Document public

Recommandations pour la mise en place d'un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain

Rapport final

BRGM/RP-68795-FR
Juin 2020

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Recommandations pour la mise en place d'un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain

Rapport final

BRGM/RP-68795-FR
Juin 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public du BRGM

Bault V., Money P., Neveux A.
Avec la collaboration de
Boissard G., Magit K.

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : LEPROND Hubert	Nom : GOURCY Laurence
Fonction : Responsable de l'Unité Sites et Sols Pollués (DEPA/3SP)	Fonction : Responsable de l'Unité Evaluation et Valorisation des connaissances sur l'Eau (DEPA/EVE)
Date : 07/07/2020	Date : 08/01/2021
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Remerciements

Nous remercions le bureau du Sols et du Sous-sol du Ministère de la Transition Ecologique ainsi que l'ensemble des participants à cette étude qui ont permis d'apporter des compléments d'informations essentiels aux données disponibles et d'affiner ainsi la connaissance du sol et du sous-sol en milieu urbain.
Plus particulièrement, nous remercions la Métropole de Lyon, la Ville de Lyon, la DDT du Rhône, la DREAL Rhône-Alpes-Auvergne, la DREAL du Rhône, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, le SAGE de l'Est-Lyonnais, la Compagnie nationale du Rhône (CNR), SYTRAL et KEOLIS pour leurs très utiles contributions.

Mots-clés : eau souterraine, réseau qualité, réseau piézométrique, piézomètre, qualitomètre, urbain, France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bault V., Money P., Neveux A., Boissard G., Magit K. (2020) – Recommandations pour la mise en place d'un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain. Rapport final. BRGM/RP-68795-FR, 236 p., 39 fig., 4 tabl., 6 ann.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

Synthèse

Les eaux souterraines en milieu urbain présentent plusieurs spécificités :

- Le cycle de l'eau et les écoulements souterrains y sont perturbés. Les causes sont multiples : prélèvements en eau pour divers usages, imperméabilisation des sols limitant l'infiltration des eaux de pluie, drainage ou pompage pour la protection d'infrastructures souterraines (lignes de métros, parkings souterrains…), fuites de réseaux de collectivité, canalisation des cours d'eau… ;
- Les sources de pollutions potentielles peuvent être variées : industries, activités de services, traitements des voiries, parcs et jardins, pollutions historiques… Les impacts associés peuvent par ailleurs se cumuler ;
- Les usages de l'eau sont nombreux et plus ou moins sensibles : récréatifs, industriels, géothermiques, privés…

Une connaissance minutieuse du contexte hydrogéologique présent au droit de l'agglomération permet d'appréhender le fonctionnement complexe que représentent les eaux souterraines en milieu urbain. La mise en place de réseaux de suivi dans les grandes agglomérations est la première étape pour recueillir les données sur la qualité, les sens d'écoulement et les niveaux des eaux souterraines. L'objectif d'un tel suivi est d'évaluer l'état actuel des nappes et d'anticiper les changements et les tendances du système hydrogéologique. Les connaissances acquises doivent permettre de prévoir les politiques de demain en matière de gestion des eaux souterraines et plus largement, du sous-sol et du sol.

La mise en œuvre d'un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain impose de disposer d'une méthodologie commune à l'échelle nationale. Dans ce cadre, le BRGM a élaboré pour le compte du Ministère de la Transition Ecologique un guide méthodologique permettant à une agglomération, d'une part de mettre en place un réseau pérenne de qualitomètres adapté à ses problématiques et, d'autre part de mettre à disposition des acteurs locaux les données acquises. Les préconisations méthodologiques formulées dans ce guide reposent sur les retours d'expérience d'agglomérations en France et à l'international et sur l'étude du cas concret de la métropole de Lyon.

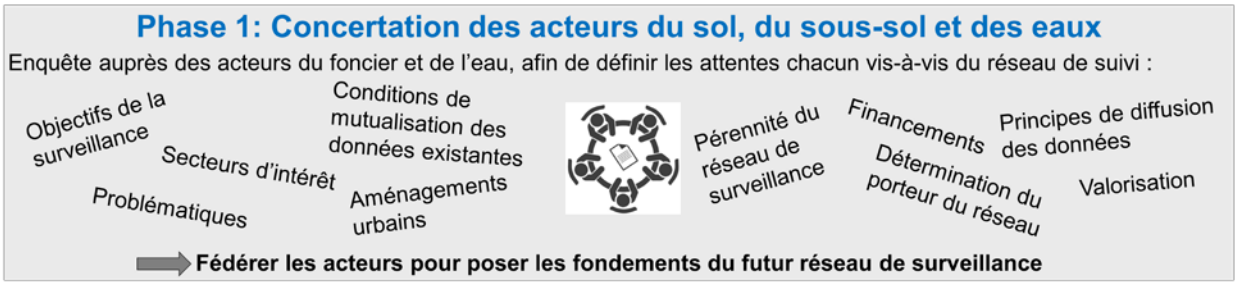
La première partie de la présente étude propose un état des lieux en France et à l'international des guides méthodologiques et des réseaux de suivi des eaux souterraines existants en milieu urbain. Les retours expériences de plusieurs agglomérations en France et à l'international permettent de tirer des enseignements intéressants pour l'élaboration d'une méthodologie nationale, notamment sur la densité et la localisation des points de surveillance selon la problématique. Les recherches bibliographiques effectuées par le BRGM mettent en évidence l'absence d'état de l'art sur la conception de réseaux de surveillance en milieu urbain. Les réseaux de surveillance existants permettent de répondre aux multiples problématiques du milieu urbain :

- disposer d'une vision globale des eaux souterraines en suivant l'évolution spatio-temporelle de la qualité et des niveaux d'eau ;
- satisfaire les exigences sur la qualité et les niveaux des eaux souterraines, en adéquation avec l'usage des eaux souterraines et des sols, et les enjeux particulièrement sensibles à protéger ;
- anticiper la survenue d'une pollution, caractériser l'évolution d'un panache avéré, évaluer l'impact cumulé de plusieurs sources de pollution.

La deuxième partie de l'étude a pour objet de formuler des préconisations méthodologiques pour la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines. Cette seconde partie est rédigée sous la forme d'un guide méthodologique, destiné aux collectivités (maîtres d'ouvrage des études sur les agglomérations) et aux bureaux d'études (maîtres d'œuvre de ces études). Chaque milieu urbain étant unique, ce guide se veut adaptable et vise à fournir les lignes directrices essentielles à la conception d'un réseau de surveillance des eaux souterraines. La démarche élaborée dans le cadre de ce projet se décline en phases successives et complémentaires, permettant de prendre en compte l'ensemble des spécificités du milieu urbain. Ces différentes phases proposent des outils permettant de répondre aux questions qui se posent lors de la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines au droit d'une zone urbaine :

- phase 1 : Quels sont les principes et les objectifs du réseau de surveillance ?
- phase 2 : Quelle est la densité optimale des points de surveillance (nombre de points) ?
- phase 3 : Quelle est l'implantation idéale des points de surveillance (localisation) ?
- phase 4 : Quelles doivent être les caractéristiques des points de surveillance (profondeur, niveaux crépinés, nature du tubage…), des campagnes de prélèvements (fréquence et période) et du programme d'analyses ?
- phase 5 : Comment mettre en œuvre le réseau de surveillance, selon les préconisations des phases précédentes (sélection de points de surveillance, protocoles de prélèvements et d'analyse) ?
- phase 6 : Comment optimiser le nombre de points et le programme de surveillance ?

Les méthodes proposées sont appliquées au **cas concret de l'agglomération de Lyon**. L'objectif est de tester la méthodologie proposée dans le guide sans pour autant réaliser une étude complète et définir un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines opérationnel. Cette étude de cas sert de fil rouge à l'ensemble de la deuxième partie du rapport, afin d'illustrer chaque étape de la méthodologie.



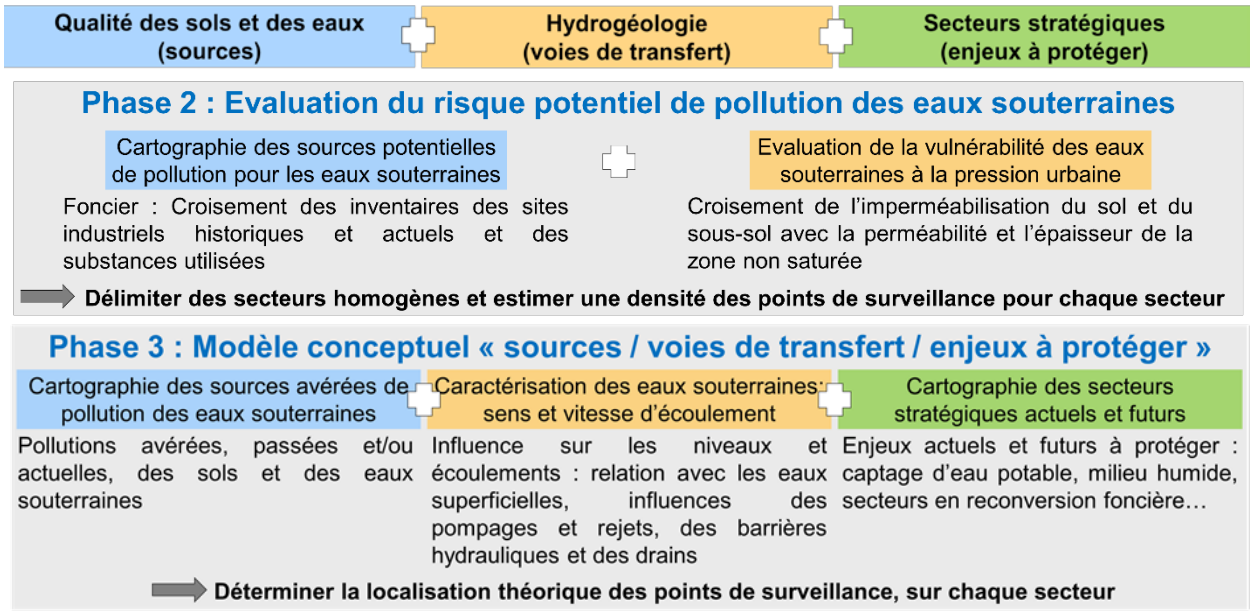
Le point de départ (**phase 1**) de la méthodologie consiste à fédérer les acteurs du sol et du sous-sol urbain. Cette étape est incontournable pour poser les fondements du futur réseau de suivi, de la conception du réseau à la diffusion des données. La concertation avec les acteurs du sol et du sous-sol urbain doit se poursuivre tout au long du projet. Du fait de la multiplicité des acteurs, il est conseillé de mettre en place un observatoire, afin d'orienter les programmes d'actions, et d'identifier un coordinateur, chargé du pilotage et de la gestion de tous les aspects de la mise en œuvre du réseau de surveillance.

La surveillance de la qualité des eaux souterraines doit impérativement se faire en étroite collaboration avec la surveillance quantitative de la ressource. Le retour d'expérience montre que pour être pérenne, le réseau de surveillance doit permettre la caractérisation du milieu souterrain, répondre aux multiples problématiques des eaux souterraines en milieu urbain et évoluer au cours du temps pour s'adapter à l'émergence de nouvelles problématiques. La délimitation de secteurs stratégiques est une solution permettant une priorisation des actions (exemple :

protection d'un captage d'eau potable ou d'une nappe profonde, quartier en cours de reconversion…). Le réseau est alors densifié, de façon pérenne ou temporaire, au droit de ces secteurs afin de répondre à un objectif précis.

Les discussions entre les acteurs du sol et du sous-sol doivent également permettre de définir les principes de mutualisation et de diffusion, aux professionnels et au public, des données historiques ou acquises dans le cadre du futur réseau. La mutualisation des données est indispensable, afin d'optimiser les différents suivis et leurs coûts, de combler les lacunes de connaissances, notamment sur les secteurs potentiellement pollués, et d'anticiper le suivi au droit des futurs secteurs stratégiques (reconversion foncière, futur champ captant…). Un enjeu particulier consiste à construire une connaissance commune et partagée entre les services décisionnaires de l'Etat, les bureaux d'études, les industriels et les aménageurs. Le moyen de diffusion des données doit être adapté aux besoins des utilisateurs (rapport, site internet, système d'information géographique, etc.). Il est fortement recommandé de déclarer le réseau de surveillance et de bancariser les données (niveaux et analyses) dans ADES, portail national de diffusion des données sur les eaux souterraines.

La mise en œuvre des méthodes de mise en place d'un réseau de suivi des eaux souterraines en milieu urbain nécessite d'avoir au préalable caractérisé, dans toute sa complexité, le fonctionnement hydrogéologique du sous-sol urbain. La **phase 1** permet d'identifier les sources d'informations et de collecter l'ensemble des données nécessaires à la mise en place du réseau de suivi : études et rapports, documents cartographiques ou spatialisés, banques de données, reconnaissances de terrain et, si nécessaire, acquisition de données complémentaires. Les bases de données réglementaires officielles sont souvent parcellaires et ne permettent pas de renseigner toutes les informations nécessaires à la mise en œuvre des différentes phases de la méthodologie. Ainsi, les panaches de pollution sont souvent mal connus, certains points d'eau ne sont pas déclarés, etc. Il est préconisé de choisir le code national de la Banque du Sous-Sol (BSS) comme identifiant unique des points d'eau, afin de croiser les différentes bases consultées et de compiler facilement leurs données.



L'approche multicritère proposée lors des **phases 2 et 3** permet de croiser les données sur les sources de pollution avérées et potentielles, historiques et actuelles, sur l'hydrogéologie (voies de transfert) ainsi que sur les enjeux actuels et futurs à protéger. L'ensemble des données spatialisées sont traitées par analyses multicritères « sources / voies de transfert / enjeux à

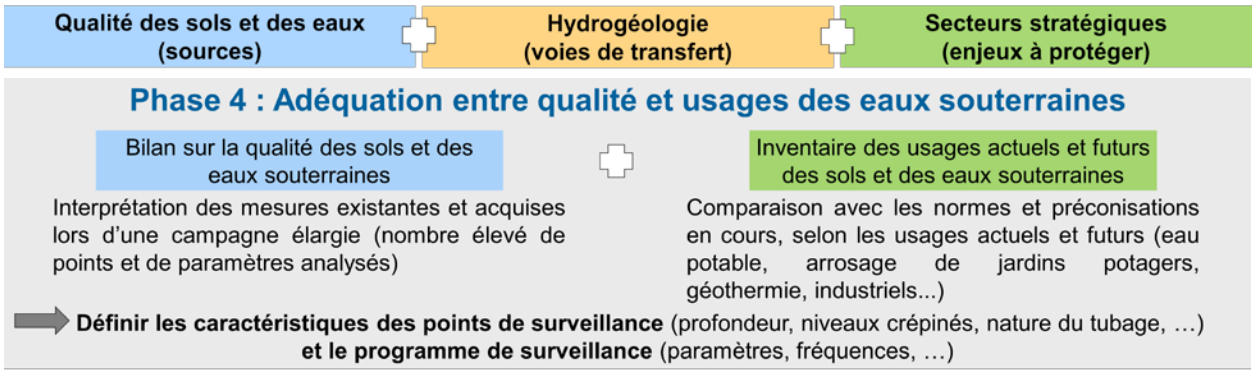
protéger » afin d'obtenir des cartes synthétiques permettant de définir la densité par secteurs (**phase 2**) et la localisation idéale des ouvrages de surveillance (**phase 3**).

