une exploitation dans un cadre similaire, mais à partir d'un forage profond, est en fonctionnement sur Paris.

En démarche normale, il y aura enquête publique, passage au Conseil départemental de l'Environnement et des Risques sanitaires et technologiques (Coderst) puis arrêté préfectoral. Dans la mesure où le projet « eau potable » concerne l'alimentation de plus de 50 000 habitants, la demande d'autorisation est soumise en sus au Conseil Supérieur d'Hygiène Publique.

Le travail à mener auprès des services instructeurs de l'État, en particulier la DDASS, ne peut être envisagé que fort d'une volonté politique affirmée des acteurs principaux concernés par la gestion de l'eau en situation de crise. Une fois ce préalable acté, il est nécessaire d'engager un certain nombre d'investigations complémentaires dans la perspective de confirmer encore un peu plus, au-delà des données actuellement disponibles, que cette ressource, malgré le contexte urbain, est effectivement une ressource protégée.

V. LES ATOUTS DU PROJET

Les atouts d'un tel projet sont nombreux, retenons les points suivants :

- Les caractéristiques de ces ouvrages, véritables captages surdimensionnés, et le contexte géologique, sont parfaitement connus ;
- Ces ouvrages-captages sont naturellement protégés compte tenu du drainage des pollutions superficielles via l'aquifère alluvial sus-jacent, du fort contraste de perméabilité entre l'aquifère supérieur drainant et l'aquifère inférieur capté et du fait que la partie supérieure de l'aquifère molassique n'est pas captée ;
- Cette eau souterraine est de grande qualité et présente une composition chimique et un débit stables ;
- Le potentiel disponible est important puisqu'il peut correspondre à l'alimentation en eau de consommation d'une population de l'ordre de 1 million d'habitants sur une durée illimitée ;
- La mise à disposition de cette eau de consommation se fait au cœur de la ville, à la croisée des voies de circulation, du métro et du tramway, sans transit par un réseau ni par des stockages ;
- Les sites sont déjà adaptés pour faire face aux attaques terroristes compte tenu de leur conception (une entrée, une sortie, vidéosurveillance), du personnel habitué aux contraintes de sécurité, des dispositions permettant une exhaure sécurisée de l'eau (groupes électrogènes existant, alarme...) ;
- Les sites sont naturellement adaptés (ouvrages en génie civil enterrés de gros gabarit) pour faire face, en cas de guerre, à des bombardements ;
- Les sites sont, dans leur conception, optimisés pour être desservis par voie routière, et le parking est assuré. ■

Application de la réglementation des eaux souterraines dans le contexte de l'agglomération lyonnaise

**Pour la Mission Interservices du Rhône
Juliana CARBONEL ⁽¹⁾, Fabienne GOETZ ⁽²⁾, Daniel DANCETTE ⁽²⁾**

⁽¹⁾ Service Navigation Rhône-Saône - Service Eau Risque et Environnement
Cellule Hydraulique et Police de l'Eau – 2, rue de la Quarantaine - 69321 Lyon Cedex 5
juliana.carbonel@equipement.gouv.fr

⁽²⁾ Direction départementale de l'agriculture et de la forêt du Rhône
Service ingénierie et territoires – 245, rue Garibaldi - 69422 Lyon Cedex 03
fabienne.goetz@agriculture.gouv.fr - daniel.dancette@agriculture.gouv.fr

Le rappel des textes relatifs aux prélèvements d'eaux souterraines et à leur rejet conduit au constat que si l'on dispose des outils pour maîtriser les installations, ouvrages, travaux, activités (IOTAs) relevant de la police des eaux ou des installations classées, les gestionnaires se trouvent démunis pour faire face à l'explosion des prélèvements domestiques ou assimilés.

Dans un contexte de SAGE en fin d'élaboration sur l'Est lyonnais, la commission locale de l'eau et la ville de Lyon, relayées par les services de police de l'eau et l'ensemble des partenaires, doivent faire face à des enjeux de gestion quantitative et qualitative de la ressource ; la multiplication des pompes à chaleur provoque un réchauffement de la nappe dont on apprécie difficilement les conséquences ; celle des ouvrages domestiques ou assimilés non encadrés représente probablement un volume de prélèvement comparable aux activités réglementées (usages agricoles, industriels et sanitaires). Les infrastructures linéaires, les ouvrages d'infiltration des zones industrielles et commerciales, quand ce ne sont pas les exhaures d'immeubles et de parkings, contribuent à la sollicitation de la nappe et à la perturbation des conditions d'écoulement.

À l'heure où le SAGE de l'Est lyonnais affiche ses orientations de gestions et veut réserver la nappe de la molasse à des usages d'eau potable publics comme ressource de secours en cas de pollution du Rhône, où la ville de Lyon est confrontée au réchauffement de sa nappe, des décisions doivent être prises judicieusement : comment mieux connaître le fonctionnement de cette nappe, s'appuyer sur la réglementation, mieux communiquer, encadrer les ouvrages domestiques, transférer les prélèvements agricoles sur d'autres ressources et sécuriser cet usage, récupérer et valoriser les eaux d'exhaure de la nappe dans la ville de Lyon, dans l'Ozon (exutoire sud) et maîtriser leur qualité côté Miribel-Jonage (exutoire nord), gérer les périodes de crise et mettre en place un plan de gestion dynamique de cette nappe ?

Réussir la gestion de la nappe nécessite un partage des objectifs, une excellente coordination des acteurs et ne tolérera aucune défaillance dans ce complexe jeu de rôles.

I. INTRODUCTION

La nécessité d'une gestion efficace des eaux souterraine a été mise en évidence, dans le département du Rhône à l'occasion de l'élaboration du SAGE de l'Est lyonnais.

I.1 Rappel des textes

Le point fort de la réglementation des eaux souterraines repose sur les articles L214 et suivants du code de l'Environnement et sur la nomenclature de l'article R214-1 ; ces dispositions soumettent à autorisation ou à déclaration la création de forages et les usages des eaux à des fins non domestiques ; sont exclus les usages domestiques et les ouvrages afférents. Les installations, ouvrages, travaux, activités sont alors encadrés par des prescriptions définies à l'article R211-3 (arrêté interministériel du 11 septembre 2003) ou des arrêtés d'autorisation. Les installations classées sont tenues de respecter les objectifs de gestion équilibrée des eaux définis aux articles L211-1 en application de l'article L214-7.

Les ouvrages (puits et forages) permettant d'effectuer un prélèvement de plus de 1 000 m³/an sont ainsi soumis à déclaration, les prélèvements de 10 000 m³/an à 200 000 m³/an sont soumis à déclaration et ceux de plus de 200 000 m³/an sont soumis à autorisation.

« Constituent un usage domestique de l'eau, au sens de l'article L. 214-2, les prélèvements et les rejets destinés exclusivement à la satisfaction des besoins des personnes physiques, dans les limites des quantités d'eau nécessaires à l'alimentation humaine, aux soins d'hygiène, au lavage et aux productions végétales ou animales réservées à la consommation familiale. En tout état de cause, est assimilé à un usage domestique de l'eau tout prélèvement inférieur ou égal à 1 000 m³ d'eau par an, qu'il soit effectué au moyen d'une seule installation ou de plusieurs, ainsi que tout rejet d'eaux usées domestiques dont la charge brute de pollution organique est inférieure ou égale à 1,2 kg de DBO₅. »

L'article L2224-9 précise que tout prélèvement, puits ou forage réalisé à des fins d'usage domestique de l'eau fait l'objet d'une déclaration auprès du maire de la commune concernée. Les prélèvements destinés à la consommation humaine ou à une entreprise agroalimentaire, sont soumis à autorisation au titre du Code de la Santé Publique (articles R1321-6 à R1321-10 et R1321-14). Si l'usage est unifamilial, il est alors soumis à déclaration.

Le code minier impose l'obligation de déclaration préalable d'un forage à toute personne exécutant un sondage, un ouvrage souterrain ou un forage dont la profondeur dépasse 10 mètres ; la déclaration loi sur l'eau vaut déclaration à ce titre. Les informations sont archivées et conservées dans la banque du sous-sol (BSS). La responsabilité de la déclaration relève du propriétaire de l'ouvrage et du foreur intervenant pour son compte. Il s'agit d'une responsabilité conjointe.

Les Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux, (SDAGE) et le schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) permettent d'énoncer des principes de gestion des eaux souterraines et de les rendre opposables aux tiers et aux administrations. (L212-3 à L212-11).

Les articles L211-3 et R211-66 confèrent au préfet le pouvoir de prendre des mesures pour faire face aux situations de sécheresse ou de pénurie. Ces mesures, proportionnées au but recherché, ne peuvent être prescrites que pour une période limitée.

L'article L214-8 impose un dispositif de mesure ou d'évaluation des débits aux prélèvements soumis à autorisation ou à déclaration non domestiques en eau superficielle ainsi qu'aux déversements, cette disposition s'applique à toute installation de pompage des eaux souterraines, même domestique. Le propriétaire ou l'exploitant est tenu d'en assurer la pose et le fonctionnement de conserver trois ans les données correspondantes et de tenir celles-ci à la disposition de l'autorité administrative. Lorsque le prélèvement d'eau est réalisé par pompage, la mesure est effectuée au moyen d'un compteur d'eau. Les installations existantes doivent avoir été mises en conformité.

I.2 Application des textes

On constate à la lecture des textes, que la gestion des eaux souterraines est éclatée pour ses aspects régaliens, entre plusieurs administrations et qu'elle repose sur une excellente coordination des acteurs à défaut d'être confiée, à une seule d'entre elle. On pourrait dire d'une autre manière qu'elle repose, en l'état actuel de la réglementation, sur l'implication et la performance de la MISE et sur la bonne volonté ou la conviction environnementale des autres partenaires ; cette situation rend nécessaire un important effort de communication.

II. LES ENJEUX SUR LES NAPPES DE L'EST LYONNAIS ET DE LYON

Nous avons pris l'habitude de distinguer la nappe de l'Est lyonnais de celle de Lyon par facilité de langage ; il s'agit en réalité d'un même système hydrogéologique constitué de deux nappes superposées, celle du fluvio-glaciaire en partie supérieure, s'écoulant dans des couloirs séparés par des massifs morainiques et celle de la molasse en situation inférieure, beaucoup plus étendue ; les interactions entre couches sont mal connues. Les services et la CLE travaillent à l'élaboration du cahier des charges d'une étude spécifique d'acquisition de connaissances sur la molasse et de déploiement du dispositif opérationnel de gestion.

II.1 Enjeu de quantité

Les trois couloirs sont fortement exploités et sur au moins l'un d'entre eux, celui dit « d'Heyrieux », on frise le conflit d'usage ; en dépit de l'été 2007 particulièrement propice à une faible sollicitation des nappes pour les usages agricoles, le niveau piézométrique moyen ne s'est pas rétabli fin août ; des discussions soutenues se tiennent entre les usagers dans le cadre du comité sécheresse pour déterminer les critères de définition d'une crise quantitative et pour ensuite permettre au préfet d'arrêter les mesures de restriction des usages ou d'interdiction selon la gravité de la situation constatée. L'établissement d'un schéma de gestion et d'exploitation dynamique s'avère indispensable pour piloter une gestion partagée de la ressource.