Lors de la **phase 2**, des cartographies sont réalisées sur la vulnérabilité des eaux souterraines en fonction des modes de transferts identifiés ainsi que sur les pressions passées et actuelles exercées par les activités potentiellement polluantes du territoire. Les éléments de diagnostic sont ensuite confrontés entre eux afin de délimiter des secteurs cohérents en terme de risque potentiel de pollution des eaux souterraines. Une densité de points de suivi est déterminée selon les secteurs, au regard des enjeux actuels et futurs de protection de la ressource. Des valeurs indicatives de densité sont proposées dans le guide, d'après les densités calculées pour des réseaux urbains existants en France et à l'international. Un suivi renforcé, correspondant à une surveillance détaillée au droit de secteurs stratégiques définis avec les acteurs de l'agglomération, peut être intégré dans cette approche. Plus le nombre d'ouvrages suivis est élevé, mieux le milieu est caractérisé dans toute sa complexité et plus la probabilité d'interception d'un panache de pollution augmente. Néanmoins, les coûts liés à ce suivi peuvent alors être très importants et être de nature à remettre en cause la pérennité du réseau si les enjeux ne sont pas très importants. Le choix de la densité est fréquemment un compromis à trouver entre la précision, le coût et les enjeux.

L'approche multicritère proposée lors de la **phase 3** permet de croiser les données sur les sources de pollution avérées, sur les voies de transfert vers la nappe et sur les enjeux actuels et futurs à protéger, afin d'esquisser un modèle conceptuel « sources / voies de transferts / enjeux à protéger ». Les éléments cartographiés « sources / voies de transferts / enjeux à protéger » sont ensuite confrontés entre eux pour définir l'emplacement le plus approprié des points de surveillance. Cette localisation théorique des ouvrages doit permettre de caractériser l'ensemble de l'hydrosystème selon les objectifs de suivis et est affinée selon les sources de pollution et les enjeux actuels et futurs à protéger. Il est recommandé de soumettre la représentativité du réseau théorique de surveillance à l'expertise des acteurs du sol et du sous-sol du territoire urbain concerné.

L'étude de cas de l'agglomération lyonnaise montre que les **phases 2 et 3** ne peuvent être mises en œuvre qu'à partir d'un ensemble de données fiables. Une analyse multicritère, aussi performante soit-elle, peut être remise en cause par la réalité du terrain du fait notamment de données lacunaires ou erronées. Ainsi, la caractérisation des pollutions avérées est fréquemment difficile du fait de données ponctuelles et non homogènes en terme de paramètres analysés et de répartition spatiale. De même, les cartes piézométriques disponibles ne sont souvent pas adaptées à l'échelle d'une agglomération. Il est donc recommandé d'organiser une vaste campagne de mesures, regroupant un nombre élevé d'ouvrages prélevés et de paramètres analysés, afin de caractériser le fond géochimique naturel et urbain des différentes nappes ainsi que les anomalies sur la qualité et sur les niveaux. Les résultats de cette campagne élargie aideront également à la réalisation des phases suivantes.

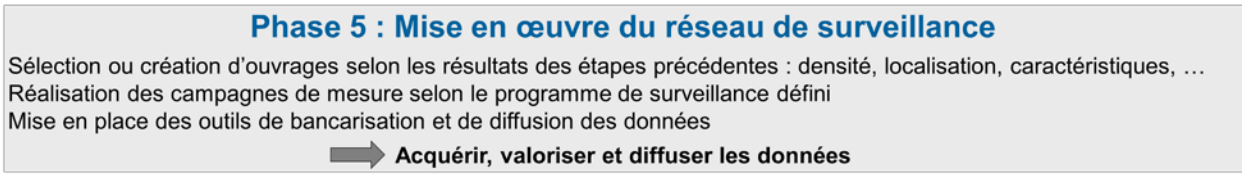
Les données collectées doivent également être adaptées à l'échelle de travail. De plus, les analyses multicritères proposées lors des **phases 2 et 3** sont basées sur des méthodes existantes, impliquant une nécessaire simplification de la réalité. Selon la taille et le contexte de chaque agglomération, la précision et l'historique des données, les analyses multicritères peuvent être faites à des résolutions et à l'aide de méthodes différentes. Les lignes directrices et recommandations proposées dans ce guide sont donc à adapter au cas par cas. La méthodologie pourra également évoluer sur la base de retours d'expérience et du développement de nouvelles méthodes appliquées au milieu urbain et à ses spécificités.



Durant la **phase 4**, l'inventaire des usages actuels et futurs des sols et des eaux souterraines ainsi que les connaissances acquises (polluants mis en jeu, fonctionnement du système hydrogéologique…) permettent de définir les caractéristiques idéales des ouvrages de suivis (profondeur, niveaux crépinés, nature du tubage…) ainsi que de déterminer le programme de mesures associées (paramètres, fréquences…). Ce travail est à effectuer pour chacune des nappes en cas d'aquifères superposés.

La **phase 4** doit aboutir à la formulation de préconisations permettant la mise en œuvre d'un programme de suivi des eaux souterraines adapté en terme d'analyses, de caractéristiques des ouvrages, de profondeur d'échantillonnage, de fréquence et de période des campagnes de mesures. Il est conseillé de garder le même programme analytique sur l'ensemble du réseau, compte tenu de la complexité du milieu urbain, et de l'adapter si besoin au droit de certains secteurs pour des paramètres très spécifiques et selon les usages des eaux souterraines. Du fait de la grande diversité de substances potentiellement présentes dans les eaux souterraines en milieu urbain et de leur différent comportement, il est primordial de caractériser les évolutions de la qualité de la nappe selon la profondeur. L'ajout d'une composante verticale (profondeur) permet de caractériser les pollutions en trois dimensions au sein d'une même nappe.

Les données disponibles, en terme de répartition des points mesures et de paramètres analysés, ne sont souvent pas adaptés au milieu urbain et ne permettent pas une caractérisation représentative des différentes nappes présentes à l'échelle d'une agglomération. L'organisation d'une première campagne élargie, consistant en une recherche relativement complète d'éléments et composés sur un nombre élevé de points, est souvent nécessaire. Les résultats permettent d'établir un état des lieux détaillé sur les sens d'écoulement, la qualité des eaux souterraines en référence aux normes disponibles ainsi que sur les éventuelles influences naturelles et anthropiques. De nombreux outils sont disponibles pour l'interprétation des résultats : évaluation temporelle par des chroniques et des études statistiques et visualisation spatiale des données par des cartographies et des interpolations. Compte tenu de la complexité du milieu urbain, la mise en œuvre d'un modèle hydrodynamique et hydrogéochimique est intéressante pour appréhender les modifications des niveaux et des écoulements des eaux souterraines et pour caractériser la qualité des eaux souterraines, délimiter les panaches de pollutions et suivre leurs évolutions dans le temps. Un tel modèle constitue un outil puissant de gestion et d'anticipation, permettant de prédire les modifications de la qualité des eaux souterraines et la migration des panaches de pollution.



Selon les résultats des phases précédentes (densité par secteur, localisation théorique, caractéristiques des points de suivi et programme de surveillance), des ouvrages pertinents sont identifiés durant la **phase 5**. Deux stratégies peuvent être mises en œuvre et se compléter.

La première stratégie consiste à sélectionner des ouvrages existants. Les avantages économiques sont alors évidents. Cependant, la localisation et les caractéristiques des points existants ne répondent pas toujours aux critères définis pour les objectifs du réseau de surveillance. La campagne de terrain effectuée sur un secteur de l'agglomération lyonnaise a démontré que les informations concernant les ouvrages existants en base de données sont fréquemment parcellaires ou erronées. De plus, certains ouvrages ne sont pas déclarés dans les bases de données officielles. Il est donc indispensable de réaliser une enquête de terrain à partir des informations collectées afin d'identifier les ouvrages opérationnels et pertinents à inclure au réseau de suivi. Cette visite peut être complétée par une mesure piézométrique, une vérification de la profondeur totale (absence de comblement), une inspection caméra (état des crépines, absence d'objet) et un pompage (vérification de la productivité). Le retour d'expérience montre que certains ouvrages sont potentiellement intéressants car pérennes, correctement entretenus et ponctuellement exploités. C'est notamment le cas des forages agricoles utilisés pour l'irrigation des cultures et des forages communaux pompés pour le remplissage des piscines et pour l'arrosage des parcs, jardins, cimetières et terrain de sport. Les piézomètres de suivis des ICPE sont souvent réalisés dans les règles de l'art et disposés en amont et aval d'un site potentiellement pollué mais leurs caractéristiques sont souvent fixées pour répondre à un suivi réglementaire lié aux activités du site. Enfin les points de suivis IOTA sont localisés au droit de secteurs souvent prioritaires (reconversion foncière) mais restent peu pérennes et parfois mal conçus et protégés.

La seconde stratégie consiste à réaliser l'ensemble ou une partie des ouvrages. La mise en place d'un tel réseau demande un investissement financier important. Mais le réseau est alors adapté au plus près des problématiques et les ouvrages appartiennent au gestionnaire ou au financeur du réseau. Les points sont le plus souvent implantés en domaine public, ce qui favorise leur accès mais les exposent à des actes de vandalisme.

Une fois le réseau mis en place, les campagnes de mesures et de prélèvements ainsi que les analyses sont réalisées selon le programme de surveillance défini préalablement (phase 4). Le financement et la diffusion des données s'organisent selon les modalités déterminées durant la phase 1. Quelques recommandations peuvent être formulées, afin de garantir la pérennité des ouvrages. En premier lieu, les points de surveillance pourraient faire partie intégrante des documents d'urbanisme (exemple : plan local d'urbanisme). Concernant les ouvrages privés, une convention peut être établie entre le propriétaire de la parcelle et/ou de l'ouvrage et le gestionnaire du réseau de surveillance, afin de fixer les termes et conditions d'accès au point.

Phase 6 : Optimisation du réseau de surveillance

Réalisation d'une campagne élargie ainsi qu'un bilan tous les 4 ans afin d'adapter du réseau de surveillance
Répéter les phases 4 (adéquation entre qualité et usages des eaux souterraines) et 5 (mise en œuvre du réseau)

⇒ **Mettre à jour et pérenniser le réseau de suivi**

La mise en œuvre du réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines doit s'accompagner de mesures permettant d'évaluer à moyen et long terme l'efficacité du réseau et du programme de mesures et, si besoin, de faire évoluer ceux-ci. La **phase 6** propose donc de réaliser régulièrement une campagne élargie en termes d'ouvrages et d'analyses ainsi qu'un retour d'expériences et un bilan de l'ensemble des résultats d'analyses. Ce bilan peut permettre d'envisager une adaptation du réseau, c'est-à-dire une optimisation des points suivis et des campagnes d'analyses ainsi que l'intégration ou l'abandon de secteurs stratégiques.

Sommaire

1. **Introduction 13**

1.1. CONTEXTE DU PROJET 13

1.2. OBJECTIFS ET ACTIONS DU PROJET 15

2. **Eléments de contexte : interaction entre les eaux souterraines et le milieu urbain et risques associés 17**

2.1. SPECIFICITES DES INTERACTIONS ENTRE LES EAUX SOUTERRAINES ET LE MILIEU URBAIN 17

2.2. RISQUES ASSOCIES AUX INTERACTIONS ENTRE EAUX SOUTERRAINES ET LE MILIEU URBAIN 24

3. **Retour d'expérience en France et à l'international 27**

3.1. GUIDES METHODOLOGIQUES EXISTANTS 27

3.2. RESEAUX DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES EXISTANTS EN MILIEU URBAIN 30

4. **Démarche méthodologique proposée et application à un cas concrêt 43**

4.1. PRESENTATION DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE 43

4.2. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON 45

5. **Phase 1 : Concertation des acteurs du sol, du sous-sol et des eaux 49**

5.1. CONCERTATION DES ACTEURS 49

5.2. COLLECTE DES DONNEES ET COMPREHENSION DU CONTEXTE DE L'AGGLOMERATION 53

5.3. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON 56

6. **Phase 2 : Estimation d'une densité de points de surveillance 59**

6.1. CARTOGRAPHIE DES SOURCES POTENTIELLES DE POLLUTION ET DE LA PRESSION POLLUANTE POTENTIELLE POUR LES EAUX SOUTERRAINES 59

6.2. EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES NAPPES A LA PRESSION URBAINE ... 61

6.3. DEFINITION DE SECTEURS ASSOCIES A UNE DENSITE DE POINTS DE SURVEILLANCE 63

6.4. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON 64

7. **Phase 3 : Implantation théorique des points de surveillance 71**

7.1. MODELE CONCEPTUEL SOURCES / VOIES DE TRANSFERT / ENJEUX A PROTEGER 72

7.2. DEFINITION DE LA LOCALISATION THEORIQUE DES POINTS DE SURVEILLANCE 74
7.3. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON 74
8. **Phase 4 : Définition des caractéristiques des points et du programme de surveillance 81**
8.1. ADEQUATION ENTRE LA QUALITE ET L'USAGE DES EAUX SOUTERRAINES 82
8.2. PRECONISATIONS POUR LE PROGRAMME DE SUIVI 85
8.3. PRECONISATIONS POUR LES CARACTERISTIQUES DES POINTS DE SUIVIS 87
8.4. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON 90
9. **Phases 5 : Mise en œuvre du réseau de surveillance 97**
9.1. SELECTION ET CREATION DES OUVRAGES DE SURVEILLANCE 97
9.2. MISE EN ŒUVRE DES CAMPAGNES DE MESURES 99
9.3. RAPPORT DE SUIVI ET INTERPRETATION DES DONNEES D'UNE CAMPAGNE ..100
9.4. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON 101
10. **Phase 6 : Optimisation du réseau de suivi 109**
10.1. CAMPAGNE ELARGIE ET RAPPORT DE BILAN 109
10.2. OPTIMISATION DU RESEAU DE SURVEILLANCE 110
10.3. EVOLUTION DU RESEAU DE SURVEILLANCE 112
11. **Conclusion 115**
12. **Bibliographie 117**

Liste des figures

Figure 1 : Répartition des ouvrages déclarés comme piézomètres dans un réseau ADES (source : ADES, 2020) 14
Figure 2 : Répartition des ouvrages déclarés comme qualitomètres dans un réseau ADES (source : ADES, 2020) 14
Figure 3 : Relation entre les infrastructures urbaines et la nappe superficielle (source : traduit de Foster S. et Tyson G., 2015) 21
Figure 4 : Les structures urbaines et leurs impacts sur les niveaux piézométriques et les écoulements (traduit de Attard G. et al., 2016) 22
Figure 5 : Evolution des niveaux de la nappe superficielle en lien avec la croissance urbaine. Phénomène de rebond phréatique (Source : Parriaux A. et al., 2010) 26
Figure 6 : Schéma simplifié de la méthodologie mise en œuvre pour le développement d'un réseau de surveillance (d'après Vrba J. et Adams B., 2008 et Vrba J. and Sobisek P, 1988) 29