II.2 Enjeux de qualité et de température

La préservation de la qualité des eaux souterraines dans l'agglomération représente à la fois un enjeu stratégique pour l'approvisionnement de secours en eau potable, un objectif incontournable de la directive-cadre sur l'eau, notamment celui de la non-dégradation des milieux et de l'atteinte du bon état chimique et quantitatif en 2015 ou 2021 selon les couloirs et un enjeu de développement durable ; il s'agit de préserver des usages domestiques, industriels, énergétiques, agricoles et d'alimentation en eau potable dans une bonne harmonie. Certes l'idée est admise que l'usage alimentaire prime sur les autres en cas de crise mais cet usage ne doit pas être exclusif des autres ; il est même probable que la préservation de cet usage passe par une juste répartition des quantités mobilisables avec des niveaux de qualité

admissibles pour chacun d'eux, l'usage alimentaire étant de toute façon le plus contraignant. S'ajoute à cette exigence de préservation des usages, la considération que la nappe de la molasse est d'une qualité telle qu'elle mérite d'être préservée et réservée à l'alimentation humaine. On en vient ainsi à l'idée qu'une répartition des usages des nappes de l'agglomération doit être faite en fonction de la qualité et de la configuration des aquifères, de leur niveau de protection, de leur situation. Ainsi la nappe de Lyon aurait une vocation énergétique, celle de la molasse, alimentaire, celle du fluvioglaciale, industrielle et domestique.

III. LE SAGE DE L'EST LYONNAIS

Le SAGE de l'Est lyonnais est conduit sous la maîtrise d'ouvrage du Conseil général du Rhône et piloté par la commission locale de l'eau (CLE). Le projet de SAGE comportant le plan d'aménagement et de gestion durable (PAGD), des fiches action, un règlement et des documents cartographiques ainsi qu'une plaquette de synthèse a été arrêté par la CLE du 10 juillet 2007. Le préfet doit approuver ce schéma à l'issue de la phase de consultation des collectivités territoriales en cours, puis d'enquête publique prévue ultérieurement. Une fois le SAGE approuvé :

- son règlement et ses documents cartographiques seront opposables aux tiers publics ou privés dans l'exécution de IOTA ;
- les décisions administratives devront être compatibles avec le PAGD.

Cette étape permettra de consolider juridiquement les décisions d'autorisation ou de rejet ainsi que les prescriptions relatives aux ouvrages à venir ou déjà existant moyennant quelques précautions sur la viabilité de l'usage ou procédures d'actualisation si les enjeux d'une gestion équilibrée de l'eau sont en cause.

IV. POINT FOCAL SUR QUELQUES SUJETS D'ACTUALITÉ

IV.1 Les pompes à chaleur et installations de climatisation

Le sous-sol de l'agglomération lyonnaise renferme une nappe libre peu profonde très favorable à l'exploitation thermique des eaux souterraines. C'est pourquoi un grand nombre de pompes à chaleur (PAC) se sont implantées ces quinze dernières années (en moyenne 8 nouvelles installations par an).

Les installations sont constituées le plus souvent d'un doublet de forage, l'un pour capter l'eau et l'autre pour la réinjecter. Elles permettent d'extraire des frigories pour la climatisation et/ou des calories pour le chauffage et rejettent réciproquement une eau plus chaude ou plus froide dans la nappe. En fait, les PAC fonctionnent majoritairement en mode climatisation. Ce sont donc surtout des rejets chauds qui influencent les températures de la nappe.

L'augmentation du nombre de ces installations et leur concentration dans certains secteurs de la ville de Lyon (Brotteaux, Part-Dieu, Tonkin, campus de la Doua, Presqu'île, Gerland) ont amené le Service Navigation à imposer, aux nouvelles installations, des prescriptions spécifiques afin de limiter l'augmentation de la température de la nappe et les conséquences (sanitaire, conflit d'usage...) qui pourraient en résulter. Les prescriptions limitent la température de rejet à 27 °C, la différence de température entre l'eau captée et l'eau rejetée inférieure à 10 °C et imposent un suivi des paramètres suivants : débit, température, niveau de la nappe et conductivité.

Le besoin se fait sentir d'une étude solide relative aux conséquences de ces réchauffements cumulés, à leur effet à long terme afin d'affiner les règles de gestion sur le secteur et de ne pas compromettre par une prolifération anarchique et incontrôlée cette source appréciable d'énergie renouvelable. La ville de Lyon a d'ores et déjà jeté les bases d'une telle étude qui prolonge une première approche effectuée par le SNRS entre 1998 et 2000 avec le bureau d'études Horizon Centre Est.

IV.2 Les ouvrages domestiques

On l'a vu, le point d'entrée dans la réglementation relative aux prélèvements en eau souterraine est le caractère domestique de l'usage ; depuis le 30 décembre 2006, tout prélèvement, puits ou forage réalisé à des fins d'usage domestique fait l'objet d'une déclaration auprès du maire de la commune concernée. Cet article L224-9 doit faire l'objet d'un décret en Conseil d'État en cours d'élaboration.

Sur l'Est lyonnais, on estime les ouvrages domestiques au nombre de 10 000¹ ; même si chaque ouvrage ne mobilisait que le dixième du seuil de déclaration le prélèvement opéré serait de l'ordre du million de m³, chiffre du même ordre de grandeur que les prélèvements industriels, agricoles ou de consommation humaine. Or, jusqu'à la parution du décret dont on attend beaucoup, c'est tout un pan de l'usage des eaux souterraines de ces nappes de l'agglomération lyonnaise qui se trouve non réglementé et donc laissée dans une situation anarchique préjudiciable à une saine gestion des eaux.

On craint autant surexploitation que la prolifération d'ouvrages mal réalisés risquant de mettre en communication les nappes et d'injecter dans la molasse un flux de pollution qui risque de compromettre l'usage sanitaire de la nappe ; on mesure alors l'ampleur du désarroi des gestionnaires devant leur actuelle impuissance et l'espoir qu'ils fondent sur la parution de ce décret.



Figure 1 - Exemple de multiplication de piscines, généralement alimentées par forage, dans l'Est lyonnais (région de Genas)

¹ Recensement des forages domestiques, Stéphanie Coucke, stage à la DDAF 2007.

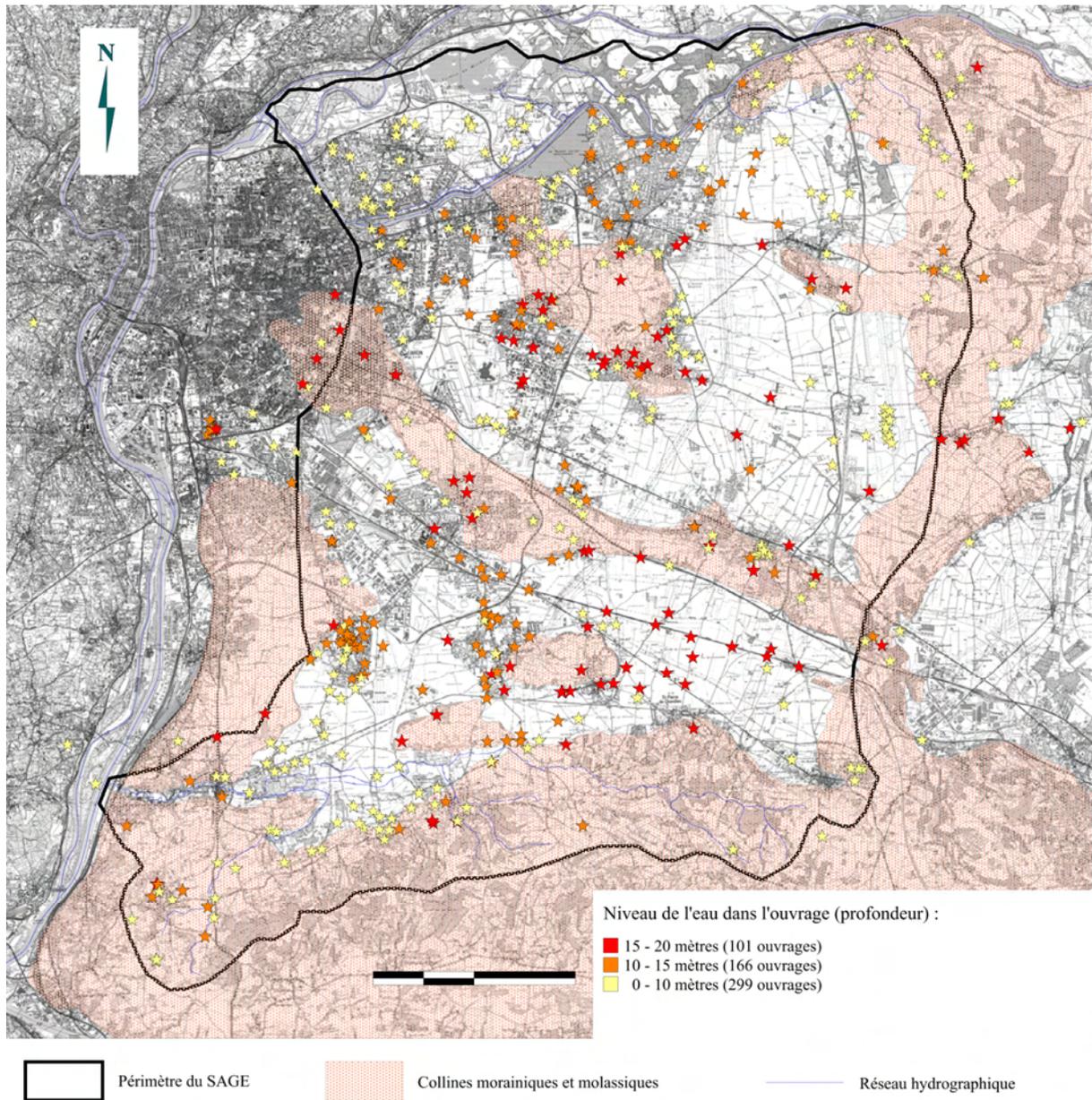


Figure 2 - Prélèvements domestiques d'eaux souterraines dans l'Est lyonnais
Carte élaborée par la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt du Rhône

Validation : 15 06 07 - Sources : © IGN BD Carthage - © IGN Scan 25

Périmètre SAGE arrêté interpréfectoral du 20 10 1997

IV.3 Les ouvrages d'infiltration, d'injection dans la nappe et territoires artificialisés

L'agglomération est sillonnée d'infrastructures linéaires et semée d'ouvrages d'infiltration réalisés à des dates plus ou moins récentes à l'occasion des remembrements, des opérations immobilières de créations de ZAC ; les établissements industriels proposent fréquemment de tels ouvrages pour le traitement de leurs eaux pluviales. Les plus importants relèvent de la législation sur les installations classées (ICPE) ; ceux réalisés après la parution de la loi sur l'eau ont fait l'objet de prescriptions mais les plus petits ou ceux ne relevant pas de la législation ICPE ne sont pas encadrés. Ces eaux d'infiltration constituent une part non négligeable de la réalimentation de l'aquifère mais un premier souci réside dans l'existence de nombreux ouvrages antérieurs à 1992 ; le second réside dans le contrôle de ces ouvrages soit

par l'exploitant qui souvent en néglige l'entretien soit par les services de police des eaux ou les ICPE. Le recensement effectué par le SAGE en 2005 en comptait 93 auquel s'ajoutent 44 décharges dont 15 ont fait l'objet d'une évaluation approfondie du risque².

Les territoires artificialisés occupent quant à eux 32 % de la surface du territoire. On est en droit de considérer que les conditions d'acheminement des eaux vers la nappe y ont été modifiées, pas nécessairement altérées mais c'est bien là tout l'enjeu de l'exercice de gestion : minimiser les altérations, les compenser et préserver l'équilibre du fonctionnement et la qualité des eaux.

La MISE a édité une doctrine relative aux eaux pluviales consolidée par les orientations du SAGE et prolongée par la bonne technicité du partenaire principal en ce domaine qu'est Grand Lyon.

IV.4 La gestion de crise et les arrêtés sécheresse, un arbitrage entre les usages agricoles, industriels, sanitaires et domestiques

Le préfet du Rhône a mis en place un comité sécheresse chargé de lui proposer un arrêté cadre de gestion de la sécheresse et de lui faire toute proposition sur la gestion de la crise. Ce comité s'est d'abord donné pour objectif d'avoir une vision partagée de la situation : pertinence du réseau d'observation, seuils de détermination des situations de vigilance, de restriction et de crise par comparaison de la situation du jour à des classements statistiques de la série de donnée du piézomètre observé. Cette approche, bien que préconisée par le ministère de l'Environnement dans une note d'orientation est contestée par les gestionnaires de réseaux qui assurent n'avoir jamais eu de problème de mobilisation de la ressource alors que l'application de ces seuils et critères placerait l'Est lyonnais en situation de crise avérée voire aggravée³. Une expertise du BRGM conduit à considérer la situation comme préoccupante sans pour autant nécessiter un traitement de situation de crise ; l'expert propose de réaliser sans attendre mais sans précipitation non plus, un schéma de gestion dynamique qui proposera un niveau piézométrique objectif et servira de référence pour l'appréciation des excédents ou déficits de la nappe. On suppose que la baisse actuelle des nappes⁴ porte préjudice essentiellement aux particuliers qui ont probablement arrêté leur forage dès les premiers mètres d'eau atteints. Les gestionnaires professionnels ont réalisé quant à eux, des ouvrages supportant ces fluctuations.

Une seconde discussion attend le comité : celle des mesures à mettre en œuvre pendant ces situations de vigilance, d'alerte ou de crise. L'exercice n'est pas facile car la nappe évolue avec une assez grande inertie ; les mesures imaginées ont une portée de sensibilisation autant que réellement technique : restreindre les usages de confort, arrosages de pelouses, remplissages de piscine contribue à la prise de conscience du caractère limité de la ressource en eau. On apprécie mal pour l'instant la portée réelle de cette mesure sur le niveau de la nappe au regard de tous les autres usages ; la police de l'eau a en outre pour objet de veiller à l'équilibre des usages ; il ne s'agit pas de créer une situation qui exclue totalement certains usages au bénéfice d'autres une fois que l'on a énoncé le caractère prioritaire de l'usage « eau potable ».

² Le territoire de l'Est lyonnais compte 6 km² de mines décharges et chantiers soit 1.5 % de la surface de son territoire.

³ La DIREN Rhône Alpes propose de se référer au niveau moyen mensuel de la nappe relevé sur l'ouvrage de suivi : « altitude » ayant une probabilité 1/2, 1/5, 1/10 ou 1/20 de se produire chaque année.

⁴ Baisse de l'ordre de 2.5 à 5 m selon les couloirs de l'Est lyonnais en début de saison 2007.

IV.5 La mobilisation des foreurs et prescripteurs

Les membres de la commission locale de l'eau, en particulier les services de police des eaux ont pleinement conscience qu'une gestion satisfaisante de la nappe de l'Est lyonnais et de celle de Lyon passe par une sensibilisation et la mobilisation des professionnels de forage. Un certain nombre d'entre eux adhèrent à la charte de Qualité des Puits et Forages d'Eau proposée par le MEDAD, les Agences de l'Eau et le Syndicat National des Entrepreneurs de Puits et de Forages d'Eau (SFE) ; par ailleurs une formation initiale des jeunes foreurs leur est proposée avec la création d'un Certificat de Qualification Professionnelle (CQP).

Il convient maintenant de mobiliser les énergies sur le respect de cette charte et de créer une dynamique sur le secteur de l'agglomération lyonnaise autant pour des raisons de qualité technique des ouvrages, de satisfaction des usagers, de respect de l'intégrité des aquifères, que de maintien des usages et donc, à relativement courte échéance, de maintien de l'activité économique et de l'avenir de la profession. S'ajoute à ces raisons le souci de ne pas générer de distorsion de concurrence entre les professionnels qui travaillent dans le respect des règles de l'art et ceux qui seraient tentés, par incompetence ou par calcul, de ne pas les respecter. On saisit l'importance du bon équilibre à trouver entre information, formation et contrôle dans ce domaine d'activité.

IV.6 Le collecteur de l'Ozon

Le syndicat d'assainissement de la vallée de l'Ozon (SIAVO) gère un collecteur d'eaux usées qui joue le rôle d'un drain de la nappe de l'Est lyonnais, tout au moins du couloir d'Heyrieux, le long de la vallée de l'Ozon. Le collecteur présente des défauts d'étanchéité. Le SIAVO a missionné un maître d'œuvre pour réhabiliter ce collecteur qui achemine une quantité importante d'eaux claires vers la station d'épuration de Saint-Fons. Cette situation est préjudiciable au bon fonctionnement de la station.

La suppression de cet effet drainant et par conséquent le maintien des eaux dans le milieu naturel auront sans doute des incidences importantes que le syndicat s'attache à préciser. Il est cependant fort probable qu'un certain nombre de caves récemment réalisées se trouvent inondées ou plus fréquemment inondées. Outre les aspects techniques de ce projet, une épineuse question de responsabilité se trouve ainsi soulevée. Un arbitrage entre différents enjeux est à faire : respect de la directive eaux résiduaires urbaines et conformité de la station d'épuration, non-dégradation des masses d'eau superficielles dans le cadre de la directive-cadre européenne, restauration des fonctionnalités naturelles des milieux aquatiques...

V. FAUT-IL CLASSER L'EST LYONNAIS ET LA NAPPE DE LYON EN ZONE DE RÉPARTITION DES EAUX ?

Une des questions qu'a clairement posées le SAGE et sur laquelle les services chargés de la police de l'eau et la MISE sont directement interpellés est celle de savoir s'il faut classer l'Est lyonnais en zone de répartition. Ce classement aurait pour effet, par abaissement des seuils, de soumettre à déclaration les ouvrages non soumis, et à autorisation ceux qui sont actuellement soumis à déclaration. Elle exclut cependant du champ des ouvrages réglementés les ouvrages domestiques dont on a vu qu'ils se situaient dans un vide juridique en attendant le décret de l'article L224-9.

Par ailleurs les récentes dispositions d'opposition à déclaration permettent au préfet de s'opposer à un projet soumis à déclaration selon une procédure « simplifiée » plus rapide qu'une procédure d'autorisation longue et chronophage ; la réforme d'octobre 2006 avait bien

pour objectif de réduire le nombre de dossiers soumis à autorisation pour permettre aux services de police de se concentrer sur les dossiers à enjeu et de relever les seuils de déclaration pour permettre un traitement en nombre. Le temps de police épargné visait à recentrer les services sur le contrôle.

L'avantage, en revanche, de la zone de répartition serait d'étayer l'argumentation relative aux enjeux au nom desquels on réglerait les ouvrages et prélèvements voire au nom desquels on en refuserait certains. L'approbation du SAGE confortera cette sécurité juridique qui fait actuellement défaut en énonçant des principes de gestion qui s'imposent autant aux ouvrages soumis à déclaration qu'à ceux soumis à autorisation.

La zone de répartition permettrait de désigner d'office un gestionnaire mandataire pour les usages agricoles mais en l'état actuel de la réglementation, ne répond pas aux soucis d'encadrer correctement les ouvrages domestiques. Une telle désignation semble possible hors zone de répartition avec un organisme consentant. (L211-3 6°)

VI. PAS DE MAILLON FAIBLE POUR UNE GESTION EFFICACE DES EAUX SOUTERRAINES

On aura compris que la réussite de la gestion des eaux souterraines de l'agglomération lyonnaise dépend de la capacité des acteurs à travailler dans la plus grande cohérence. La réglementation permet d'identifier les dossiers à enjeu mais elle ne dispense pas les partenaires de définir des principes de gestion ni de les consolider dans le SAGE ; les maires partageront désormais une part non négligeable de la responsabilité de gestion de la nappe avec celle des ouvrages domestiques ; l'inspection des ICPE est impliquée pour les ouvrages d'établissements industriels, de production animale ou végétale. La DDASS est concernée pour les usages sanitaires, les captages d'eau potable et leur protection ; la DDE l'est dans le choix des tracés, la conception et la surveillance des ouvrages linéaires. Les financeurs ont à prendre la mesure des enjeux pour accompagner les programmes et les projets concourant à la bonne gestion de la nappe. Le tout doit avoir été mis en place aux échéances fixées par la directive-cadre sur l'eau. Les nappes de l'agglomération ont été identifiées comme susceptibles d'atteindre le bon état en 2015 pour la nappe du miocène et le couloir d'Heyrieux et 2021 pour les couloirs de Meyzieu et Décines. Que cette échéance soit celle de 2015 ou 2021, il faudra se justifier, en son temps, des efforts entrepris et surtout des résultats obtenus.

VII. CONCLUSION

On vient de le voir, la gestion des nappes de l'agglomération lyonnaise – mais sans doute de toute agglomération - est un vaste et complexe chantier. Il mobilise tous les types d'acteurs : les pétitionnaires usagers, les collectivités dans leur fonction de relais d'animation et de prise en charge de la réglementation des usages domestiques, les bureaux d'étude et les professionnels du forage et des prélèvements pour leur compétence technique et leur éthique professionnelle, les administrations dans leurs fonctions régaliennes, le SAGE et la CLE dans leur fonction de producteur de principes de gestion et d'avis sur les dossiers importants, les financeurs dans leur fonction d'accompagnement des projets et de mise en œuvre de la conditionnalité de leurs aides.

Ce « grand chantier environnemental » a lui aussi ses échéances 2015 et 2021. Il mérite probablement un chef de projet à la hauteur de l'enjeu, une lettre de mission, pourquoi pas un « Monsieur nappe » ? ■

Dissolution du gypse à Paris : efficacité et carences de la réglementation

Anne-Marie Prunier Leparmentier, Olivier David, Madeleine Schönberg

Inspection générale des carrières (IGC) - 3, avenue du colonel Henri Rol-Tanguy
75014 Paris - anne-marie.leparmentier@paris.fr

Dès la fin des années 1960, les risques de dissolution des gypses antéludiens étaient connus. À Paris, une zone de risque a été définie à partir de données statistiques de sondages. En 1977, un arrêté préfectoral lui a donné un caractère réglementaire et a soumis à l'avis de l'Inspection générale des carrières tous les permis de construire situés dans la zone. Depuis, sondages et incidents sont venus confirmer le risque mais surtout ont conduit à agrandir cette zone. De plus, un suivi précis et détaillé des nappes depuis plus de 20 ans a permis de mieux appréhender le phénomène, les facteurs aggravants et de circonscrire avec une grande précision les zones de risque.

Toutefois, si la nécessité de réglementer la construction en zone de risque lié à la dissolution du gypse a bien été prise en compte, il n'en est pas de même pour l'infiltration des eaux et la régulation des nappes en site urbain. Or leur impact est primordial sur la stabilité du sous-sol.

I. INTRODUCTION

Depuis les années 1960, le phénomène de dissolution du gypse antéludien a été étudié à Paris et en Seine Saint-Denis (93). Sous l'effet de circulations d'eau ou de variations du niveau des nappes, le gypse peut se dissoudre et des vides souterrains parfois considérables peuvent se former. Ce phénomène est à l'origine de nombreux effondrements ou affaissements en région parisienne. Pour assurer la sécurité des biens et des personnes, l'État et les collectivités locales ont chargé l'Inspection Générale des Carrières (IGC) d'étudier et de gérer ce risque nouveau. En effet, l'IGC, service de la Ville de Paris, était déjà en charge de la gestion des risques liés aux anciennes carrières à Paris et dans les trois départements de la petite couronne. La construction dans les zones potentiellement à risques a été réglementée. Des arrêtés préfectoraux qui soumettent les autorisations de construire à l'avis de l'Inspection Générale des Carrières dans ces zones ont été pris dès 1977.

Dans ces réglementations liées à la dissolution du gypse, les nappes d'eaux souterraines, les circulations d'eaux ou l'infiltration des eaux n'ont jamais été prises en compte. Pourtant, seule une réglementation intégrant toutes les causes de la dissolution du gypse serait pleinement efficace.