Figure 7 : Exemple d'échantillonnage présenté en 2D (source : traduit de Gilbert R.O., 1987 modifié par NGWMN, 2013) 38
Figure 8 : Méthodologie pour la surveillance et la protection des ressources en eau souterraine à Córdoba (source : traduit de Ferral Anabella et al., 2014) 39
Figure 9 : Site internet de diffusion des données de Hambourg (source : geoportal-hamburg.de/geo-online/) 41
Figure 10 : Tête d'un piézomètre et bouchon interactif du réseau piézométrique de Boston (source : www.bostongroundwater.org, 2018) 41
Figure 11 : Méthodologie détaillée pour la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain 44
Figure 12 : Communes de la Métropole de Lyon et localisation du secteur d'étude détaillé 45
Figure 13 : Carte hydrogéologique de l'agglomération de Lyon (source : bdlisa.eaufrance.fr) 47
Figure 14 : Méthodologie de la phase 1 - concertation des acteurs du sol, du sous-sol et des eaux 49
Figure 15 : Secteurs stratégiques de la métropole de Lyon. 57
Figure 16 : Méthodologie de la phase 2 - évaluation du risque potentiel de pollution des eaux souterraines. 59
Figure 17 : Cartographie de l'imperméabilisation des sols à Hambourg en 2017 (source : geoportal-hamburg.de/geo-online/) 63
Figure 18 : Localisation et nombre (par mailles carrées de 250 m) de sites industriels historiques et actuels de la Métropole de Lyon (source : basol.developpement-durable.gouv.fr et www.georisques.gouv.fr) 65
Figure 19 : Densité de sites ICPE et BASIAS potentiellement émetteurs de COHV (à gauche) et de phtalates (à droite) (source : basol.developpement-durable.gouv.fr et www.georisques.gouv.fr). 66
Figure 20 : Estimation de la vulnérabilité, croisement de l'indice de développement et de persistance des réseaux (à gauche) et de l'épaisseur de la zone non staturée (à droite) (source : infoterre.brgm.fr) 67
Figure 21 : Proposition d'un nombre minimum de points de surveillance selon le secteur. 68
Figure 22 : Méthodologie de la phase 3 - modèle conceptuel « sources / voies de transfert / enjeux à protéger » 71
Figure 23 : Schéma d'un réseau de surveillance des eaux souterraines en milieu urbain 71
Figure 24 : Cartographie des sources avérées de pollution des eaux souterraines (à gauche) et des enjeux actuels et futurs à protéger (à droite) (source : www.ades.eaufrance.fr, data.grandlyon.com, www.data.gouv.fr et basol.developpement-durable.gouv.fr) 75
Figure 25 : Ecoulement de la nappe, barrières étanches et drains (source : Seguin J.-J.,2008 ; data.grandlyon.com et bnpe.eaufrance.fr) 77
Figure 26 : Proposition d'implantation des ouvrages de surveillance sur la base du modèle sources / voies de transfert / enjeux à protéger au droit du secteur d'étude de Vaulx-en-Velin. 80
Figure 27 : Méthodologie de la phase 4 - adéquation entre la qualité et les usages des eaux souterraines. 81
Figure 28 : Visualisation schématique en 2 dimensions (plan horizontal) et en 3 dimensions (bloc diagramme) d'un panache de pollution (courbes d'isoconcentration). 82
Figure 29 : Positionnement de la crépine selon le comportement du polluant recherché en zone saturée (Lemière, 2008 modifié). 89
Figure 30 : Comparaison entre pression potentielle et qualitomètres présentant des concentrations en COHV (à gauche) et en phtalates (à droite) supérieures aux seuils de quantification. 92
Figure 31 : Localisation des qualitomètres recensés dans les réseaux ADES, comparée à la pression potentielle urbaine représentée par la densité de sites industriels historiques et actuels (source : ades.eaufrance.fr, basol.developpement-durable.gouv.fr et www.georisques.gouv.fr). 93

Figure 32 : Méthodologie de la phase 5 – mise en œuvre du réseau de surveillance.....97
Figure 33 : Les différentes étapes de la chaine analytique.....100
Figure 34 : Localisation des points d'eau recensés sur l'agglomération de Lyon.....102
Figure 35 : Localisation des points d'eau recensés, avant (en haut) et après (en bas) application de critères.....104
Figure 36 : Localisation des points pertinents pour un suivi de la qualité des eaux souterraines. 106
Figure 37 : Photographies et passage caméra d'un point de suivi d'un site IOTA (point ACOMPL-84). 107
Figure 38 : Méthodologie de la phase 6 – optimisation du réseau de surveillance. 109
Figure 39 : Exemple de carte d'iso-gains en précision sur l'estimation de la valeur moyenne, obtenue grâce à la méthode du point fictif.....112

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des réseaux de surveillance des eaux souterraines existants en France et à l'international.....32
Tableau 2 : Données à collecter et utilisation lors des différentes phases de la méthodologie proposée.....54
Tableau 3 : Critères conditionnant la vulnérabilité des eaux souterraines (source : Mardel V. et Gravier A., 2005).....61
Tableau 4 : Nombre de points d'eau, avant et après application de critères, sur le secteur d'étude.....103

Liste des annexes

Annexe 1 Modifications détaillées du cycle de l'eau et des régimes d'écoulement en milieu urbain.....131
Annexe 2 Fiches descriptives des études bibliographiques.....141
Annexe 3 Outils de communication ayant servi de support lors des entretiens 195
Annexe 4 Restitution des entretiens menés avec les acteurs du sol et du sous-sol de l'agglomération de Lyon.....205
Annexe 5 Détail des données à collecter et des sources de données.....217
Annexe 6 Synthèses des informations compilées lors de la visite de terrain 233

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DU PROJET

La connaissance des eaux souterraines est indispensable à toute politique de gestion de ce milieu. La mise en place et l'évolution de la surveillance des eaux souterraines en France sont étroitement liées à l'évolution du contexte réglementaire. La première grande loi sur l'eau parue en décembre 1964 est à l'origine de la mise en place des premiers réseaux de suivi du niveau des nappes et de la qualité des eaux souterraines, qui évolueront dans le temps en application des réglementations successives. Néanmoins, ces réseaux ont une dimension régionale et visent à mieux connaître les comportements de grandes unités de gestion, constituées par les masses d'eau souterraine.

Actuellement, la mise en œuvre d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines à l'échelle des grandes villes de France reste très marginale. Ce sujet constitue pourtant la première étape d'élaboration des politiques de demain en matière de gestion des eaux souterraines et, plus largement, d'aménagement du sol et du sous-sol dans le contexte actuel de limitation de l'urbanisation. Un tel réseau doit constituer une aide pour toute la profession des sites et sols pollués et permettre de prévoir les aménagements en conséquence. Le développement d'un système d'information vise à mettre à disposition des acteurs locaux (bureaux d'études, collectivités, donneurs d'ordres, administrations…) des données sur la qualité des nappes d'eau souterraine, les sens d'écoulement, les battements de la nappe (remontées et vidange de la nappe) et de suivre l'évolution de ces aspects dans le temps et donc réajuster les conditions de gestion des eaux souterraines.

En 2020, la répartition des 80 259 ouvrages utilisés pour le suivi des eaux souterraines et bancarisés sous ADES (portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) est relativement homogène sur l'ensemble du territoire (France métropolitaine et Outre-mer). ADES comptabilise 7 356 piézomètres (Figure 1) dont 6 662 avec des mesures de niveau d'eau et 76 875 qualitomètres (Figure 2) dont 57 980 avec des analyses. Certains réseaux de suivi déclarés dans ADES sont adaptés à l'échelle des bassins hydrographiques et des masses d'eau. Ils ne sont pas assez denses (moins de 0,008 points/km²) pour la connaissance des eaux souterraines à l'échelle des agglomérations. D'autres réseaux sont mis en place à l'échelle d'un site (industriel, champ captant…). Bien que parfois très denses, ils ne sont pas suffisamment étendus car ils sont conçus pour répondre à une problématique très locale de prévention ou de suivi d'un nombre limité de paramètres.

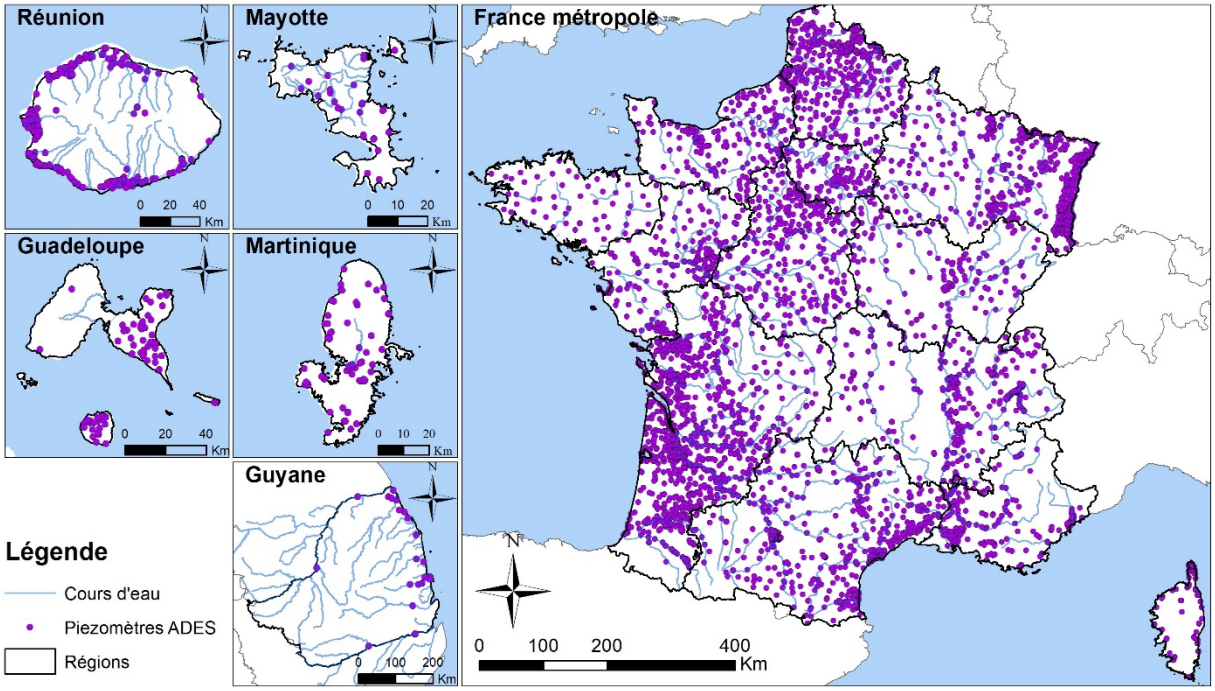


Figure 1 : Répartition des ouvrages déclarés comme piézomètres dans un réseau ADES (source : ADES, 2020)

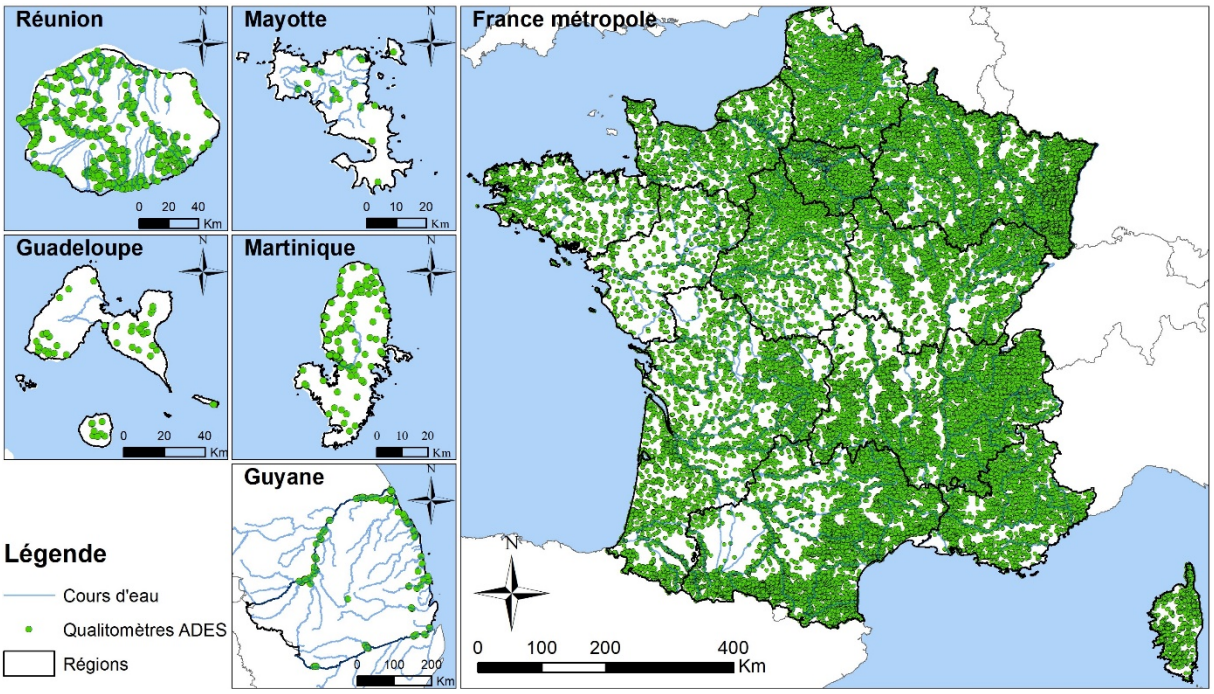


Figure 2 : Répartition des ouvrages déclarés comme qualitomètres dans un réseau ADES (source : ADES, 2020)

Paradoxalement, alors que les besoins sont importants, c'est au droit des zones urbaines que la connaissance des eaux souterraines est le plus souvent médiocre et parcellaire, au moins pour les aquifères les plus superficiels. Ceci s'explique notamment par le fait que les eaux souterraines ne sont généralement pas considérées dans ces secteurs comme une ressource qu'il faut préserver et exploiter au mieux, mais comme une contrainte technique (mauvaise qualité voire pollution des sols et des eaux souterraines, risque de remontée de nappe, potentiel de ré

infiltration, conflits d'usage du sous-sol, effets du rabattement sur des infrastructures, techniques constructives, …).

Afin d'acquérir des connaissances sur les eaux souterraines en milieu urbain, il est nécessaire d'obtenir une densité suffisante de points d'accès à cette ressource. Il serait alors pertinent d'avoir accès aux données disponibles sur d'autres ouvrages (puits, forages), non bancarisées aujourd'hui. De tels ouvrages existent, certains sont recensés dans la banque de données du sous-sol (BSS), mais les informations associées sont bien souvent lacunaires. Actuellement, à l'échelle du territoire national, près de 525 000 points d'eau sont référencés dans cette banque nationale règlementaire (selon le code minier).

1.2. OBJECTIFS ET ACTIONS DU PROJET

L'objectif principal du projet est de pouvoir élaborer un guide méthodologique, permettant à une agglomération de mettre en place un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines adapté à ses problématiques, de pérenniser ce réseau et de mettre à disposition des acteurs locaux les données acquises. Le programme d'actions s'est déroulé en trois parties, entre 2017 et 2020.