II. DU PHÉNOMÈNE DE DISSOLUTION DU GYPSE À SA PRISE EN COMPTE RÉGLEMENTAIRE

Dès le début des années 1960, en région parisienne, des incidents, parfois très importants, se sont produits en dehors des zones d'anciennes carrières souterraines et ont conduit les géologues et les géotechniciens à s'interroger sur l'apparition de fontis [1]. Ces incidents ont

mis en évidence un nouveau risque lié au sous-sol : la dissolution du gypse antéludien. Des bancs de gypse répartis aléatoirement dans l'horizon des marnes et caillasses se dissolvent. Ces vides souterrains ainsi formés peuvent ensuite remonter à la surface et provoquer des affaissements ou des effondrements localisés.

Au début des années 1970, des études, menées à partir du nombre réduit de sondages disponibles à l'époque, ont été réalisées et ont permis de définir un premier périmètre de risques. L'arrêté préfectoral du 25 février 1977 soumet à l'avis de l'Inspection générale des carrières (IGC) tous les permis de construire dans cette zone de risque. L'IGC peut prescrire ou recommander la réalisation de sondages et le traitement des vides détectés pour que ce risque soit pris en compte lors des constructions.

Depuis la fin des années 1980, grâce aux nombreuses études et sondages réalisés par l'IGC, le phénomène de dissolution des gypses antéludiens est mieux connu. En 1999, ces études et l'apparition d'un certain nombre d'incidents en dehors de la zone définie en 1977 (notamment le fontis de la rue Papillon) ont conduit l'IGC à étendre cette zone de risque. Depuis 1999, même si cette zone étendue n'a pas de valeur réglementaire puisque non approuvée par un arrêté préfectoral, l'Inspection générale des carrières informe systématiquement les riverains et les professionnels de l'existence du risque lié aux possibles dissolutions des niveaux gypseux antéludiens. Lors de l'instruction des permis de construire, l'IGC est systématiquement consultée et le Maire de Paris impose alors, le cas échéant, des mesures au pétitionnaire en application de l'article R111-2 du Code de l'Urbanisme. La jurisprudence récente du Conseil d'État a validé cette pratique. Lors de la révision du Plan Local d'Urbanisme (PLU) de Paris, cette zone a été signalée. Les études de sol réalisées depuis 1999 ont confirmé le bien fondé de l'élargissement de la zone de risques.

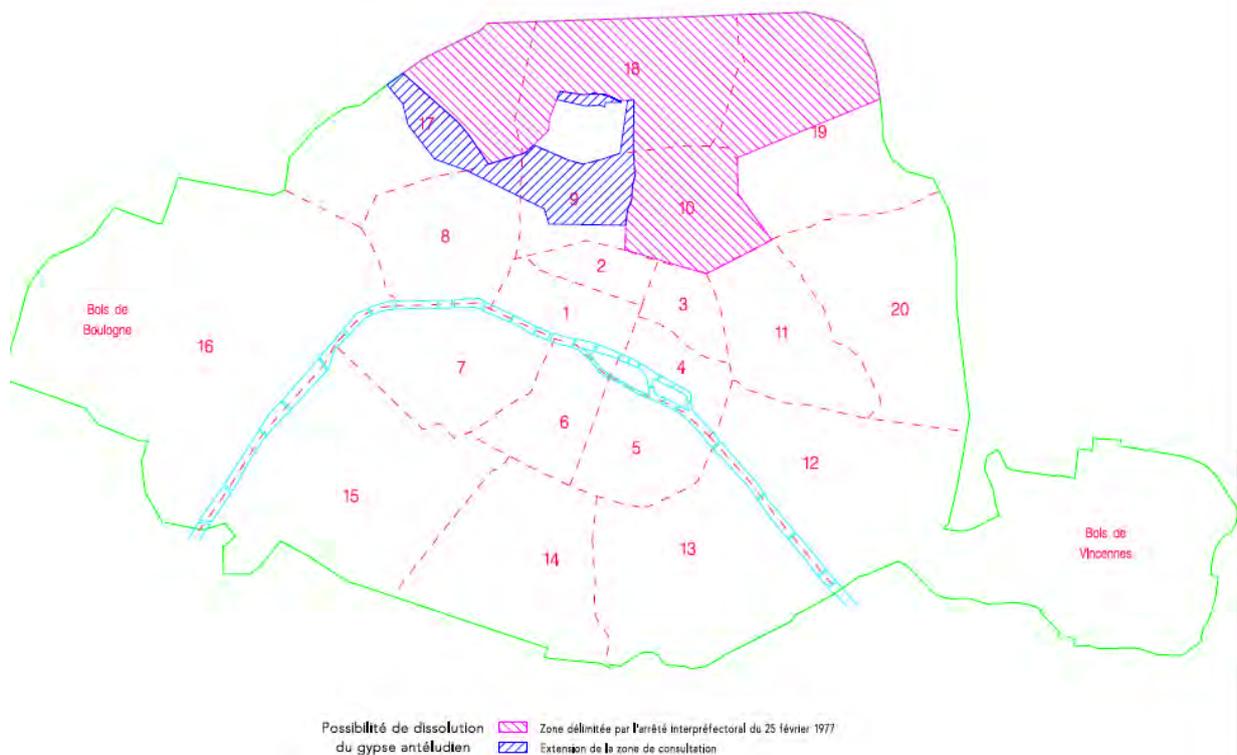


Figure 1 - Périmètre de l'arrêté du 25 février 1977, modifié en 1999 (doc. IGC)

Toutefois, ces deux périmètres ont été définis uniquement à partir de données géologiques (cartes géologiques au 1/5 000 éditées par l'IGC, forages de reconnaissances, diagraphies gamma-ray...). Pourtant, la variation du niveau des nappes est un élément essentiel dans la dissolution du gypse.

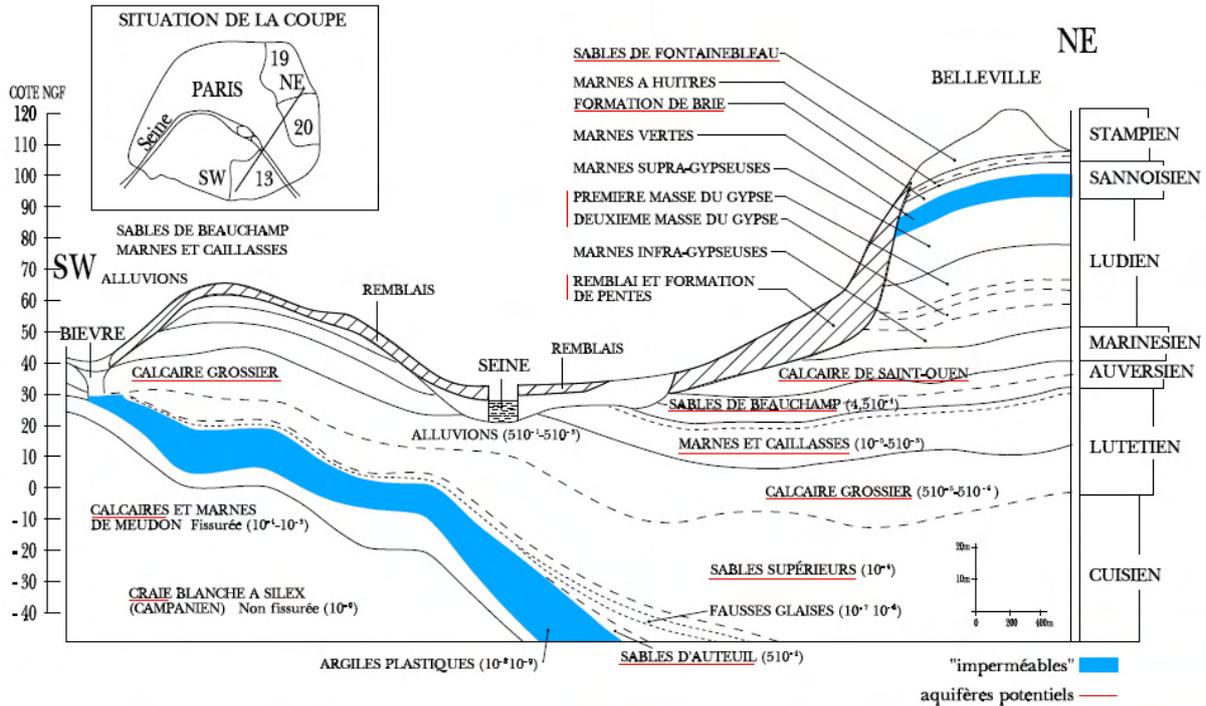


Figure 2 - Coupe géologique schématique de Paris avec un ordre de grandeur des coefficients de perméabilité des différents horizons [2]

III. LE RÔLE DES NAPPES SOUTERRAINES A PARIS

III.1 Brève histoire parisienne

Dans l'Antiquité, la nappe alluviale était sub-affleurante, notamment dans le quartier du « Marais » (IV^e arrondissement de Paris). L'eau de nappe parisienne étant trop séléniteuse et donc impropre à la consommation, les romains construisirent un aqueduc pour amener des eaux de source du Sud. Au cours du Moyen Âge, la ville s'est agrandie sur la rive droite de la Seine et les zones basses marécageuses ont été peu à peu remblayées. Toutefois, l'eau du fleuve et des puits rendait la population malade (choléra, dysenterie...). Au XVII^e siècle, Henri IV tenta d'assainir la ville et fit construire les premiers égouts à ciel ouvert. L'aqueduc romain fut reconstruit d'Arcueil jusqu'au Palais du Luxembourg, et des pierrés sur la Butte de Belleville furent aménagés pour capter la nappe des Travertins de Brie, non séléniteuse, pour les prieurés et les hôpitaux du pied de la Butte.

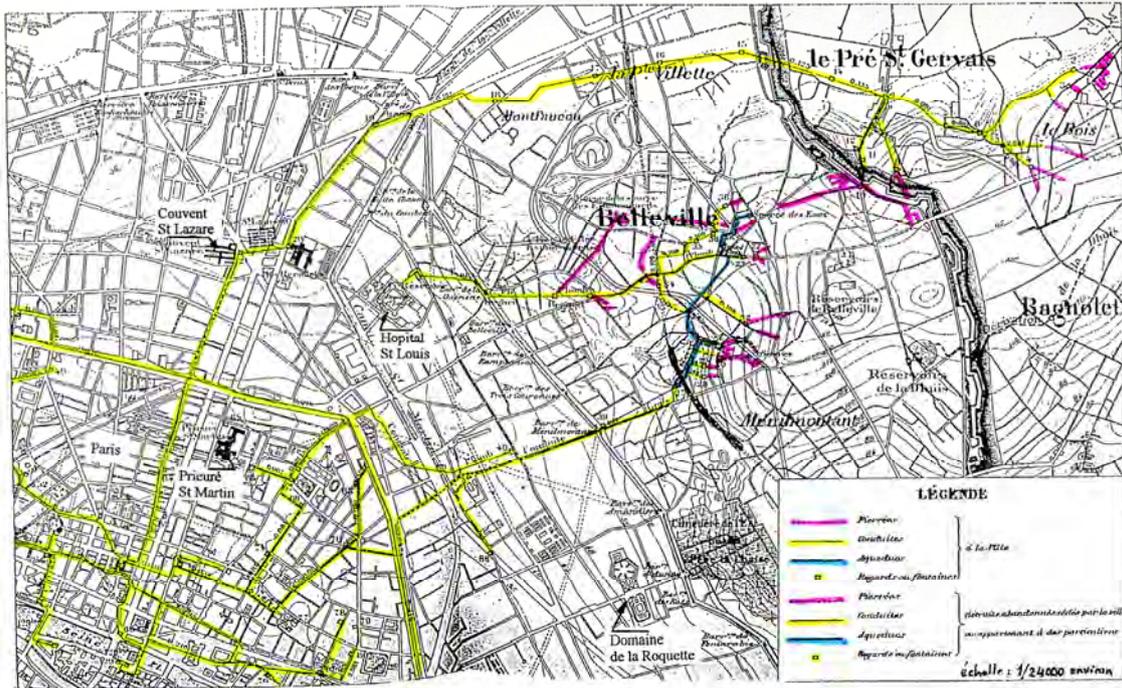


Figure 3 - Pierrés et aqueducs des sources du Nord (doc IGC)

Les carrières à ciel ouvert puis en souterrain de gypse ludien, très belle pierre à plâtre, exportée jusqu'aux Amériques, se sont développées sur les Butte Montmartre et Chaumont. Le pourtour de ces buttes, qui sont le siège de nappes perchées, fut pratiquement exploité en totalité, à l'exception de quelques rares petites vallées de rus où le gypse était déjà dissout en partie. Ces rus disparurent soit par dissolution, soit surtout par vidange partielle des nappes dans les remblais de carrière à ciel ouvert ou dans des fontis, sans savoir exactement où circulent ces eaux.

Enfin, à partir du XIX^e siècle, les pompages se sont développés en centre-ville, bien avant l'urbanisation souterraine. Si en 1858, la nappe phréatique, cartographiée par Delesse (figure 4), est le reflet de la géologie parisienne et du réseau hydrographique naturel (Seine et affluents), un siècle après, il n'en est plus de même (figure 5).

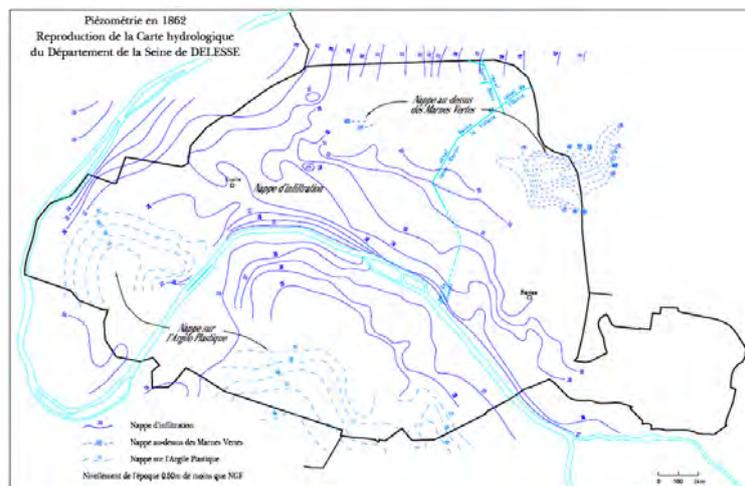


Figure 4 - Carte de Delesse en 1858 [2]

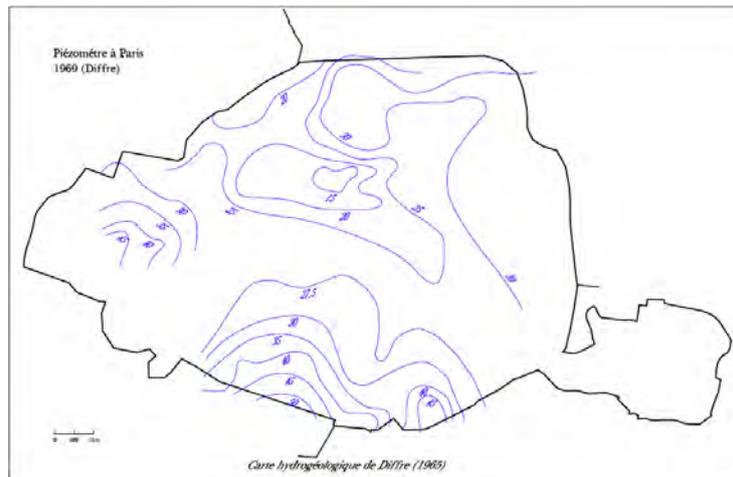


Figure 5 - Carte de Diffre en 1965 [5]

Une énorme dépression centrale s'est creusée en plein cœur de la ville dont le minimum est évalué à +11 NGF VdP vers 1971, alors que la Seine est à la cote +26.4 NGF VdP. La nappe alluviale en centre rive droite est asséchée. C'est la nappe lutétienne qui correspond à la nappe phréatique. La corrélation entre les pompages et les dépressions de la nappe phréatique est évidente (carte Colin 1982)

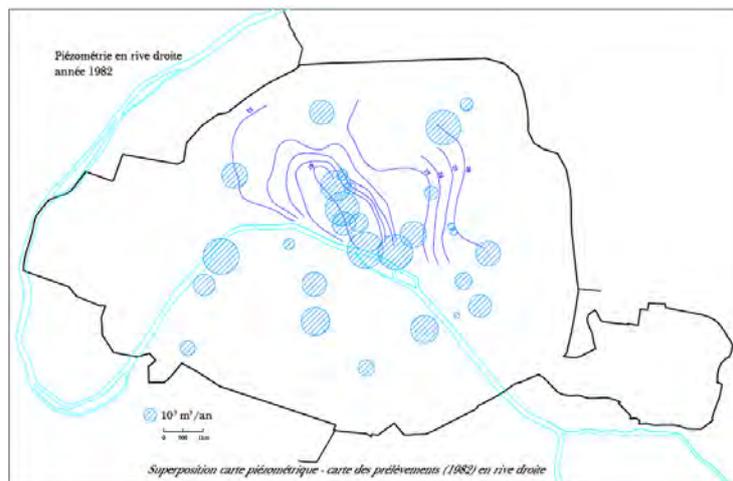


Figure 6 - Carte de Colin en 1982 [2]

Durant cette période, les grands projets de construction se multiplient, la nappe est à plus de 15 m de profondeur sur une grande partie du territoire parisien. Les parkings de plus de 5 sous-sols sont fréquents.

Parallèlement, de 1965 à 1975, une mutation s'opère dans les pompages parisiens. Suite aux taxes d'exhaure des Agences Financières de Bassins (AFBSN pour Paris), un certain nombre d'industries quitte le centre-ville. Durant cette période, de grands travaux (Trou des Halles, lignes A et B du RER et leurs stations...) masquent ces départs.

III.2 Les conséquences de ces variations des nappes

Les écoulements d'eau le long des buttes du nord de Paris et la variation du niveau des nappes sont à l'origine de graves incidents à Paris.

À la fin des années 1970, lors de l'arrêt de nombreux pompages de chantier, les premiers incidents graves apparaissent. L'exemple d'un immeuble situé dans le X^e arrondissement de Paris est représentatif des problèmes qui se posent depuis cette époque.

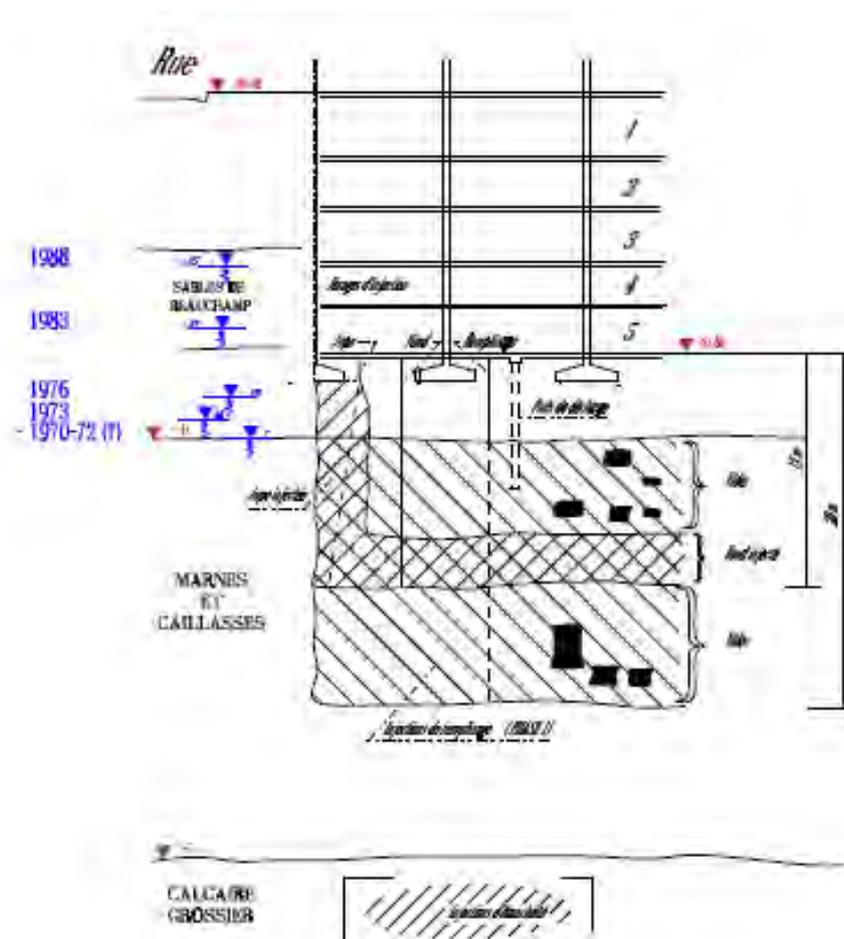


Figure 7 - Incident dans un immeuble du X^e arrondissement (doc IGC)

Ce bâtiment a été construit lorsque les nappes parisiennes étaient particulièrement basses. Lors de l'arrêt de plusieurs pompages importants à proximité, la cage d'ascenseur a été inondée. Les copropriétaires ont fait réaliser un puits pour pomper directement sous le bâtiment. Quelque temps après, des fissures sur un mur porteur sont apparues. Les circulations d'eau dues au pompage avaient dissous le gypse antéludien sous le bâtiment et les fondations avaient cédé. Il a fallu reprendre en sous-œuvre, traiter les vides de dissolution et rendre étanche les sous-sols.

Les variations du niveau des nappes ont donc non seulement ennoyé de nombreux sous-sols, mais elles sont à l'origine du développement, souvent anarchique, de nombreux pompages qui provoquent la dissolution du gypse.

Le niveau des nappes à Paris continue à évoluer fortement. Les années 1990 ont vu une autre série de gros pompages en centre ville et les niveaux des nappes ont encore chuté pour atteindre vers la gare Saint-Lazare et la place de la Madeleine des cotes voisines de 1970, voire même plus basses, la nappe lutétienne étant descendue à la cote +6 et la nappe cuisienne à la cote -5 NGF VdP, soit respectivement 20 m et 30 m plus bas que le niveau du fleuve.

III.3 Pompages et dissolution du gypse : de l'information mais pas de réglementation

Clef de voûte de la gestion du risque lié à la dissolution du gypse à Paris, l'arrêté préfectoral du 25 février 1977 soumet toutes les autorisations de construire à l'avis de l'Inspection Générale des Carrières. Mais alors que les pompages sont souvent un élément déclencheur de la dissolution du gypse, il n'existe pas de réglementation spécifique.

À Paris, les pompages d'immeuble ne sont en général soumis ni à déclaration, ni à autorisation en application des lois sur l'eau. En effet, la plupart des puits sont peu profonds, ils ne sont pas pour la consommation d'eau puisque depuis longtemps l'eau des nappes superficielles à Paris n'est plus potable, et les débits de pompages sont souvent faibles.

Lorsque des pompages sont soumis à autorisation, les impacts sur la dissolution du gypse sont rarement pris en compte par les services en charge de l'instruction.

S'il n'existe pas de prise en compte du risque de dissolution du gypse lié aux pompages dans la réglementation actuelle, l'IGC étudie le phénomène et informe les riverains et les professionnels. Depuis le début des années 1980, suite à ces nombreux incidents plus ou moins graves, l'IGC a installé un réseau de 330 piézomètres dans Paris qui mesurent le niveau des nappes superficielles. Ces données permettent de suivre l'évolution des nappes, d'anticiper d'éventuelles dissolutions et de réactualiser les cartes de risques en croisant données géologiques et hydrogéologiques. Mais elles permettent aussi de renseigner les constructeurs sur le niveau des nappes sur une grande période de temps.