La première partie du projet propose un état des lieux en France et à l'international des guides méthodologiques et des réseaux de suivi des eaux souterraines mis en œuvre en milieu urbain. Le retour d'expérience permet de tirer des enseignements, notamment sur les méthodologies mises en œuvre, sur les différentes problématiques rencontrées et sur l'intérêt de la mise en place d'un réseau de suivi des eaux souterraines en milieu urbain.

La deuxième partie de l'étude concerne l'élaboration d'une méthodologie nationale pour la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines, adapté au milieu urbain compte tenu de ses spécificités.

L'objectif de la troisième partie est de tester la méthodologie sur le cas concret de l'agglomération de Lyon, sans pour autant réaliser une étude complète et définir un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines opérationnel. Les méthodes proposées dans le guide sont appliquées au cas concret, afin d'illustrer chaque phase de la méthodologie, de réaliser une analyse critique et de proposer des pistes de réflexion.

2. Eléments de contexte : interaction entre les eaux souterraines et le milieu urbain et risques associés

Dans le cadre du projet, des discussions ont été menées entre 2017 et 2020 avec plusieurs gestionnaires de réseaux de surveillance mis en place sur des agglomérations en Europe et aux Etats-Unis. Des contacts ont notamment été pris avec les seules agglomérations françaises ayant mis en œuvre une surveillance de la qualité des eaux souterraines à l'échelle de leur territoire (Strasbourg et Toulouse) et des entretiens ont été menés avec des métropoles potentiellement intéressées pour la mise en place d'un tel suivi (Lyon et d'Orléans). Ces discussions ont pu montrer que les spécificités des interactions entre les eaux souterraines et le milieu urbain étaient souvent mal appréhendées. Ce constat a été conforté par les recherches bibliographiques.

Le retour d'expérience a également montré que les objectifs potentiels concernant la mise en œuvre d'un réseau de suivi étaient multiples et souvent complémentaires. Cependant, les réseaux de surveillance existants ne poursuivent le plus souvent qu'un unique objectif. Ce fait est généralement la raison pour laquelle le réseau est parfois abandonné, faute de l'intérêt partagé de l'ensemble des acteurs du sol et du sous-sol.

Il semble donc primordial, au préalable, de définir les spécificités des interactions entre les eaux souterraines et le milieu urbain ainsi que les risques associés et de lister les différents objectifs poursuivis par un réseau de surveillance des eaux souterraines.

2.1. SPECIFICITES DES INTERACTIONS ENTRE LES EAUX SOUTERRAINES ET LE MILIEU URBAIN

Le territoire urbain présente plusieurs spécificités qui en font un milieu vulnérable et sensible où le besoin de suivi des eaux souterraines est accru :

- les sources de pollutions potentielles sont variées : industries, activités de services, entretiens des voiries, des parcs et des jardins, agriculture et potagers privés, pollutions historiques… ;
- le cycle de l'eau et les écoulements souterrains sont perturbés : prélèvements en eau pour divers usages, imperméabilisation des sols, drainage ou pompage pour la protection d'infrastructures souterraines (lignes de métros, parkings souterrains…), fuites de réseaux, canalisation des cours d'eau… ;
- les usages de l'eau sont nombreux et plus ou moins sensibles : eau potable, loisirs, industries, irrigation (agriculture, parcs publics, jardins et potagers privés…), nettoyage des voiries, géothermie, protection d'ouvrages souterrains et de chantiers…

Pour bien appréhender le contexte et satisfaire à l'objectif général de l'étude, l'hydrosystème du sous-sol urbain doit être considérer dans son ensemble. Les pressions sur la qualité, les écoulements et les niveaux des eaux souterraines peuvent être multiples et les impacts peuvent alors se combiner et se cumuler. De plus, afin d'être pertinent et pérenne, un réseau doit répondre à l'ensemble des problématiques d'une agglomération.

2.1.1. Altération de la qualité des eaux souterraines

La composition naturelle des eaux souterraines est appelée fond géochimique. Les substances naturelles sont acquises par l'eau souterraine lors de son transport et de son stockage dans les roches aquifères. Cet enrichissement chimique de l'eau dépend donc directement de la géologie d'un secteur géographique. La qualité naturelle des eaux souterraines peut être fortement altérée par l'apport de composés physico-chimiques et bactériologiques dû aux activités humaines.

L'urbanisation des grandes villes entraine une diversification des sources de pollutions ponctuelles ou diffuses, majoritairement d'origine anthropique. Trois activités majeures représentent les principales sources des pollutions diffuses et accidentelles en milieu souterrain : les pollutions liées au développement urbain et à la densification (davantage de rejet organique par les réseaux, risque d'infiltration de produits chimiques, d'huiles, de métaux lourds…), les pollutions liées aux industries et les pollutions induites par les activités d'extraction de ressources minérales (carrières). Les pollutions agricoles peuvent également participer à la dégradation des eaux si cette dernière est intense en périphérie de la zone urbaine. Selon Wolf et al. (2006), les sources de pollution les plus fréquentes sont les suivantes :

- infiltration des eaux de ruissellement comportant des métaux lourds et des micropolluants ;
- horticulture intensive en zone urbaine (parcs, jardins et potagers publics et privés) engendrant un lessivage de pesticides et de composés azotés ;
- existence de site de stockage/manipulation inadaptée et/ou mauvaise gestion des effluents, des déchets solides par les industries, les services publics ou la population ;
- infiltration des eaux usées, des eaux de ruissellement, lixiviation de déchets, par déversement accidentel ou par chroniques de produits et d'effluents…
- présence de polluants variés.

Les sources de pollution peuvent induire un effet cumulatif des polluants tant par leur variabilité que par leur nombre (densification des sources de pollutions). Ce constat implique des complications lors de la recherche de l'origine de pollution, de nombreuses sources étant possibles. De nombreux éléments présentés ci-après sont résumés du guide OPUSS relatif à la modélisation du transport de polluants dans les sols et sous-sol en milieu urbain (Le Guern C. et al., 2012).

Activités industrielles et de service

Les activités de stockage, de fabrication, de nettoyage, de refroidissement peuvent représenter des sources de pollution ponctuelles (exemple : déversement accidentel) ou chroniques (exemple : fuites ou rejet dans le milieu naturel). L'industrie ainsi que les anciennes décharges sont une source importante de polluants organiques et inorganiques très divers : hydrocarbures, métaux et métalloïdes, phénols, solvants chlorés, polychlorobiphényles, furanes et dioxines, BTEX, pesticides, etc. Les apports varient en fonction du type d'activité et des relations géographiques avec le milieu urbain. La proximité de sites industriels peut contribuer à l'accumulation de polluants dans les sols et les eaux du milieu urbain (Li et al., 2004).

Activités de transport

Les véhicules et les infrastructures liés au transport routier émettent gaz, fumées, particules et génèrent plusieurs types de pollutions :

- les pollutions chroniques, source majeure de polluants dans l'environnement urbain (abrasion et usures des pièces du véhicules, combustion des carburants, usages des huiles et graisses minérales, abrasion des chaussées) ;
- les pollutions accidentelles (renversement de citerne...) ;
- et les pollutions saisonnières (tourisme…).

Activités domestiques et assainissement

Les activités domestiques, comme l'entretien des habitations, du linge et des véhicules ainsi que le chauffage, génèrent différents polluants : substances tensio-actives, huiles de vidange, NAPL (Non Aqueous Phase Liquide) tels que les fuels, essences et gasoil.

Les réseaux et bassins de collecte des eaux usées et pluviales ainsi que l'assainissement individuel peuvent être fuyards ou dysfonctionner (débordement, traitement incomplet). Ils constituent alors des sources chroniques ou ponctuelles engendrant des concentrations élevées en certains éléments : matière organique, détergents, potassium, perturbateurs endocriniens et substances médicamenteuses. Trauth et Xanthopoulos (1997) soulignent l'importance de ces fuites au vu des résultats d'analyses des eaux souterraines en milieu urbain.

Activités d'entretien des espaces urbains

Les pesticides et principalement les désherbants (glyphosate, diuron, aminotriazole et sulfosate) sont utilisés pour l'entretien des espaces verts, des voiries, des cimetières par les communes, des voies ferrées et des autoroutes par leurs gestionnaires. D'autres composés, comme les phénols issus de la dégradation des pesticides des organophosphorés et des herbicides chlorophénoxyacides peuvent également être retrouvés dans les sols et les eaux (Lemière et al., 2008). Les émissions liées à l'entretien des jardins et potagers privés sont potentiellement importantes mais restent très difficiles à estimer.

D'autres opérations de maintenance des chaussées sont également génératrices de pollutions. Ainsi, l'entretien des voiries en hiver utilise des produits de déverglaçage (chlorure de sodium ou sables). Les sels amènent des chlorures, sodium, sulfates ainsi que diverses impuretés, dont des traces de métaux lourds notamment du plomb (3,3 mg/kg de NaCl) (Carsignol et Calovi, 2004).

Aménagements du sol et du sous-sol

Les matériaux utilisés pour l'aménagement du milieu urbain et la construction de bâtiments sont des sources de contamination, en relation avec la densité de population. Les principaux polluants issus de ces sources sont des composés organiques (hydrocarbures pétroliers, BTEX, PCB, HAP et solvants) et des éléments traces métalliques (cadmium, zinc, cuivre…).

D'une part, ces matériaux peuvent se retrouver en contact direct avec les sols et les eaux souterraines (fondations, parkings souterrains, tunnels…). Lorsque les conditions physico-chimiques sont favorables, les matériaux se dégradent et relarguent alors des polluants directement dans le milieu naturel.

D'autre part, le lessivage des surfaces du milieu urbain, toitures, parkings et chaussées, entraine le transport de charges polluantes. Tous ces polluants peuvent ensuite s'accumuler dans les sols et les eaux des zones urbaines. La pollution issue du ruissellement sur les toitures est liée d'une part à la dégradation des différents constituants du bâti et d'autre part à l'entraînement des matières sèches accumulées par retombées atmosphériques. D'après la bibliographie, les principaux polluants provenant du lessivage des toitures sont le zinc et le cuivre (Göbel et al., 2007).

Enfin, certains aménagements peuvent favoriser l'altération de la qualité des eaux souterraines. Par exemple, l'ouverture d'une carrière peut déséquilibrer la relation entre une formation géologique et le milieu naturel. Des travaux de réhabilitation peuvent être à l'origine d'une pollution, non pas du fait des travaux eux-mêmes, mais du fait de l'existence de déchets enfouis, qui étaient jusqu'alors protégés par une surface imperméable (ancien bâtiment, parking) et dont la lixiviation est rendue possible par la destruction de cette couche protectrice.

Anthropisation des sols

Les sols urbains sont fortement anthropisés par des apports successifs de sols extérieurs, de remblais ou de déchets de déconstruction comprenant du ciment, du béton, de la brique, des éléments structurels métalliques, du bois, des poussières… Ces ajouts contribuent à l'enrichissement des sols en place en déchets minéraux, organiques et chimiques, potentiellement toxiques et en divers résidus (Rosenbaum et al., 2003 ; Markiewicz-Patkowska et al., 2005). Le développement urbain s'accompagne également d'une imperméabilisation des sols, ceux-ci étant couverts par des bâtiments et des chaussées empêchant ou limitant l'infiltration des eaux.

L'anthropisation et imperméabilisation des sols entraînent un changement des propriétés physico-chimiques du milieu, perturbent fortement les fonctions naturelles des sols et impactent le transfert des polluants. Leurs effets des sols concernent principalement la cinétique des réactions chimiques, les échanges d'eau, de gaz, de particules et les échanges d'énergie entre les différents compartiments environnementaux (Scalenghe et Ajmone Marsan, 2009). Par exemple, les polluants s'accumulent sur les surfaces imperméables et sont lessivés lors d'évènement pluvieux (Hope et al., 2004). L'imperméabilisation et l'anthropisation influencent fortement le pH et la salinité des sols urbains (Conway, 2007), le taux de matière organique active et le fonctionnement des écosystèmes. Ces modifications peuvent alors modifier la capacité de filtration et de dégradation des sols pour certains polluants (Bhaduri et al., 2001 ; Gaffield et al., 2003). Enfin, l'apport de terrain plus perméable peut constituer une zone d'infiltration privilégiée pour des eaux potentiellement polluées.

2.1.2. **Modification de la température des eaux souterraines**

La température des eaux souterraines est influencée par les systèmes d'exploitation de leur énergie pour la production de chaleur (chauffage en hiver) ou de froid (climatisation en été) ainsi que par les infrastructures souterraines, réseaux d'eaux usées et drains. Les influences peuvent se faire directement lors de prélèvements et/ou rejets en nappe ou indirectement par interaction de la nappe avec une structure de température différente (Nicolas J. et al., 2019 ; Cerema, 2018a).

De nombreuses études mettent en évidence des températures des eaux souterraines plus élevées au droit des zones urbaines par rapport aux zones rurales. Ainsi la nappe des calcaires du Lutétien à Paris peut voir sa température augmenter de plusieurs degrés (jusqu'à 7°C) au droit de secteurs possédant une importante densité de réseaux tels que le chauffage urbain, les

installations géothermiques, les tunnels de métro et de RER… (Lamé A., 2013). Les villes de Cologne (Allemagne) et de Winnipeg (Canada) enregistrent des augmentations de plus de 5°C par rapport aux zones avoisinantes (Zhu, 2010).

La création de bulles thermiques peut créer une réelle concurrence entre les équipements et diminuer les performances de fonctionnement des dispositifs géothermiques. La température des eaux souterraines contrôle un certain nombre de processus bactériologiques et physico-chimiques (Nicolas J et al., 2019). Ainsi, une augmentation de la température peut permettre le développement de l'activité bactériologique et/ou provoquer des déséquilibres chimiques, par exemple une diminution de l'oxygène dissous favorisant la réduction d'éléments chimiques.

Pour de plus amples informations, le lecteur est invité à se reporter au rapport paru en 2019 concernant la mise en place d'un réseau de surveillance de la température (Nicolas J et al., 2019). La première partie réalise un retour d'expérience à l'international sur les objectifs d'une surveillance de la température des eaux souterraines.

2.1.3. Modification du cycle de l'eau

Les aménagements successifs du territoire urbain perturbent les caractéristiques intrinsèques du sol. L'urbanisation modifie fortement le cycle de l'eau (Figure 3) :

- les mécanismes de recharge sont bouleversés suite aux aménagements, à l'imperméabilisation et l'anthropisation des sols, limitant souvent l'infiltration naturelle des eaux de pluie. Dans certains cas, ce déficit est largement compensé par les fuites des réseaux d'eau potable et d'eau usée, l'arrosage des parcs et jardins (Parriaux et al., 2010 ; Foster S. et al., 2013) ;
- les exutoires naturels, constitués par les cours d'eau, sont étanchéifiés et les prélèvements et collecteurs (drains et réseau d'assainissement) constituent de nouvelles sorties.

La recharge des nappes est un paramètre à prendre en compte pour comprendre l'infiltration des pollutions en profondeur et donc pour définir la vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis d'un polluant. L'Annexe 1 fournit de plus amples informations sur les modifications de la recharge et sur les changements d'exutoires.

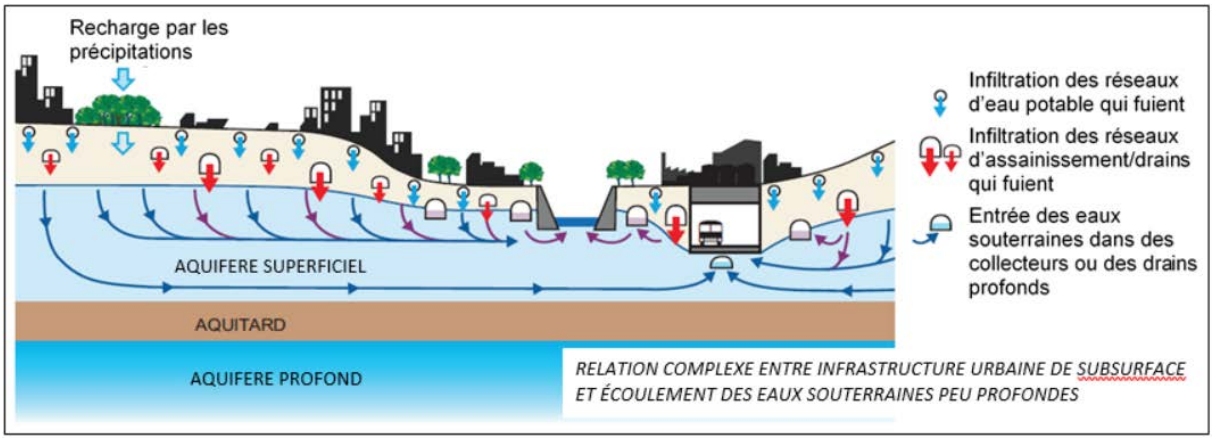


Figure 3 : Relation entre les infrastructures urbaines et la nappe superficielle (source : traduit de Foster S. et Tyson G., 2015)

2.1.4. Modification des régimes d'écoulement des eaux souterraines

Les eaux souterraines s'écoulent naturellement depuis les secteurs de recharge de la nappe (infiltration des eaux de pluie pour une nappe libre ou des eaux de la nappe sus-jacente pour une nappe captive) vers les exutoires (sources, cours d'eau et océans). Les écoulements sont naturellement influencés par le drainage des cours d'eau pour les nappes libres, par un changement des caractéristiques intrinsèques de la roche aquifère (perméabilité), par la présence d'accidents géologiques (failles)… Les écoulements naturels des eaux souterraines peuvent être fortement modifiés par les aménagements du sol et du sous-sol urbain de deux manières (Figure 4 – Attard G. et al., 2016) :

- la première en perturbant l'équilibre de masse du système d'écoulement régi par des conditions aux limites (Dirichlet, Neumann, Cauchy) ;
- la seconde en constituant un obstacle à l'écoulement naturel affectant les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

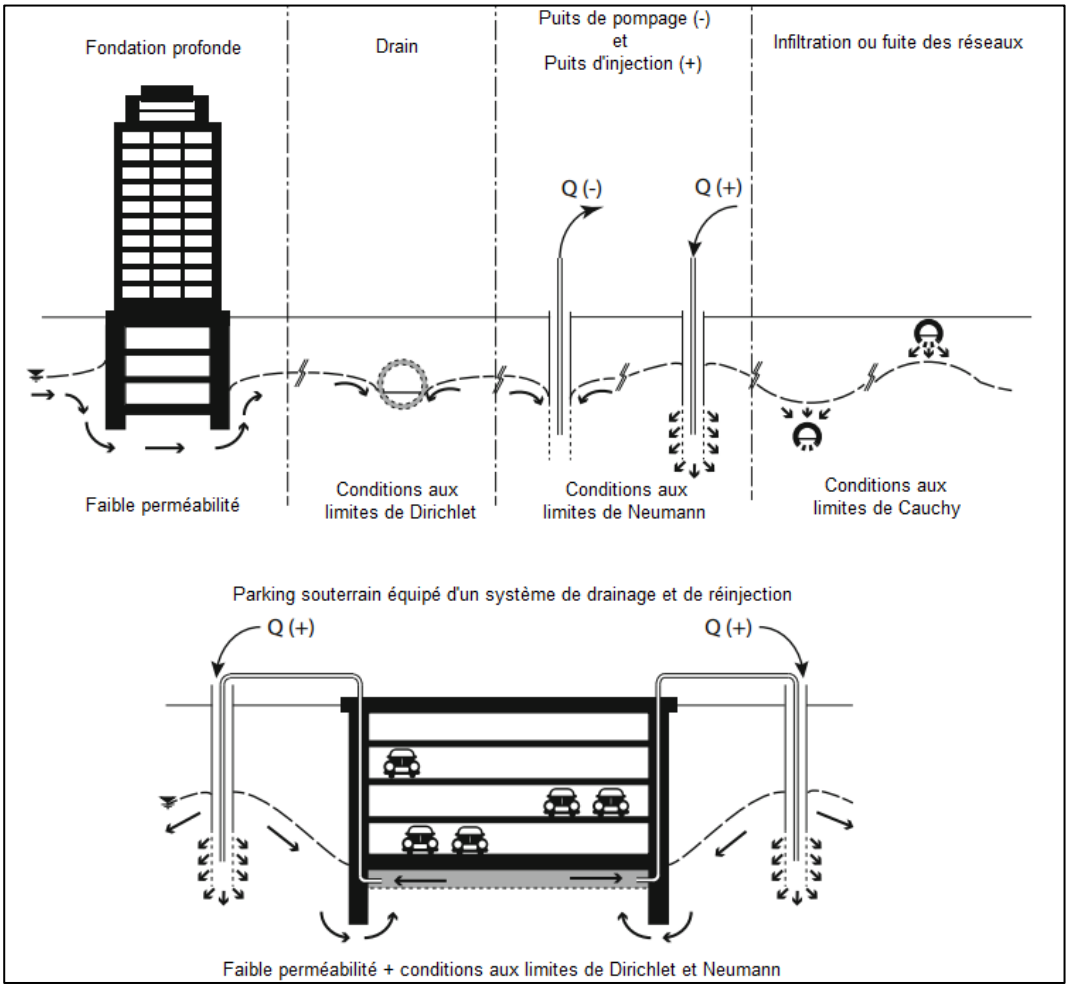


Figure 4 : Les structures urbaines et leurs impacts sur les niveaux piézométriques et les écoulements (traduit de Attard G. et al., 2016)

Les impacts des aménagements observés sur les écoulements des eaux souterraines sont, d'une part, individuels et ponctuels et, d'autre part, cumulatifs (par exemple, cas d'un parking souterrain équipé d'un système de rabattement des eaux souterraines pour éviter son inondation).

La perturbation des écoulements peut avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines, en mélangeant et déplaçant les masses d'eaux au sein d'une même nappe. Des composés flottants ou coulants peuvent être remis en suspension et des panaches de pollution ou un biseau salé peuvent être déplacés. L'impact des prélèvements et des ouvrages souterrains sur les écoulements et les mélanges des eaux souterraines restent difficilement quantifiables et dépend des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère ainsi que de la profondeur et des volumes prélevés et injectés ou de la section de la zone saturée de l'aquifère concernée par l'occupation de l'ouvrage (profondeur et largeur).

L'Annexe 1 détaille l'ensemble des modifications des régimes d'écoulement des eaux souterraines.

2.1.5. Modification des relations entre les masses d'eau et impacts sur la qualité des eaux souterraines

Deux aquifères distincts peuvent être naturellement en communication hydraulique en absence d'une couche géologique suffisamment épaisse et/ou imperméable les séparant. L'alimentation d'une nappe par une autre s'effectue alors de façon à équilibrer les charges hydrauliques : drainance ascendante si la pression au sein de l'aquifère profond est la plus élevée et drainance descendante dans le cas inverse. Deux aquifères peuvent également être hydrogéologiquement isolés, car séparés par une formation géologique suffisamment épaisse et imperméable pour empêcher ces phénomènes de drainance. Les relations entre deux aquifères peuvent changer au cours du temps et dans l'espace.

La modification des relations entre deux aquifères peut se faire par la destruction d'une partie ou de la totalité de la couche géologique imperméable les séparant ou par la modification des équilibres hydrauliques d'une des nappes.

Modification de la couche géologique imperméable par les aménagements souterrains

En recoupant la couche géologique imperméable séparant deux aquifères, les ouvrages souterrains et forages mal conçus ainsi que les excavations de chantiers et d'exploitation de géomatériaux favorisent le mélange entre masses d'eau au droit de la structure concernée (Cerema, 2018b). La densité importante d'infrastructures souterraines ponctuelles ou linéaires en milieu urbain crée de nombreux axes d'infiltration privilégiés entre la surface, la nappe superficielle et les nappes profondes. Les conséquences sont d'une part, la migration d'éventuels contaminants entre aquifères et d'autre part, l'augmentation de la vulnérabilité des aquifères profonds jusqu'alors protégés.

Dans le cas particulier de chantiers, la reconversion d'anciennes zones industrielles amène à remanier des terrains potentiellement impactés par des pollutions accidentelles ou historiques. La mise en communication de plusieurs aquifères par les excavations et constructions réalisées peut alors amener à la pollution des nappes profondes.

Modification des équilibres hydrauliques par pompages ou rejets

Les prélèvements, drainages et rejets en nappe baissent ou augmentent les niveaux des eaux souterraines et donc les charges hydrauliques. Les équilibres hydrauliques étant bouleversés, les relations entre aquifères et avec les masses d'eau superficielles (cours d'eau, plan d'eau, mer et océan) peuvent s'en retrouver modifiées. Les drainances entre aquifères et les sens

d'écoulement avec les eaux superficielles peuvent alors s'inverser. Par exemple, des eaux polluées peuvent être drainées vers une nappe exploitée par pompage depuis un cours d'eau ou depuis l'aquifère sus-jacents. Ces problématiques sont souvent directement induites par une mauvaise gestion quantitative (surexploitation) des eaux souterraines ayant des répercussions sur la qualité de l'eau.

2.2. RISQUES ASSOCIES AUX INTERACTIONS ENTRE EAUX SOUTERRAINES ET LE MILIEU URBAIN

Les modifications engendrées par le milieu urbain sur la qualité, la température, les niveaux et les écoulements des eaux souterraines peuvent présenter des risques et des nuisances pour les humains, l'environnement et les infrastructures urbaines.

2.2.1. Risques associés à la qualité des eaux souterraines

Le polluant a pour définition la plus souvent retenue : un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général.

La qualité des eaux souterraines est souvent dégradée en milieu urbain par l'apport de composés physico-chimiques et bactériologiques dû aux activités et aménagements anthropiques. L'impact de l'activité géothermique sur la qualité des eaux n'a pas pu être clairement définie mais on peut envisager qu'une hausse des températures de la nappe pourrait entrainer un développement accru de l'activité des micro-organismes. La mauvaise qualité des eaux souterraines comporte alors des risques pour l'environnement et pour la santé humaine.

Les eaux souterraines sont souvent en relation étroite avec les milieux terrestres (cours d'eau, zones humides). Une dégradation de la qualité des eaux souterraines peut alors avoir des conséquences sur la qualité des eaux de surface qu'elles alimentent et donc sur la faune et la flore associées à ces milieux.

Les polluants représentent un risque de danger pour la santé publique à des degrés variables allant de douleurs abdominales, des cancers, des déformations et, dans les cas d'expositions sévères, à la mort. L'exposition directe à une eau polluée peut se faire par contact cutané, par ingestion et par inhalation de particules (par exemple lors de l'arrosage d'un jardin ou à proximité du rejet d'un pompage de chantier). L'exposition indirecte est rendue possible par consommation de cultures irriguées (potagers), d'animaux abreuvés par une eau polluée ainsi que par la remontée des composés volatils à l'intérieur des bâtiments.

2.2.2. Risques associés aux niveaux des eaux souterraines

Baisse des niveaux

Une exploitation intensive de la nappe s'accompagne d'une baisse des niveaux qui peut être importante, jusqu'à plusieurs dizaines de mètres (Figure 5 - Parriaux A. et al., 2010).

Les conséquences d'une surexploitation sont visibles rapidement sur l'environnement : assèchement ou baisse des niveaux des sources, des milieux humides et des cours d'eau alimentés en partie ou totalement par les eaux souterraines. La faune et la flore de ces milieux terrestres peuvent alors souffrir voire disparaitre. Ces effets s'observent notamment en saison

sèche, lorsque l'alimentation de la nappe peut représenter la quasi-totalité des débits des eaux superficielles. L'augmentation des volumes prélevés provoque également une diminution des volumes d'eau disponibles et peut être à l'origine de conflits d'usage.

La baisse des niveaux peut dénoyer des canalisations et ainsi favoriser l'infiltration gravitaire des fuites des réseaux d'eaux usées et pluviales vers la nappe. Ces eaux potentiellement polluées engendrent une dégradation progressive de la ressource en eau. Comme indiqué précédemment, une mauvaise qualité des eaux souterraines présente un risque pour la santé humaine et l'environnement.

Enfin, le retrait des eaux souterraines peut engendrer des phénomènes de tassements différentiels des remblais, de déstabilisation et effondrement de vides souterrains précédemment ennoyés (mines, carrières, anciens tunnels…), de retrait d'argiles gonflantes, de compaction des sols et d'altération de leurs propriétés géotechniques. Des désordres peuvent alors s'observer en surface sur le bâti et les réseaux routiers et ferroviaires (fissuration et effondrement…) ainsi que sur les ouvrages souterrains (rupture de canalisation, déstabilisation de fondations…) comme à Mexico (Mexique), à Bangkok (Thaïlande) et à Boston (Etats-Unis). Le risque de subsidence lié à une surexploitation de la nappe est une menace particulièrement sérieuse dans le cas d'aquifère à grains fins, non consolidés, silteux et argileux. Le cas de subsidence le plus emblématique est celui de la ville de Mexico. Cette agglomération dépend à plus de 70% de la nappe superficielle. Le niveau de son aquifère diminue chaque année de 1 mètre et la surexploitation a causé un tassement des terrains atteignant jusqu'à 10 cm/an dans certains secteurs (Castellazzi et al., 2016). Cette compaction des sols a engendré des effondrements en surface ainsi que des dommages sur les bâtiments de l'époque coloniale, les voies ferrées et les réseaux d'eau potable et de collecte des eaux usées.

Remontée de nappe et inondation

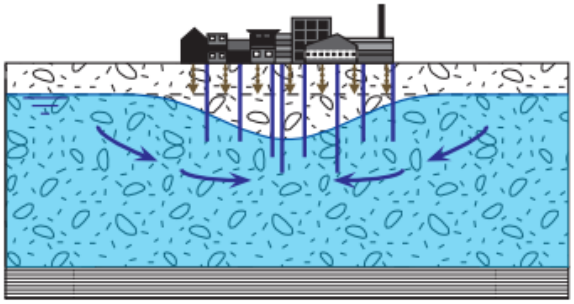
En début de leur développement, les villes ont exploité de façon anarchique les eaux souterraines notamment pour leurs besoins en eau potable et industriels (Figure 5 - Parriaux A. et al., 2010). Suite à la surexploitation et à la pollution de la nappe superficielle ainsi qu'à la migration des industries en périphérie, les prélèvements ont été transférés à l'extérieur des agglomérations. L'arrêt soudain des prélèvements au droit de secteurs anciennement surexploités, et notamment en centre-ville, ont pu conduire à une remontée des eaux. Ce phénomène de rebond phréatique a été observé à Barcelone (Vazquez-Sune E. et al., 2005 ; Vazquez-Sune E. et al., 1997), Londres (Lerner D.N. et Barrett M.H., 1996 ; Mavroulidou M. et Woods R.I., 1997) et Milan (Bonomi T. et Ellis B., 1999), avec des variations piézométriques de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.