IV. PERSPECTIVES POUR UN AVENIR PROCHE

De nouvelles exploitations possibles des nappes souterraines se dessinent, notamment l'infiltration des eaux pluviales ou le développement des pompages géothermiques peu profonds.

Dans un souci de développement durable, la Ville de Paris réfléchit à la possibilité d'infiltrer directement les eaux pluviales dans le sous-sol. Les infiltrations des eaux pluviales peuvent se faire de deux façons : par épandage (infiltrations sur une grande surface), ou par pointes filtrantes ou puisards (infiltrations ponctuelles).

L'infiltration des eaux pluviales peut avoir des conséquences importantes sur le sous-sol. En effet, il n'est pas possible de réinjecter les eaux de pluie au-dessus des horizons gypseux sans provoquer de dissolutions et des incidents à plus ou moins court terme.

Pourtant, l'infiltration des eaux n'est pas réglementée et le risque de dissolution du gypse est en général ignoré.

Même si chaque projet doit faire l'objet d'une étude spécifique, l'Inspection Générale des Carrières a établi une cartographie indiquant les zones dans lesquelles l'infiltration des eaux pluviales par épandage et / ou par pointe filtrante est possible. Cette carte tient compte non seulement du risque lié à la dissolution du gypse, mais aussi des risques liés aux remblais ou aux anciennes carrières souterraines de calcaire grossier.

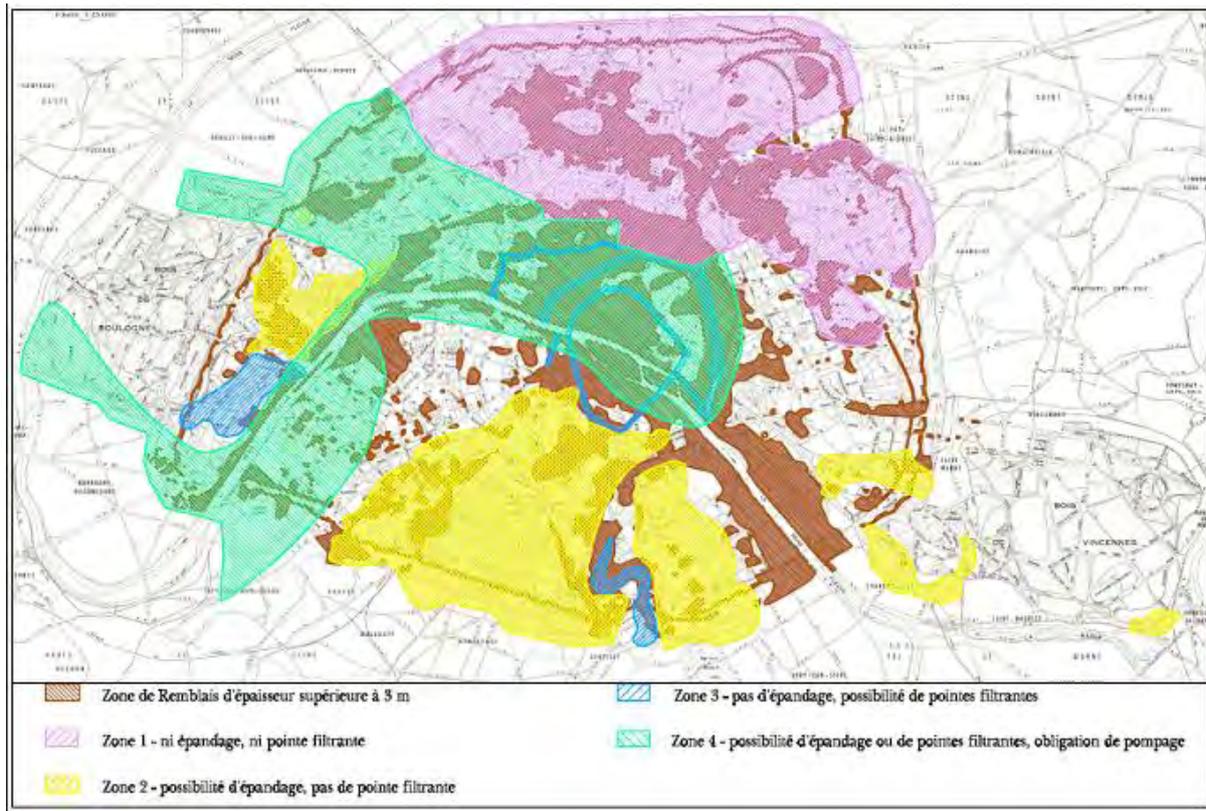


Figure 9 - Carte d'infiltrabilité brute pour Paris (doc IGC)

Le développement des pompes à chaleur et de la géothermie peu profonde peut également être une nouvelle cause de dissolutions du gypse.

Dans les systèmes à un seul forage, l'eau prélevée dans la nappe est souvent rejetée en égouts. Il est clair qu'un tel pompage va provoquer une circulation d'eau. Les poches de gypse à proximité vont alors être dissoutes et un effondrement se produira quelques années plus tard. L'impact des pompes à chaleur constituées par un doublet (prélèvement et réinjection) sur la dissolution du gypse est plus complexe à appréhender. Les connaissances actuelles sur les circulations intranappes, notamment dans le Lutétien, ne permettent pas de connaître avec précision la vulnérabilité des horizons gypseux.

Les pompages dans la nappe sous-jacente, la nappe de Cuise, peuvent également provoquer des dissolutions du gypse dans l'horizon des Marnes et Caillasses. En effet, les études hydrogéologiques menées par l'Inspection Générale des Carrières ont mis en évidence que les circulations et les pompages dans la nappe de Cuise avaient une influence sur la nappe du Lutétien. Le mur de la nappe lutétienne n'est qu'un imperméable relatif qui n'a de sens qu'à l'échelle des chantiers urbains. De plus, si le rayon d'action des pompages dans la nappe du Lutétien est relativement limité, celui de la nappe de Cuise est beaucoup plus important. Le flou actuel sur la réglementation de la géothermie peu profonde ne permet pas de gérer efficacement ce risque de dissolutions du gypse.

V. CONCLUSION

Les circulations d'eaux souterraines et la variation du niveau des nappes sont à l'origine de dissolutions du gypse et de la formation de vides souterrains. Ces vides peuvent être le résultat de l'évolution hydrogéologique de la ville au cours de l'histoire, mais aussi de phénomènes récents et localisés tels les pompages ou l'infiltration des eaux pluviales.

En région parisienne, si la nécessité de réglementer la construction en zone de risque lié à la dissolution du gypse a bien été prise en compte, il n'en est pas de même pour l'infiltration des eaux et la régulation des nappes. Or leur impact est primordial sur la stabilité du sous-sol. ■

Références bibliographiques

(1) **Arnould M., Le Guillou P., 1967** – Sur les cavités souterraines de dissolution dans les Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur dans la Région Parisienne. *CR Acad. Sc. Paris*, t 265, série D : 1864-1866.

(2) **Prunier Leparmentier AM., 1988** – Les problèmes géologiques et géotechniques de la Ville de Paris. *Thèse de l'École Nat. Des Mines de Paris*, 244.

(3) **Vernoux J.-F., Prunier Leparmentier A.-M., Thierry P., Nowak C., Vanoudheusden E., 2007** - *Impact des eaux souterraines sur les phénomènes de dissolution du gypse, application à la ville de Paris*. Colloque AIH novembre 2007 première journée, 8.

(4) **Maujean Y., 1996** – Étude d'une zone de dissolution active du gypse antéludien par des méthodes géophysiques. *Mémoire de DESS Géophysique appliquée* Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 145.

(5) **Diffre P., 1969** – *Géologie dynamique – Hydrologie de Paris et sa banlieue*. Thèse Docteur 3^e cycle, Paris, 345.

Une démarche concertée pour la gestion d'une nappe en secteur périurbain : le schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) de l'Est lyonnais

Caroline Bersot

Département du Rhône, service agriculture et environnement – Hôtel du Département
69483 Lyon Cedex 03 – caroline.bersot@rhone.fr

Le sous-sol de la plaine de l'Est lyonnais renferme une nappe d'intérêt patrimonial fortement sollicitée et vulnérable face aux pressions anthropiques. Sur ce territoire périurbain aux multiples enjeux, un schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) s'élabore : il s'agit d'un document de planification, de portée réglementaire, qui fixe des objectifs de gestion et de protection des milieux aquatiques.

Construit dans le cadre d'une procédure concertée entre élus, usagers et administrations, il expose des actions et prescriptions qui visent notamment à protéger les ressources en eau potable, à reconquérir la qualité des eaux souterraines et à gérer durablement leur quantité.

I. QU'EST-CE QU'UN SAGE ?

Pour la mise en œuvre concrète de gestion intégrée des usages de l'eau et de la protection des milieux aquatiques, des outils novateurs de réglementation et de planification avaient été créés par la loi du 3 janvier 1992 :

- le SDAGE : document qui définit les orientations fondamentales de la gestion équilibrée de la ressource en eau à l'échelle des 6 (maintenant 7) grands bassins hydrographiques français ;
- le SAGE : document qui doit concilier les différents usages de l'eau dans un cadre respectueux des milieux naturels et de l'environnement. C'est une déclinaison locale du SDAGE, prenant en compte les spécificités d'un territoire précis.

Le SAGE est donc un document de planification qui fixe des objectifs de protection, d'utilisation, de mise en valeur de la ressource en eau à l'échelle d'un territoire donné.

C'est un outil pour organiser l'avenir, mais en même temps, le SAGE doit déboucher sur des règles et des recommandations opérationnelles pour le très court et le moyen terme.

I.1 Valeur réglementaire du SAGE

Les décisions prises dans le domaine de l'eau par les services d'État ou les collectivités doivent respecter les dispositions du SAGE. Les documents d'urbanisme (SCOT, PLU...) doivent également être compatibles ou rendus compatibles avec le SAGE.

La LEMA (loi sur l'eau et les milieux aquatiques) du 30 12 2006 a renforcé la portée juridique du SAGE, puisque le SAGE doit comporter un règlement, où l'on peut inscrire sous certaines conditions des prescriptions directement opposables aux tiers.

I.2 Étapes d'élaboration d'un SAGE

Elles sont cadrées par la réglementation et un certain nombre de documents méthodologiques. Trois grandes étapes régissent la mise en place d'un SAGE (cf. figure 1) :

- une étape préliminaire qui aboutit à l'arrêté de définition du périmètre du SAGE et à l'arrêté de composition de la commission locale de l'eau (CLE), organe chargé d'élaborer le SAGE ;
- une étape d'élaboration proprement dite, qui dure en moyenne 5 ans, dont l'objectif est de rédiger et faire approuver le document SAGE ;
- une étape de mise en œuvre des actions préconisées dans le document SAGE.