Le phénomène de « rebond phréatique » et plus largement d'inondation par remontée de nappe s'explique également par le fait que les villes sont fréquemment construites en zones alluviales ou côtières, où les eaux souterraines sont très peu profondes. D'autre part, l'aménagement du sous-sol a amené à la création de nombreuses barrières hydrauliques favorisant les remontées des eaux souterraines. Enfin, l'augmentation de la recharge du fait de fuites des réseaux et de la sur-irrigation des parcs et jardins ont également pour conséquence une hausse des niveaux.

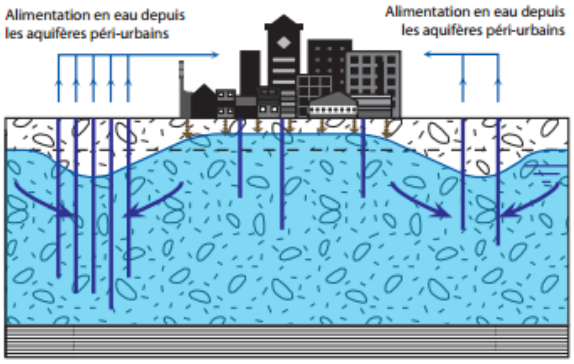
Le risque de remontée de nappe peut avoir de sévères conséquences sur les infrastructures urbaines. Avant même d'arriver à un stade d'inondation, l'augmentation des niveaux peut amener à un endommagement des infrastructures souterraines : inondation des sous-sols, corrosion des ouvrages souterrains, remontées de cuves enterrées ou semi-enterrés ainsi que de piscines voire de canalisations, infiltration d'eaux parasites dans les collecteurs d'eaux usées et pluviales engendrant une dilution et des surcoûts de traitement en station d'épuration, dysfonctionnement

des réseaux d'électricité enterrés, etc. Des désordres peuvent également s'observer en surface sur le bâti et sur les réseaux routiers et ferroviaires, du fait d'un tassement différentiel des remblais, de la corrosion des fondations, de la déstabilisation et de l'effondrement de vides souterrains (carrières, souterrains, caves, tunnels…).

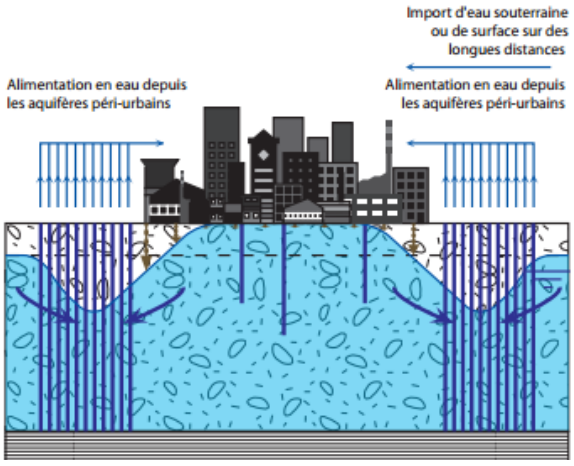
Les remontées de nappe peuvent également avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines. Lors d'une inondation, les eaux lessivent les surfaces urbaines et entrainent des particules. Elles remobilisent d'éventuelles pollutions accidentelles ou historiques contenues dans les sols. Enfin, elles peuvent également envahir des décharges, des stations d'épuration, des bassins de collectes d'eaux usées et des fosses septiques. Elles dispersent et transportent alors les déchets et les pollutions dissoutes.



(a) Le village devient une ville
-Augmentation de la demande en eau des ménages et des industries.
-Baisse de la nappe phréatique, les puits sont construits plus profonds.
-Les eaux usées et de ruissellement s'infiltrent dans le sous-sol.
-Les nappes superficielles dans les centres des villes deviennent polluées.
-La subsidence peut se produire si les aquifères sont peu consolidés.



(b) La ville s'étend
-Les aquifères sous la ville sont abandonnés en raison de la pollution, pour lutter contre la subsidence ou parce que la demande a diminué avec la migration des industries vers la périphérie.
-Au centre, les eaux souterraines remontent en raison de la réduction des pompages et de l'augmentation de la recharge.
-Les eaux souterraines sont importées de la périphérie, le niveau des aquifères baisse en périphérie.
-La modification des gradients hydrauliques produit une circulation des eaux polluées du centre ville vers la périphérie.



(c) La ville s'étend plus loin
-La pression sur les aquifères péri-urbains augmente, la qualité de l'eau baisse en raison de la pollution urbaine.
-Pour répondre à l'ensemble des besoins, l'eau doit être importée sur des distances plus longues, entrainant une augmentation des coûts.
-La nappe phréatique monte au centre de la ville, innondant les infrastructures de sub-surface.
-Les possibilités d'infiltration des eaux pluviales sont réduites.
-Les réseaux d'eaux pluviales sont parasités par les eaux souterraines.

Figure 5 : Evolution des niveaux de la nappe superficielle en lien avec la croissance urbaine. Phénomène de rebond phréatique (Source : Parriaux A. et al., 2010)

3. Retour d'expérience en France et à l'international

La première partie de l'étude propose un état des lieux en France et à l'international sur les guides méthodologiques et sur les réseaux de suivi des eaux souterraines mis en œuvre en milieu urbain.

Les recherches bibliographiques ont été menées en 2017 et 2018. Certains gestionnaires de réseaux de surveillance mis en place sur des agglomérations en France, en Europe et aux Etats-Unis ont été contactés afin d'obtenir des informations détaillées sur leurs méthodologies et les points bloquants rencontrés. Les retours expériences permettent de tirer des enseignements intéressants afin de définir une méthodologie complète.

3.1. GUIDES METHODOLOGIQUES EXISTANTS

Les recherches bibliographiques mettent en évidence l'absence d'état de l'art sur la conception de réseaux de surveillance en milieu urbain.

3.1.1. Guides méthodologiques et documents d'orientation

Des guides méthodologiques ont été rédigés en France et à l'international pour un objectif de connaissance générale des eaux souterraines ou pour un objectif de surveillance spécifique des eaux souterraines pour certains usages (eau potable, gestion des sites et sols pollués). Les méthodologies proposées ne répondent pas aux spécificités du milieu urbain, en terme de densité, de localisation des points de suivis et de paramètres à analyser. En effet, elles s'appliquent pour la mise en œuvre de réseaux soit étendus et peu denses, soit très localisés et destinés à des analyses ciblées permettant de vérifier le respect à des normes définies.

La Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE du 23 octobre 2000 définit un cadre législatif pour la gestion et la protection des eaux. Des documents d'orientation pour la surveillance de l'état quantitatif ou qualitatif des eaux souterraines ont été réalisés afin de répondre aux objectifs de la Directive Cadre sur l'Eau (European Commission, 2007). Les réseaux de surveillance doivent être représentatifs de l'état des eaux souterraines à l'échelle d'unités de gestion appelées masses d'eau. Cette échelle n'est cependant pas adaptée au milieu urbain : les réseaux mis en place ne sont pas suffisamment denses et les analyses ne sont pas assez complètes et ajustées aux spécificités locales pour répondre aux multiples problématiques des villes.

En France, les premiers réseaux de surveillance de la qualité des eaux souterraines ont été mis en place dès 1970 pour répondre à des problématiques d'usage, d'impact ou encore de connaissance générale. Les réseaux qualité DCE se sont construits à dire d'experts, sans méthodologie particulière, en favorisant les réseaux existants. Le choix d'ouvrages repose sur des critères scientifiques mais aussi pratiques (accès au point, longueur des chroniques existantes, pérennité du suivi). Une méthodologie nationale a été élaborée en 2013, afin de préparer la révision des programmes de surveillance et de vérifier la représentativité des points de suivi (Auterives C et al., 2013). Cette méthodologie consiste à évaluer les caractéristiques hydrogéologiques et les contextes de pression à l'échelle de la masse d'eau souterraine. Chaque état, comportement, hétérogénéité ou spécificité doit être représenté par un ouvrage de suivi. Des coefficients de pondération peuvent également être associés à certains critères pour marquer l'importance du suivi de certains secteurs, de certains comportements, de certaines spécificités… Cette méthode est simple et s'adapte à tous les types d'aquifères mais elle

nécessite une interprétation et une expertise fine et n'est donc pas automatisable. Enfin, les campagnes d'analyses (fréquence et paramètres) sont fixées par la réglementation européenne et française : seules 41 substances sont contrôlées, dont 8 substances dites dangereuses et 33 dites prioritaires.

Dans le cadre de la gestion des sites et sols potentiellement pollués, un guide méthodologique a été édité en France pour la surveillance de la qualité des eaux souterraines (Ministère en charge de l'environnement, 2019). Ces réseaux sont conçus pour répondre à une problématique de prévention ou de suivi d'une pollution. L'échelle est alors limitée au droit et à l'aval d'un site industriel voire à l'extension d'un panache de pollution. Les paramètres à analyser sont définis en fonction des substances utilisées actuellement et historiquement sur le site industriel. La méthodologie fournit toutefois des orientations intéressantes sur les caractéristiques des ouvrages de surveillance à prendre en compte selon le comportement des polluants, sur le choix des substances et paramètres à suivre et sur la fréquence des campagnes d'analyses.

A l'international, des guides techniques ont également été rédigés pour la mise en place de réseaux de suivi qualitatif et quantitatif des eaux souterraines. Ils présentent des méthodes très concrètes de surveillance des eaux souterraines à des échelles nationales, régionales ou localisées (sites) ou pour un objectif ciblé (par exemple : protection des captages d'eau potable, reconversion de friches industrielles). Certains de ces documents s'avèrent instructifs même si les méthodologies ne sont pas entièrement applicables au milieu urbain, à titre d'exemple :

- aux États-Unis, deux guides développent des recommandations pour créer et gérer des réseaux de surveillance qualitatifs et quantitatifs des eaux souterraines à l'échelle nationale (NGWMN, 2013 ; Taylor C.J. and Alley W.M., 2001) ;
- un guide en Australie fournit des recommandations pour les surveillances des eaux souterraines et de surface, afin d'améliorer les stratégies foncières et les plans de gestion des eaux en milieu urbain (Government of Western Australia, Department of Water, 2012) ;
- un guide, réalisé dans le cadre de l'IHP (international hydrological programme - UNESCO), fait un bilan des stratégies de surveillance de la qualité des eaux souterraines à l'international, souligne la nécessité de surveiller la ressource et présente des techniques existantes ainsi que des moyens pour valoriser les données (Figure 6 - Vrba J. et Adams B., 2008).

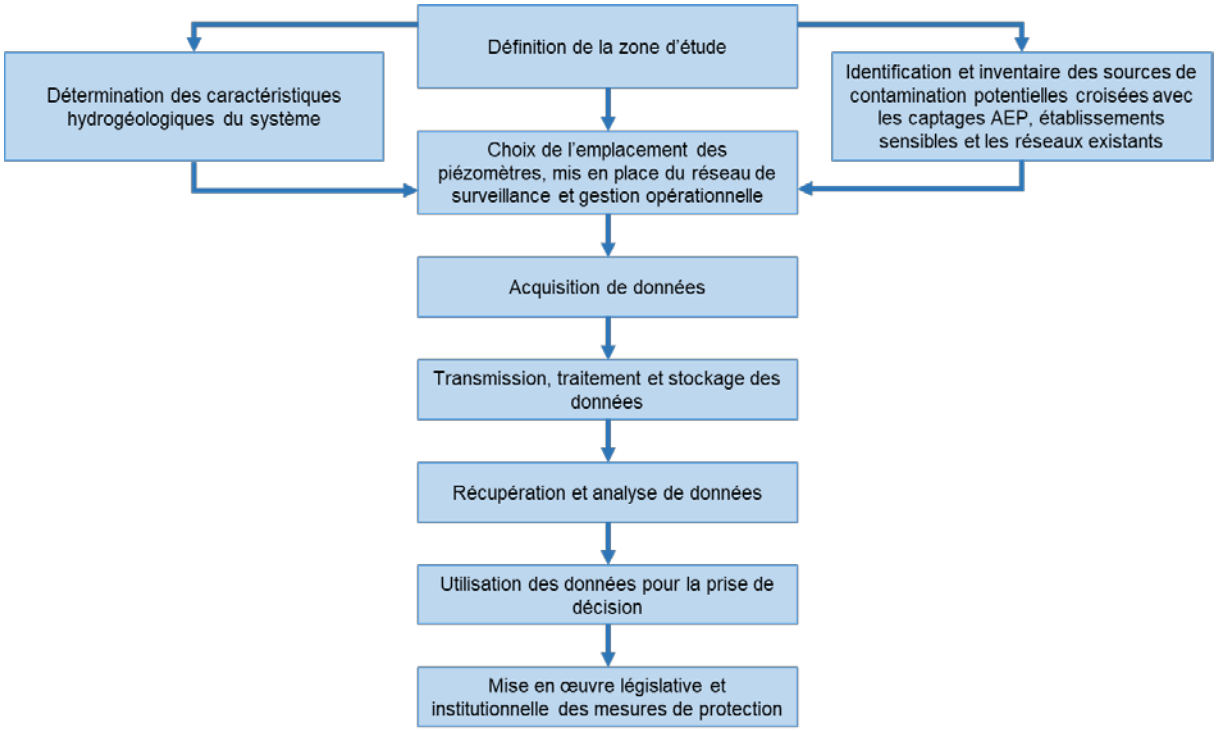


Figure 6 : Schéma simplifié de la méthodologie mise en œuvre pour le développement d'un réseau de surveillance (d'après Vrba J. et Adams B., 2008 et Vrba J. and Sobisek P, 1988)

3.1.2. Approche intégrée des eaux souterraines dans le milieu urbain

La gestion des eaux souterraines est encore trop peu intégrée dans les stratégies de développement et de gestion du milieu urbain (Foster S et al., 2013). Cependant, les eaux souterraines sont parfois abordées dans des approches intégrées à l'ensemble du milieu urbain. Bien que ne traitant pas des réseaux de surveillance et uniquement des eaux souterraines, le retour d'expérience de ces études est parfois instructif notamment pour comprendre les multiples problématiques environnementales, sociétales et politiques d'une grande ville.

En milieu urbain, les eaux souterraines sont le plus fréquemment considérées comme une contrainte lors des processus décisionnels définissant les orientations de développement des villes. La prise en compte des eaux souterraines dans la gestion de l'espace urbain a commencé à émerger dans les années 1980 lorsque des problèmes de remontées de nappes (rebond phréatique) ont été constatés dans plusieurs grandes villes. De plus, le développement des villes se fait aujourd'hui verticalement, visant à une optimisation de l'espace par densification. Les sous-sols des villes sont donc très sollicités (sous-sol de bâtiments, fondations, tunnels, parkings, géothermie…) et la présence des eaux souterraines a des répercussions sur les choix des aménagements et des techniques de constructions. La modélisation numérique déterministe est présentée comme l'outil indispensable pour une gestion durable des eaux souterraines en milieu urbain (Attard G. et al., 2016).

Les eaux souterraines sont considérées positivement, comme une ressource à utiliser et à protéger dans le cadre d'une politique de gestion de l'eau potable. Elles sont alors un élément indispensable au développement des grandes villes car elles représentent la part dominante de l'alimentation en eau potable (Foster S. et Tyson G., 2015). Une meilleure gestion des aquifères s'appuie sur des études hydrogéologiques portant sur la définition et la cartographie d'un état naturel qualitatif et quantitatif (niveaux et écoulements) de l'hydrosystème, de la vulnérabilité de

la nappe, des pressions exercées et des éventuelles impacts constatés sur la nappe (qualité, écoulements, niveaux). Les captages d'eau potable actuels ou prévus sont aujourd'hui implantés à l'extérieur des villes et ces études et les réseaux de surveillance associés ne s'étendent pas aux zones urbaines denses.

Le projet suisse Deep-City propose une nouvelle vision des eaux souterraines. Ce projet considère que le sous-sol recèle un potentiel pour une gestion durable des villes, en offrant quatre ressources centrales : l'espace, l'énergie géothermique, les géomatériaux et les eaux souterraines. Dans cette dynamique précise, la méthodologie élaborée permet d'exploiter les ressources du sous-sol sans compromettre un développement urbain durable, en intégrant des approches politiques, économiques et sociologiques. L'étude souligne le fait que les ressources du sous-sol sont trop méconnues pour être gérer durablement et que l'amélioration de la connaissance ainsi que la diffusion des informations sur les ressources du sous-sol sont indispensables. La problématique des ressources du sous-sol doit être traitée à l'échelle globale de la ville, par la mise en place d'une politique de promotion et de préservation des ressources du sous-sol. Les projets d'aménagement urbains doivent s'adapter dès l'étape du diagnostic aux ressources du sous-sol et aux enjeux de développement du souterrain. Les ressources du sous-sol, dont les eaux souterraines, ne sont alors plus considérées comme une contrainte à intégrer pour répondre à un projet d'aménagement mais comme une opportunité à utiliser et à promouvoir pour le développement et la densification de la ville.

3.2. RESEAUX DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES EXISTANTS EN MILIEU URBAIN

Afin d'effectuer un retour d'expérience représentatif de l'existant, une présentation de plusieurs réseaux de surveillance a été réalisée sous forme de fiches synthétiques de 2 pages (Annexe 2), classées par pays et par ville, de manière à :

- comprendre le contexte de la mise en place du réseau de surveillance, les problématiques rencontrées par la ville et les objectifs du réseau ;
- expliquer la méthodologie mise en œuvre concernant les données utilisées, le choix des points de surveillance (création ou utilisation d'ouvrages existants, densité et répartition des points), les campagnes de mesures (fréquence d'échantillonnage et choix des analyses), les politiques de gestion des eaux souterraines ;
- analyser les problèmes et points sensibles rencontrés (accessibilité des sites, critique de la qualité des mesures, méthode de gestion…) ainsi que les aspects positifs et recommandations des différents porteurs de projets ;
- lister les références bibliographiques relatives à la mise en place du réseau de surveillance et aux différentes études exploitant ses résultats.

Les caractéristiques principales des réseaux de surveillance mis en place par de grandes agglomérations sont résumées dans un tableau (Tableau 1). Dans le texte, lorsque la ville et le pays sont indiqués, le lecteur est invité à se reporter à la description complète du réseau en Annexe 2 pour connaître les références bibliographiques.

Pays	Ville	Type de réseau	Objectif de la surveillance	Nombre d'ouvrages	Surface (km^2)	Densité ($nbre/km^2$)	Aquifères concernés	Période de suivi	Remarques
Europe									
France	**Lyon**	Prévention et alerte	Quantité (Inondation)	29 piézomètres	48	0,60	Alluvions et alluvions fluvioglaciaires	2006 - en cours	+ Réalisation d'un modèle hydrodynamique intégrant les ouvrages souterrains (drains, barrières hydrauliques, prélèvements et rejets) + Validation du réseau de surveillance (quantité) par comparaison avec les modélisations
France	**Est Lyonnais**	Connaissance et surveillance générale	Quantité (Gestion) et Qualité (Pollution)	26 qualitomètres 24 piézomètres	400	0,07 0,06	Alluvions, alluvions fluvioglaciaires et molasse du Miocène (nappe profonde)	2005 - en cours	+ Réseau qualité et quantité représentatif des écoulements souterrains, des pressions anthropiques et des secteurs pollués connus + Optimisation, adaptation et renforcement du réseau suite aux résultats d'une première campagne puis ponctuellement (bilan) + 4 campagnes annuelles (mars, juin, septembre et décembre) avec bilan ponctuel sur la qualité et la quantité (évolutions et état des lieux)
France	**Paris**	Connaissance	Quantité (Gestion)	669 piézomètres	207	3,24 (total) 1,48 - 1,16 - 1,42 - 0,51 - 0,37 par nappe	Aquifère multicouche (6) : alluvions - sables et calcaires du Bartonien - calcaires du Lutétien - sables de l'Yprésien - craie	2010	+ Réalisation d'une modélisation hydrogéologique des aquifères, afin de rendre compte des impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains - Absence d'un unique réseau (compilation des données de plusieurs organismes pour une étude ponctuelle)
France	**Strasbourg**	Surveillance spécifique et investigation	Qualité (Pollution) et Température (Géothermie)	196 qualitomètres 75 température	338	0,58 0,22	Alluvions	1997 - 2016	+ Création d'un Observatoire de la Nappe Alluviale (ONAP), pilotant les programmes d'actions selon les problématiques remontées par les partenaires + Evolution du réseau de surveillance selon les actions programmées - Arrêt en 2016 (financement)
France	**Toulouse**	Connaissance	Quantité (Gestion) et Qualité (Pollution)	27 qualitomètres 101 piézomètres	118	0,23 0,86	Alluvions	2007 - 2008	
Allemagne	**Berlin**	Connaissance et surveillance générale	Quantité (Gestion) et Qualité (Pollution, Intrusion saline)	250 qualitomètres 1020 piézomètres	892	0,28 1,14 (0,84 nappe sup)	Aquifère multicouche (5) : alluvions fluvioglaciaires et sables du Tertiaire	1995 - en cours	+ Répartition des points de mesures selon les conditions hydrogéologiques et les pressions anthropiques (définition de secteurs hydrogéologiques)
Allemagne	**Cologne**	Connaissance et surveillance générale	Qualité (Pollution)	270 qualitomètres 650 piézomètres	405	0,50 1,60	Alluvions tertiaires et quaternaires du Rhin	? - en cours	
Allemagne	**Hambourg**	Connaissance et surveillance générale	Quantité (Gestion) et Qualité (Pollution, Intrusion saline)	167 qualitomètres 646 piézomètres	750	0,22 (0,13 - 0,09) 0,86 (0,72 - 0,15)	Aquifère multicouche (2) : alluvions quaternaires et aquifère du Tertiaire	? - en cours	+ Optimisation du réseau à partir de plus de 4 000 ouvrages existants appartenant à de nombreux propriétaires + Nombreuses valorisations des résultats (modèle hydrogéologique, cartes...) + Diffusion des données sur internet : espace cartographique
Allemagne	**Hanovre**	Connaissance et surveillance générale	Qualité (Pollution)	73 qualitomètres	204	0,36	Aquifère multicouche	2003 - en cours	+ Réalisation d'analyses sur la faune des eaux souterraines
Espagne	**Barcelone**	Connaissance, surveillance générale et investigation	Quantité (Gestion, Inondation) et Qualité (Pollution, Intrusion saline)	30 qualitomètres et piézomètres	100	0,30	Alluvions et formations quaternaires	1988 - en cours	+ Utilisation des ouvrages pour de nombreuses études : remontée de nappe, sécheresse, biseau salé, estimation des zones de recharge et pollution par les fuites de réseaux, campagnes exceptionnelles d'analyses (drogues et métabolites)
Espagne	**Saragosse**	Connaissance	Température (Géothermie)	47 température	35	1,34	Alluvions	2011 - 2013	
Hongrie	**Szeged**	Connaissance	Quantité (Gestion) et Qualité (Pollution)	28 qualitomètres 30 piézomètres	281	0,10 0,11	Alluvions	1975/1984 - en cours	

Pays	Ville	Type de réseau	Objectif de la surveillance	Nombre d'ouvrages	Surface (km^2)	Densité ($nbre/km^2$)	Aquifères concernés	Période de suivi	Remarques
Europe (suite)									
Italie	**Milan**	Prévention et alerte	Quantité (Gestion et Inondation)	32 piézomètres	182	0,18	Aquifère multicouche (2) : alluvions quaternaires	1975 - en cours	+ Réalisation d'une modélisation hydrogéologique des aquifères : impacts des aménagements du sous-sol sur les remontées des niveaux
Roumanie	**Bucarest**	Connaissance	Quantité (Inondation)	140 piézomètres	228	0,61	Aquifère multicouche (2) : formations quaternaires	? - en cours	+ Réalisation d'une modélisation hydrogéologique, intégrant les aménagements du sous-sol et les interactions entre les collecteurs d'eaux usées et les eaux souterraines
Royaume-Uni	**Doncaster**	Investigation	Qualité (Pollution)	3 qualitomètres (x 6 profondeurs)	6,3	0,48	Grès	2003 - ?	+ Piézomètres multiniveaux, permettant des prélèvement à 6 profondeurs différentes
Royaume-Uni	**Glasgow**	Connaissance et surveillance générale	Quantité (Gestion)	15 qualitomètres	8,4	1,79	Alluvions et sédiments d'origine marine	2010 - en cours	- Réseau en cours de construction
Royaume-Uni	**Londres**	Surveillance spécifique	Quantité (Subsidence)	200 piézomètres	1572	0,13	Craie (nappe captive)	1993 - en cours	
Slovénie	**Ljubljana**	Prévention et alerte	Qualité (Pollution)	29 qualitomètres et piézomètres	180	0,16	Alluvions	2004 - en cours	
Suède	**Göteborg**	Surveillance spécifique	Quantité (Subsidence)	140 piézomètres	204	0,69 (total) 0,04 - 0,61 - 0,02	Aquifère multicouche (3) : remblais, sables (nappe captive) et gneiss	1970 - en cours	
Amérique du Nord									
Etats-Unis Californie	**Fremont, Newark, Union City et Hayward**	Surveillance spécifique	Qualité (Intrusion saline)	285 qualitomètres et piézomètres	272	1,05 (total) 0,41 - 0,35 - 0,12	Aquifère multicouche (3) : sables et graviers, séparés par des niveaux argileux	1961 - en cours	- Analyses uniquement sur les chlorures et TDS (biseau salé)
Etats-Unis Massachusetts	**Boston**	Prévention et alerte	Quantité (Subsidence)	811 piézomètres	15	54,07	Sédiments (argiles marines, sables et limons)	1986 - en cours	+ Financement (risque important sur le bâti avec coût conséquent) + Densité importante de piézomètre + Pérennité des piézomètres forés sur le domaine public + Communication auprès du public
Etats-Unis Tennessee	**Memphis**	Surveillance générale	Qualité (Pollution)	31 qualitomètres	113	0,27	Sables grossiers et graviers du Pléistocène au Pliocène	1996 - 2009	
Amérique du Sud									
Argentine	**Córdoba**	Surveillance générale	Qualité (Pollution)	100 qualitomètres	576	0,17	Sables limoneux quaternaires	-	+ Multiples problématiques + Méthodologie se basant sur une carte de risque à la pollution des eaux souterraines - Réseau non opérationnel (recommandations pour sa conception)
Argentine	**Mar del Plata**	Investigation	Qualité (Pollution)	50 qualitomètres 59 qualitomètres	175 66	0,29 0,90	Aquifère multicouche : limon et de sable silteux du Quaternaire et Tertiaire	1998 + 2008 - ?	- Réseau mis en place sur la zone suburbaine d'une ville en développement
Brésil	**Recife**	Surveillance spécifique	Qualité (Intrusion saline)	67 piézomètres 31 conductivité	53 (45 nord + 8 sud)	1,26 (0,89 + 3,38) 0,58 (0,24 + 2,50)	Aquifère multicouche (2) : sédiments fluviomarins	1999 - 2014	Deux secteurs suivis : au nord sur 45 km^2 (40 piézométrie et 11 conductivité) et au sud sur 8 km^2 (27 piézométrie et 20 conductivité)
Asie									
Corée-du-Sud	**Séoul**	Connaissance et surveillance générale	Quantité (Gestion) et Qualité (Pollution)	180 qualitomètres et piézomètres	391	0,46	Alluvions et socle fracturé (granite, schiste, gneiss)	1997 - en cours	+ Multiples problématiques
Thaïlande	**Bangkok**	Investigation	Quantité (Subsidence) et Qualité (Pollution)	103 qualitomètres 285 piézomètres	1280	0,08 0,22	Aquifères multicouches (3) : sédiments tertiaires et quaternaires	1978 - en cours	+ Optimisation du réseau de surveillance, par méthode géostatistique (diminution de l'écart type de krigeage pour la cartographie des chlorures)

Tableau 1 : Synthèse des réseaux de surveillance des eaux souterraines existants en France et à l'international.

Le paysage urbain des villes d'Europe et d'Amérique du Nord connaît actuellement une reconversion et les politiques d'urbanisme mises en place favorisent une densification des villes plutôt qu'une expansion : reconversion des friches industrielles, création de nouvelles infrastructures en sous-sol (parkings, trémies, métro), nouveaux usages des eaux souterraines (géothermie, irrigation des jardins et potagers…). Les principales villes de nombreux pays ont décidé de se pencher sur les problématiques liées à l'eau souterraine, afin de définir des politiques d'aménagements intégrant les ressources en eau. De ces initiatives individuelles et isolées découlent parfois la mise en place de réseaux de suivis. Les plus anciens suivis ont démarré entre 1960 et 1980 (Szeged en Hongrie, Milan en Italie, Göteborg en Suède, Californie aux Etats-Unis, Bangkok en Taïlande). Cependant la pérennisation de ces réseaux reste souvent problématique. En France, seulement trois agglomérations ont mis en place un réseau de surveillance des eaux souterraines et seul le réseau de suivi des niveaux des eaux souterraines de la Métropole de Lyon est encore actif.

Dans les villes en développement, la croissance démographique a explosé et la demande en eau a augmenté, accentuant de manière exponentielle les effets négatifs d'une mauvaise gestion des eaux. Des réseaux de surveillances ont été mis en place, souvent dans l'urgence, et doivent répondre aux multiples problématiques liées aux eaux souterraines : surexploitation de la nappe engendrant une subsidence et la migration du biseau salé, pollution des eaux souterraines liée aux activités humaines et au manque de réglementations. Ainsi, les villes de Bangkok (Thaïlande) et de Córdoba (Argentine) résument l'ensemble des problématiques quantitatives et qualitatives qui peuvent être rencontrées sur les eaux souterraines de ces agglomérations en forte croissance.