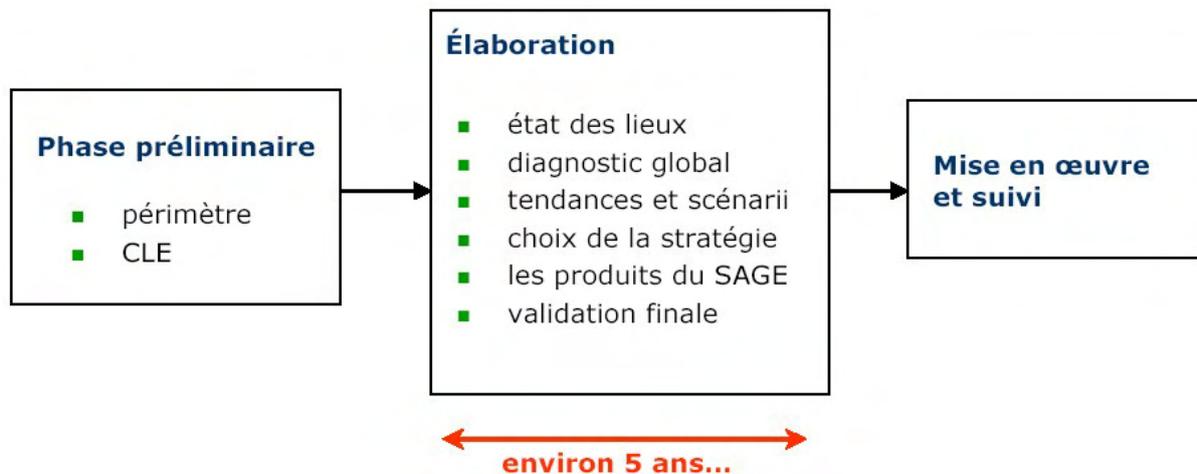


Figure 1 - Étapes d'élaboration d'un SAGE

I.3 La commission locale de l'eau (CLE)

Le SAGE est élaboré par un organe spécifique, la commission locale de l'eau ou CLE, qui suit ensuite sa mise en œuvre. La CLE est composée de 3 collèges :

- collège des collectivités territoriales et établissements publics locaux : il regroupe des élus du territoire (50 % de la CLE) ;
- collège des usagers, propriétaires riverains, organisations professionnelles et associatives (25 % de la CLE). Il représente une grande diversité d'institutions et d'acteurs : industriels, producteurs d'hydroélectricité, extracteurs de graviers, chambre d'agriculture, chambre de commerce et d'industrie, compagnies d'affermage, associations de consommateurs, associations de défense de l'environnement et du cadre de vie, agence d'urbanisme, etc. ;
- collège des représentants de l'État et de ses établissements publics (25 % de la CLE). Il contient les représentants du préfet coordonnateur de bassin, l'ensemble des services d'État concernés, l'Agence de l'eau, les établissements publics concernés.

La CLE ne dispose pas de budget en propre. Elle doit donc s'appuyer pour mener à bien ses missions sur une structure porteuse, un organisme qui va assurer son secrétariat technique et administratif, ainsi que la maîtrise d'ouvrage des études nécessaires tout au long de la démarche.

Dans le cas du SAGE Est lyonnais, le Département du Rhône est la structure porteuse.

La CLE est le véritable noyau opérationnel du SAGE, elle est indispensable pour valider toutes les décisions, mais elle reste une instance un peu lourde au niveau « logistique ». Il est donc nécessaire de mettre en place des instances intermédiaires pour faciliter la concertation et le travail concret des acteurs, par exemple des commissions thématiques qui permettent aussi d'associer des acteurs extérieurs à la CLE.

II. CONTEXTE DE L'EST LYONNAIS

II.1 Situation générale

Le périmètre SAGE englobe un territoire d'environ 400 km² et regroupe plus de 300 000 habitants. 31 communes sont concernées, 26 dans le Rhône, 5 en Isère (cf. figure 2).

Le territoire est marqué par une forte urbanisation et des activités industrielles regroupées en importants pôles au droit de l'aval des couloirs de la nappe de l'Est lyonnais (cf. II.2), en articulation avec de nombreuses infrastructures de transport (aéroports, voies ferrées, routes et autoroutes, pipelines).

Le secteur de Saint-Pierre-de-Chandieu est marqué par d'importantes exploitations de granulats alluvionnaires (hors eau).

Environ 50 % du territoire SAGE est consacré à l'agriculture (dominante de céréaliculture intensive).

II.2 Les milieux aquatiques

La nappe de l'Est lyonnais est formée dans son ensemble de 3 couloirs où elle s'écoule de façon privilégiée : ils sont appelés couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu, Décines et Heyrieux (figure 2). L'eau y circule suivant une direction générale Sud-Est / Nord-Ouest.

Elle contribue également à soutenir le débit de la rivière Ozon et de ses affluents : dans ce secteur, eau souterraine et eau superficielle sont particulièrement liées.

La nappe de l'Est lyonnais est alimentée principalement par la pluie, qui en tombant s'infiltré dans le sol.

La nappe de l'Est lyonnais trouve son exutoire dans la nappe alluviale du Rhône, siège des champs captants de Crépieux-Charmy qui alimentent en eau potable l'agglomération lyonnaise.

Une autre nappe, dite de la molasse, est située sous la nappe de l'Est lyonnais. Son étendue dépasse largement les limites du périmètre du SAGE, mais dans l'Est lyonnais, elle est presque intégralement captive et l'eau y circule très lentement. Son sens d'écoulement est très proche de celui des couloirs fluvio-glaciaires. Il semble que cette nappe soit très peu réalimentée dans le territoire du SAGE.

Le réseau de cours d'eau superficiels est assez peu présent : ruisseau Ozon au sud, canal de Jonage et ruisseaux et plans d'eau de l'île de Miribel-Jonage au nord. Le périmètre du SAGE comporte également quelques zones humides remarquables.

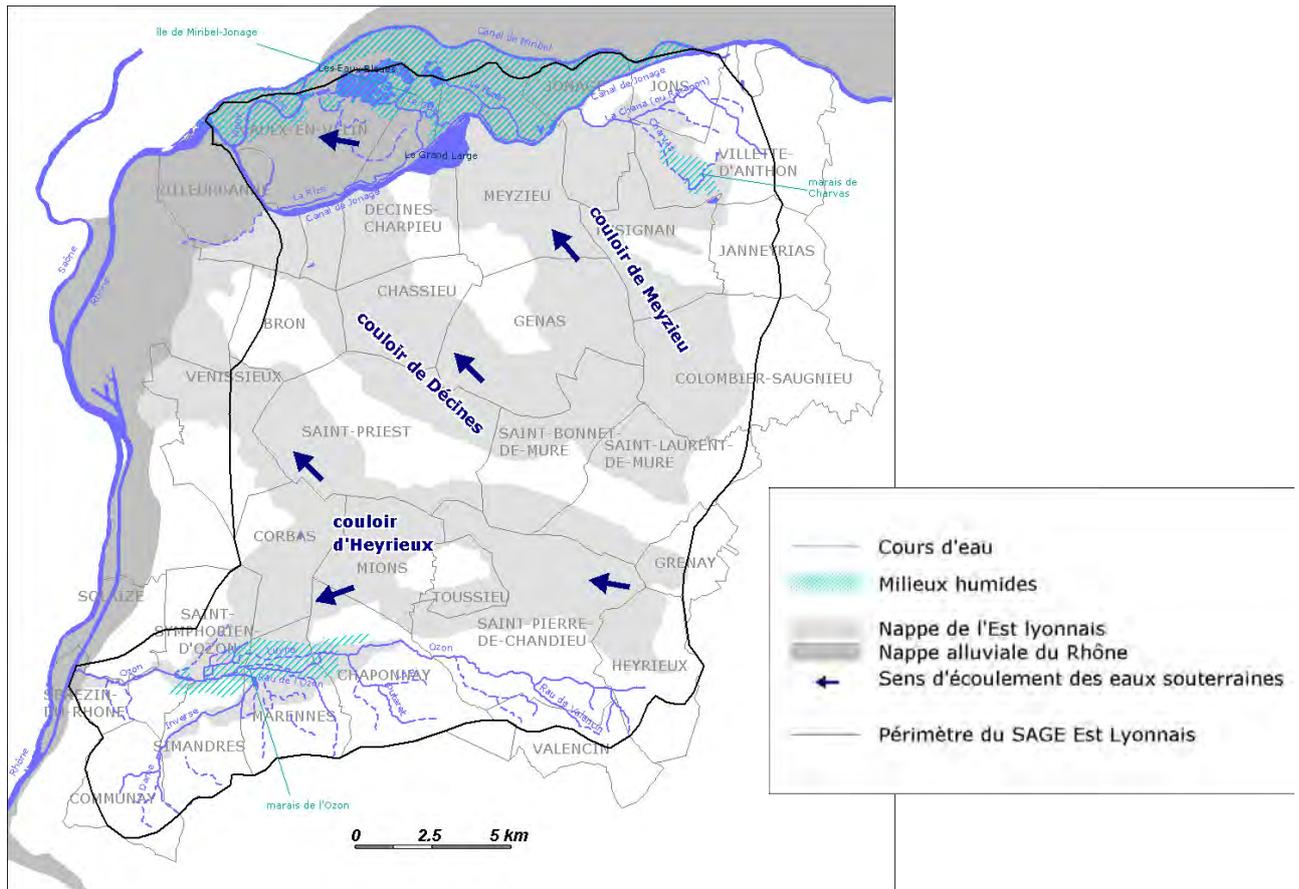


Figure 2 - Périmètre du SAGE et milieux aquatiques

Le système aquatique dans sa globalité présente des signes de dysfonctionnement :

- Du fait de sa vulnérabilité et des pressions liées aux activités humaines, la nappe de l'Est lyonnais est touchée :
 - par une pollution généralisée aux nitrates (teneurs supérieures à 25 mg/l voire même supérieures à 50 mg/l dans certains secteurs) ;
 - par une pollution aux solvants chlorés, significative d'un « bruit de fond » des zones urbanisées (quelques µg/l), et à des concentrations plus importantes (supérieures à 10 µg/l) au niveau des grandes zones industrielles.

La nappe de la molasse semble globalement de bonne qualité, bien qu'on manque encore à l'heure actuelle de données analytiques.

- Des répartitions d'usages localement déséquilibrées : couloirs de Décines et Heyrieux majoritairement sollicités par des usages industriels, couloir de Meyzieu par l'irrigation agricole, et nappe du Rhône à Miribel-Jonage par les usages AEP (captages de Crépieux-Charmy).
- Un cours d'eau, l'Ozon, de qualité moyenne à médiocre vis-à-vis des nitrates et de la biologie. Une zone humide peu considérée (marais de l'Ozon), non gérée et menacée par les remblais. Un secteur sensible aux inondations (aval du bassin-versant de l'Ozon).

- La situation de l'AEP sur le territoire du SAGE, à 100 % d'origine souterraine, est aujourd'hui globalement satisfaisante mais :
 - vulnérabilité importante de la ressource face aux pollutions diverses, diffuses ou accidentelles. La dilution des teneurs en polluants est parfois obtenue par mélange d'eaux de différentes origines ;
 - problématique de la sécurisation de l'alimentation en eau potable : des retards en terme de mise en place ou de révision des procédures de périmètres de protection des captages sont à noter ; les structures d'interconnexion sont parfois insuffisantes ; les ressources de substitution manquent ;
 - d'une façon générale, difficulté de conserver et préserver les captages existant dans l'Est lyonnais face aux pressions anthropiques croissantes.

L'alimentation en eau potable risque donc de poser de sérieuses difficultés à moyen terme : dépassement de normes de qualité, abandon de captages... Les volumes disponibles pourraient alors s'avérer insuffisants face aux besoins, notamment en cas de sécheresse répétée.

II.3 Pourquoi un SAGE dans l'Est lyonnais ?

Le contexte de l'Est lyonnais fait état :

- d'un côté, d'une nappe identifiée comme étant d'intérêt patrimonial, à préserver pour les générations futures ;
- de l'autre, des pressions très fortes qui pèsent sur cette nappe, liées à l'occupation du territoire et au contexte périurbain.

Les collectivités et les services d'État ont été amenés à considérer qu'une démarche concertée sur cette nappe pourrait être un moyen de concilier aménagement urbain, développement industriel et pratique de l'agriculture tout en permettant la sauvegarde des usages domestiques, industriels ou agricoles de l'eau. Le SAGE est donc apparu comme un outil particulièrement adapté à une politique globale et cohérente de gestion de la ressource en eau dans l'Est lyonnais.

La spécificité de ce périmètre de SAGE est donc sa logique hydrogéologique : il concerne principalement une nappe, ce qui assez rare en France où la quasi-totalité des SAGE concerne plutôt des bassins versants de cours d'eau.

III. STRATÉGIE DU SAGE EST LYONNAIS : QUELQUES EXEMPLES D' ACTIONS

Validé par la CLE en juillet 2007, le SAGE est actuellement en cours de consultation auprès des collectivités et chambres consulaires, puis il sera soumis à enquête publique avant son approbation finale par le préfet.

Le SAGE propose 5 grandes orientations :

1. protéger les ressources en eau potable ;
2. reconquérir ou préserver la qualité des eaux souterraines ;
3. gérer durablement la quantité de la ressource en eau ;
4. protéger et gérer les zones humides, prévenir le risque d'inondation ;
5. sensibiliser les acteurs.

Chacune d'elles se décline en de multiples sous-objectifs, et propositions d'actions pour les atteindre. Quelques exemples de ces actions relatives aux orientations 1, 2 et 3 sont présentés ci-après.

III.1 Recommandations transversales aux orientations 1, 2 et 3

D'une façon générale et transversale, la CLE a estimé nécessaire d'écrire noir sur blanc dans le SAGE un certain nombre de rappels à l'application de la réglementation en vigueur ou au contrôle de son application, parce que les acteurs du SAGE ont pu observer certaines lacunes, certaines insuffisances, ou certains retards. Les thématiques particulièrement visées sont les suivantes :

- AEP : actualisation de la protection de certains captages (mise à jour des périmètres de protection et des DUP qui en résultent), contrôle des servitudes dans les périmètres ;
- Contrôle réglementaire en matière d'assainissement autonome ;
- Contrôle des dispositifs d'assainissement pluvial ;
- Contrôle de conformité des eaux de rejets industriels ;
- Lutte contre auto-construction illégale, observable parfois dans des secteurs sensibles par rapport aux eaux souterraines.

III.2 Quelques actions relatives à l'orientation 1

Parmi les objectifs de l'orientation 1, l'un concerne la protection des captages et des zones de captages. Les actions suivantes sont proposées pour l'atteindre :

- Créer un observatoire des mouvements fonciers dans les périmètres de protection : l'objectif est de disposer d'un support d'information concret qui permettrait de faire évoluer les possibilités réglementaires en matière de foncier et de préemption dans les périmètres de protection. Les communes et EPCI peuvent exercer ce droit dans les périmètres de protection rapprochés - remplacer des activités à risques partantes par des occupations du sol sans risque – mais pas dans les périmètres éloignés.
- Inscrire le secteur couvert par les périmètres de protection du captage des Quatre Chênes (Saint-Priest) comme prioritaire pour l'AEP : ce captage a un environnement amont encore non urbanisé. L'objectif est d'exclure, à travers les documents d'urbanisme, l'urbanisation des périmètres de protection et de permettre uniquement la continuation des activités existantes (agricole et extraction de granulats).
- Éviter les activités à risques dans les périmètres de protection rapprochés : il s'agit d'empêcher l'implantation d'activités nouvelles à caractère industriel, artisanal, logistique ou commercial à risques résiduels pour la nappe. Cette action vise surtout les activités de type garages, casses autos, pressings, labos photos, imprimeurs, drogueries, entreprises de peinture, etc.

Par rapport à cette thématique, la CLE s'est heurtée à une « déception réglementaire » : la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 12 2006 a mis en avant la possibilité pour une CLE d'identifier des « zones de protection des aires d'alimentation des captages AEP ». Cette notion avait donné l'espoir à la CLE de pouvoir définir des zones, s'étendant a priori au-delà des périmètres de protection éloignés (en amont hydraulique), dans lesquelles le préfet aurait pu définir des plans d'actions, sous l'égide de la CLE, permettant de mieux encadrer les

nouvelles activités industrielles ou infrastructures de transport (exemple : bonnes pratiques d'assainissement pluvial, éco-zones industrielles, HQE...). Or le décret d'application relatif à cette notion de zones de protection a limité la possibilité de mise en œuvre de plans d'actions à des problématiques purement agricoles. La CLE regrette donc l'aspect restrictif de cet outil : il aurait dû permettre de protéger les aires d'alimentation des captages contre tout type de pollution et non pas seulement contre les pollutions agricoles.

III.3 Quelques actions relatives à l'orientation 2

De nombreux objectifs déclinent cette orientation 2. Parmi ceux-ci :

- améliorer les dispositifs d'assainissement pluvial : les actions préconisées consistent à établir un cahier des charges des bonnes pratiques et soumettre tous les nouveaux projets à ce cahier ;
- limiter les risques de pollution liés aux infrastructures linéaires : une des actions liée à cet objectif consiste par exemple à limiter la traversée des périmètres de protection par de nouvelles infrastructures de transport linéaires ;
- adopter des principes d'urbanisation optimisée : il s'agira notamment de renforcer les conditions d'implantation des nouvelles activités dans les périmètres éloignés (document d'incidence approfondi, mesures compensatoires, plan d'alerte...) ;
- réduire la pollution liée aux activités industrielles, artisanales et commerciales : une des actions emblématiques consiste à organiser la gestion des déchets et substances industrielles dangereuses.

III.4 Quelques actions relatives à l'orientation 3

Parmi les objectifs qui déclinent cette orientation 3 :

- la mise en place d'un plan de gestion dynamique : il s'agit de mettre en œuvre une politique d'exploitation quantitative de la nappe visant un équilibre entre prélèvements et réalimentation, via la répartition de volumes globaux de prélèvements par usage ;
- le renforcement de la connaissance des forages domestiques : même si des réglementations récentes soumettent désormais tous les types de forages et prélèvements au minimum à une déclaration, la question de la connaissance des ouvrages déjà existants se pose tout particulièrement, ainsi que les moyens de mettre en application les exigences de déclaration des ouvrages. Le manque de connaissance de ces forages engendre des inquiétudes à la fois sur le plan quantitatif et qualitatif. Leur nombre dans ce secteur périurbain est a priori énorme et le SAGE tient à se pencher sur ce problème ;
- la réduction de la pression quantitative des zones urbanisées sur la nappe, via par exemple la réglementation des projets de construction d'ouvrages souterrains atteignant la nappe de la molasse.

IV. CONCLUSION

Avant même l'atteinte des objectifs de gestion des milieux aquatiques fixés par le SAGE, l'intérêt de cette démarche est de permettre, à travers la CLE et ses différentes instances, de mettre autour de la table des gens autour d'un thème fédérateur.

Malgré les difficultés liées à la relative lourdeur d'une telle démarche, on aboutit au final à une prise de conscience générale des problèmes liés à l'eau et à l'aménagement du territoire (tout particulièrement dans l'Est lyonnais) et à une volonté commune de trouver des solutions adaptées au territoire. Les acteurs qui participent à la démarche ont la satisfaction de les intégrer dans un document qui n'est pas qu'un catalogue de bonnes intentions mais un vrai outil réglementaire, potentiellement puissant.

La concertation a aussi ses limites. Le SAGE n'est pas au-dessus des lois et sur certaines thématiques, lorsque les outils réglementaires sont insuffisants, la solution échafaudée en concertation tend parfois vers un consensus mou, certainement insuffisant pour assurer une réelle protection de la ressource et pour atteindre à coup sûr les objectifs de bon état exigés par la DCE. ■

CFH – Comité français d'hydrogéologie

Comité national français de l'association internationale des hydrogéologues – AIH

Président : Jean-Claude Roux

3, avenue Claude Guillemin – BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2
Téléphone 02 38 64 38 86 – Télécopie 02 38 64 39 90

Retrouvez le colloque sur le site du CFH : <http://aih.brgm.fr>

Achévé d'imprimer en novembre 2007
Imprimerie Corbet à Orléans (45)

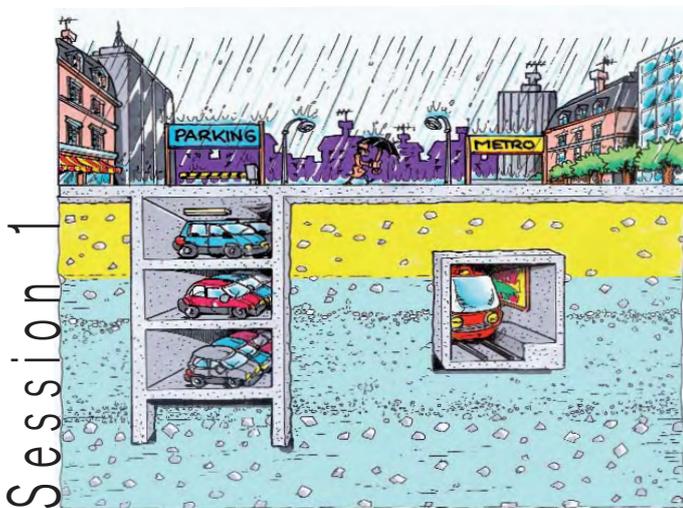
Dépôt légal novembre 2007
Imprimé en France

En contexte urbain, où les pressions anthropiques sont fortes et nombreuses, la gestion des nappes souterraines est confrontée à des conditions historiques, techniques et économiques particulières.

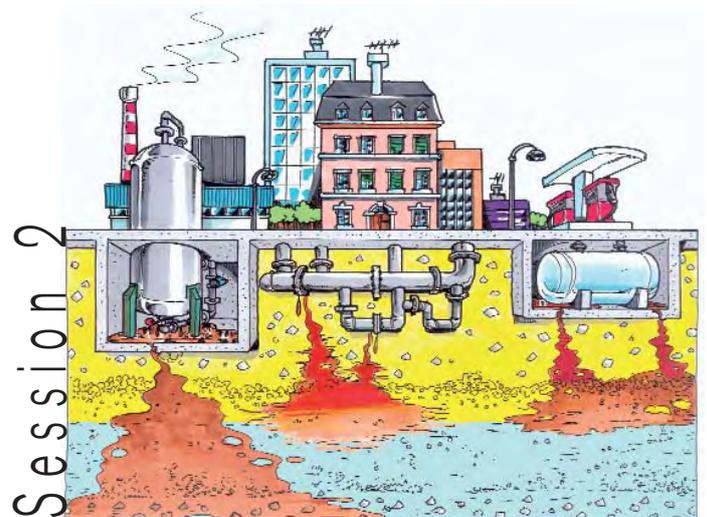
Les influences de l'activité humaine sur les nappes sont multiples : imperméabilisation, déficits d'alimentation, cloisonnement par les parois moulées, rabattements temporaires et permanents des niveaux de nappes, tassement des terrains, fuites des réseaux d'eaux usées et des stockages de substances polluantes, pompes à chaleur...

Peut-on considérer certaines nappes sinistrées comme vouées à l'abandon ou faut-il au contraire redoubler de vigilance ? La ville croît et menace ou « rattrape » des zones de captage d'eau potable jusqu'alors préservées : comment gérer le conflit ? La réglementation actuelle concernant l'hydrogéologie urbaine est-elle suffisante, est-elle perfectible ? Quels enseignements tirer des retours d'expérience ?...

Ces questions complexes sont abordées par le biais de quatre sessions.



Session 1
Équilibres et déséquilibres physiques



Session 2
Pollutions



Session 3
Usages thermiques



Session 4
Gestion et réglementation

30 euros

978 2 9530816 0 2
ISBN 978-2-9530816-0-2
ISSN 1958-5365



CFH – Comité français d'hydrogéologie

3, avenue Claude Guillemin – BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2
Téléphone 02 38 64 38 86 – Télécopie 02 38 64 39 90

Retrouvez le colloque sur le site du CFH : <http://aih.brgm.fr>