3.2.1. Type de réseaux de surveillance

De manière générale, un réseau de suivi des eaux souterraines permet d'acquérir une meilleure connaissance des directions d'écoulement, des niveaux d'eau et de la qualité des eaux souterraines. Les réseaux de surveillance sont séparés selon le type de suivi mis en œuvre :

- le réseau quantité permet de définir le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère (sens d'écoulement de la nappe, variations saisonnières et pluriannuelles des niveaux), d'appréhender l'impact des infrastructures (parkings, fondations, métro…) sur l'écoulement de la nappe et de gérer les risques liés aux eaux souterraines ;
- le réseau qualité vise à évaluer l'évolution des paramètres physico-chimiques spatialement et temporellement à l'échelle de la ville et permet une stratégie cohérente dans le cas d'une détection de polluant ;
- le réseau température permet de suivre l'évolution de la température au cours du temps (par exemple, pour détecter des fuites du réseau d'assainissement ou pour suivre les effets du changement climatique) et de définir une politique de gestion de l'énergie géothermique.

Le suivi des réseaux existants est le plus souvent uniquement quantitatif. Lors d'un suivi de la qualité des eaux souterraines, les niveaux de la nappe sont toujours mesurés lors de la campagne de prélèvements ou au droit d'un réseau complémentaire. L'association des suivis qualité et quantité facilite la prise de décision en cas de pollution des eaux souterraines, afin de définir les sens d'écoulement, d'identifier la source de pollution et de prédire le déplacement du panache.

Plusieurs types de réseaux bien distincts existent selon les besoins :

- le réseau de connaissance permet de connaître l'état quantitatif et/ou qualitatif des eaux souterraines et de disposer d'une vision générale de tout ou d'une partie d'un système aquifère ;
- le réseau de surveillance générale permet de protéger la ressource en vérifiant que les eaux souterraines ne sont globalement pas altérées par des activités anthropiques et qu'elles sont conformes aux exigences propres à ses différents usages (eau potable, géothermie, alimentation naturelle de milieux humides et de cours d'eau…) ;
- le réseau de prévention et d'alerte est implanté au droit et en amont immédiat d'une ressource (captages d'eau potable), d'un aménagement (tunnel de métro, parking souterrain) ou d'un secteur à protéger et permet d'alerter sur la survenance d'un risque (inondation par remontée de nappe, détérioration de la qualité…) ;
- le réseau d'investigation permet de rechercher ou de caractériser une anomalie sur la qualité ou les niveaux des eaux souterraines. Ce type de réseau est par exemple mis en œuvre au droit ou à proximité d'un site pollué, afin de rechercher un éventuel impact sur les eaux souterraines et de remonter à sa source ;
- le réseau de surveillance spécifique permet de suivre l'évolution (extension, concentration ou niveaux…) d'un panache de pollution, d'une anomalie thermique ou d'une surexploitation de la nappe. Il est implanté au droit du secteur impacté et, si besoin, à proximité immédiate sur les zones susceptibles d'être affectées.

Les échelles de ces réseaux ne sont généralement pas adaptées au milieu urbain : ils ne sont pas assez denses pour les réseaux de connaissance et de surveillance générale et ne concernent qu'un secteur restreint pour les réseaux de prévention et d'alerte, d'investigation et de surveillance spécifique. De plus, les campagnes de mesures ne sont pas assez fréquentes et complètes pour répondre aux multiples problématiques rencontrées au droit des villes.

Au droit des grandes agglomérations, les réseaux de surveillance répondent à des problématiques de prévention et d'alerte (protection des captages d'eau potable et risque d'inondation), de surveillance spécifique (panache de pollution et biseau salé) ou encore de connaissance et de surveillance générale. Certains réseaux de suivi des niveaux, de la température et de la conductivité sont souvent monitorés avec des capteurs-enregistreurs, notamment lorsqu'il s'agit d'un réseau de surveillance générale ou de prévention et d'alerte.

En pratique, la limite entre les types de réseaux n'est pas toujours franche. Ainsi, un réseau de surveillance générale de la qualité peut constituer la première étape d'un réseau d'investigation qui peut évoluer vers un réseau de surveillance spécifique lors de la détection d'une pollution.

3.2.2. Objectifs des réseaux de surveillance existants

La mise en place de réseaux de surveillance en milieu urbain survient presque toujours à la suite d'évènements ayant engendré des conséquences souvent coûteuses sur la ressource en eau ou sur les infrastructures. L'objectif du suivi est le plus souvent unique et défini pour répondre à une problématique rencontrée sur la qualité, la quantité ou la température des eaux souterraines.

Quelques rares villes ont cependant compris l'intérêt de mutualiser les moyens. Leur réseau poursuit ainsi plusieurs objectifs. En Allemagne, sur les secteurs fortement urbanisés, la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) est fréquemment déléguée à la ville, acteur principal dans la gestion de l'eau. Ainsi la plupart des grandes villes allemandes ont mis en place des réseaux de suivi permettant de répondre à la réglementation mais également en lien avec leurs problématiques (pollution des eaux souterraines, risque d'inondation par remontée de nappe,

gestion des sols…). Les réseaux des villes en développement de Bangkok (Thaïlande) et de Córdoba (Argentine) répondent également à leurs de multiples problèmes. Enfin, peu de réseaux évoluent au cours du temps pour intégrer de nouvelles problématiques : Barcelone (Espagne) et Strasbourg (France). Ainsi, le réseau de surveillance de Barcelone (Espagne) a été mis en place en 1988 afin de prévenir d'éventuelles remontées de nappes. Les points de mesures servent également lors d'études ponctuelles menées par l'agglomération : cartographie de l'évolution du biseau salé, gestion de la sécheresse et optimisation des usages de l'eau, estimation des zones de recharge des nappes quaternaires, détection de pollution par les fuites de réseaux, réalisation de campagnes exceptionnelles d'analyses (molécules émergeantes, produits pharmaceutiques, drogues et métabolites). A Strasbourg (France), la création d'un Observatoire de la Nappe Alluviale (ONAP) a permis de piloter les programmes d'actions, définis en fonction des problématiques remontées par les partenaires, et de faire évoluer le réseau de surveillance (densité et localisation des ouvrages, programme analytique) selon les actions programmées.

Objectifs d'un suivi de la qualité des eaux souterraines

Peu d'agglomérations ont mis en place un réseau de surveillance purement qualitatif. Des réseaux ont principalement été installés suite à la détection d'une pollution. La ville de Ljubljana (Slovénie) est le parfait exemple d'un aquifère ayant subi une pollution ponctuelle et dont le réseau de surveillance et le modèle hydrodynamique associé ont permis de localiser la source de pollution. Cependant, la dégradation des eaux souterraines en milieu urbain étant difficilement gérable ou traitable, ces réseaux sont souvent configurés pour suivre les écoulements de la nappe et donc le déplacement des pollutions (Oladeji Olayinka S., 2011) : Hong-Kong (Chine), Pékin (Chine) et Birmingham (Royaume-Uni).

D'autres réseaux de surveillance de la qualité ont été installés afin de vérifier la cohérence entre les normes de qualité et l'utilisation des eaux souterraines : Amsterdam (Pays-Bas), Berlin, Hambourg, Hanovre et Cologne (Allemagne), Memphis (Etats-Unis), Séoul (Corée du Sud), Strasbourg (France), Szeged (Slovénie) et Tokyo (Japon - Kuroda K. and Fukushi T., 2008). Les suivis permettent de dresser un bilan de l'état des eaux souterraines et de constater l'évolution de la qualité. Ils permettent également d'une manière générale d'améliorer la réactivité des services de gestion de la ressource en cas de détection d'une pollution. L'accroissement rapide de la démographie et l'augmentation de la demande en eau ont obligé certaines villes en développement à s'intéresser à la ressource en eau souterraine. Des réseaux qualitatifs se sont mis en place afin de protéger les captages d'eau potable et de rechercher les activités susceptibles d'engendrer une pollution : Bangkok (Thaïlande), Córdoba et Mar del Plata (Argentine).

Objectifs d'un suivi de la quantité, de la température et de la conductivité des eaux souterraines

La prévention du risque d'inondation constitue la principale raison de la mise en place d'un réseau de surveillance des eaux souterraines (Attard G. et al., 2016). Ces inondations sont dues à des remontées de la nappe superficielle, naturelles ou engendrées par les aménagements du sol et du sous-sol, ou à un phénomène de rebond phréatique (cf 2.2.2 Risques associés aux niveaux des eaux souterraines) : Barcelone (Espagne), Berlin (Allemagne), Birmingham (Royaume-Uni), Bucarest (Roumanie), Budapest (Hongrie), Houston (Etats-Unis), Liverpool (Royaume-Uni), Lyon (France), Milan (Italie), Moscou (Russie) et Tokyo (Japon). Ces remontées de nappes ont également inquiété certaines villes car elles sont également susceptibles d'engendrer des problèmes de mouvements de terrain, liés à la présence d'une couche superficielle d'argiles (Howard K.W.F. and Gelo K.K., 2002) : Göteborg (Suède) et Londres (Royaume-Uni).

D'autres villes font face à des problèmes liés à une surexploitation des eaux souterraines. Le suivi des niveaux de nappes permet de mettre en place une politique de gestion des prélèvements : Est-Lyonnais (France). La baisse des niveaux peut engendrer des tassements du sol (subsidence) et une déstabilisation de fondations : Bangkok (Thaïlande) et Boston (Etats-Unis).

Le développement d'infrastructures souterraines (métros, tunnels) comportant des systèmes de drainage modifie les écoulements naturels des eaux souterraines et nécessite un suivi attentif afin de s'assurer du bon fonctionnement du système. Les coûts engendrés par une mauvaise gestion des eaux souterraines peuvent s'avérer très élevés. Les villes de Bucarest (Roumanie) et de Séoul (Corée du sud) ont intégré le suivi de leurs infrastructures dans la conception de leur réseau, notamment pour la distribution des points autour de certaines structures comme les métros.

Le développement de nouvelles énergies comme la géothermie représente de nouveaux enjeux dans un contexte de transition énergétique. Le réchauffement de certaines nappes fortement sollicitées et l'apparition d'îlots de chaleur ont incité des villes à mettre en place des réseaux de surveillance de la température (Nicolas J. et al., 2019) : Berlin (Allemagne), Saragosse (Espagne) et Strasbourg (France). Le risque d'augmentation de la température représente également un impact potentiel sur l'accélération du développement bactérien, en lien avec les fuites des réseaux d'eau usées, et sur l'apparition d'éléments comme les métaux lourds. Ainsi, le réseau de suivi de Saragosse (Espagne) permet de rechercher des corrélations entre la température des eaux souterraines et les teneurs en métaux lourds.

Enfin, des villes côtières ont dû mettre en place un dispositif de surveillance dans l'optique de préserver leur ressource face à la migration accélérée du biseau salé liée très souvent à une surexploitation des eaux souterraines : Barcelone (Espagne), Bangkok (Thaïlande), Fremont (Etats-Unis) et Recife (Brésil). En Allemagne, des intrusions salines proviennent des formations géologiques gypseuses : Berlin, Hambourg et Hanovre. Le suivi des niveaux d'eau s'accompagne alors d'un suivi de la conductivité, permettant de détecter la présence d'eau salée (conductivité élevée) et de suivre la migration du biseau salé.

3.2.3. Méthodologie pour la conception du réseau de surveillance

La bibliographie et les échanges avec des gestionnaires de réseaux urbains permettent de tirer des enseignements intéressants pour l'élaboration d'une méthodologie nationale, notamment concernant la densité, la localisation et la pérennisation des points de surveillance. Certains des réseaux de surveillance sont remarquables en terme de nombre de points suivis, de multiples problématiques, de concertation entre les propriétaires d'ouvrages…

Un ouvrage relatant les expériences de plusieurs pays européen est paru dans le cadre d'un programme de coopération technique et scientifique (Bonsor H.C. et al., 2015). En prenant l'exemple de plusieurs villes, cette étude présente les différentes méthodes de suivi de la qualité ou de la quantité des eaux souterraines mises en œuvre selon les problématiques rencontrées et les usages de la ressource en eau. L'étude conclut sur le fait que la méthodologie adoptée pour la conception d'un réseau de suivi dépend des objectifs poursuivis et des problématiques rencontrées. Le retour d'expérience indique également que les approches méthodologiques dépendent de l'urgence pour l'obtention de résultats ainsi que des financements. Ces derniers sont conditionnés par les coûts potentiels des éventuels dommages engendrés par les eaux souterraines sur les aménagements urbains et sur la ressource.

Densité et localisation des points de surveillance

Théoriquement, le nombre total et la répartition des ouvrages de surveillance doivent permettre de prendre en compte et de caractériser l'ensemble des contextes hydrogéologiques, hydrochimiques et de pressions anthropiques. Ainsi, à Berlin (Allemagne), les points de mesures sont répartis par secteurs hydrogéologiques délimités selon leurs conditions hydrogéologiques et pressions anthropiques. Cependant, la densité des réseaux existants repose rarement sur une approche scientifique mais dépend directement des financements. A l'échelle d'une ville, les méthodologies mises en œuvre sont le plus souvent très simplistes. Les ouvrages sont implantés de façon homogène sur le territoire étudié, en densifiant parfois certains secteurs problématiques (suivi de panaches de pollution) ou prioritaires (réseau d'alerte pour l'eau potable).

En moyenne, les réseaux existants de suivi de la qualité en milieu urbain comptent 0,2 à 0,5 point/km². Leur densité dépend des enjeux du suivi et donc de l'objectif de la surveillance :

- réseaux pour une connaissance et/ou une surveillance générale, étendus à l'ensemble ou à une grande partie de la ville : 0,1 à 0,5 point/km^2 – Szeged (0,10 pt/km^2), Hambourg (0,22 pt/km^2), Toulouse (0,23 pt/km^2), Berlin (0,28 pt/km^2), Barcelone (0,30 pt/km^2), Hanovre (0,36 pt/km^2), Séoul (0,46 pt/km^2) et Cologne (0,50 pt/km^2) ;
- réseaux de prévention, d'alerte, d'investigation et de surveillance spécifique, parfois limités à un secteur stratégique : 0,5 à plusieurs points/km^2 – Bangkok (0,08 pt/km^2), Mar del Plata (0,29 pt/km^2), Doncaster (0,48 pt/km^2), Strasbourg (0,58 pt/km^2), Fremont (1,05 pts/km^2) et Recife (0,89 et 3,38 pts/km^2 sur 2 secteurs).

Concernant les réseaux de suivi des niveaux piézométriques, la densité est de 0,1 à plusieurs points/km² : Szeged (0,11 pt/km^2), Londres (0,13 pt/km^2), Ljubljana (0,16 pt/km^2), Córdoba (0,17 pt/km^2), Milan (0,18 pt/km^2), Bangkok (0,22 pt/km^2), Memphis (0,27 pt/km^2), Barcelone (0,30 pt/km^2), Séoul (0,46 pt/km^2), Lyon (0,60 pt/km^2), Bucarest (0,61 pt/km^2), Göteborg (0,69 pt/km^2), Toulouse (0,86 pt/km^2), Hambourg (0,86 pt/km^2), Mar del Plata (0,90 pt/km^2), Fremont (1,05 pts/km^2), Berlin (1,14 pt/km^2), Cologne (1,60 pt/km^2) et Recife (0,24 et 2,50 pts/km^2 sur 2 secteurs). Le réseau le plus dense est celui de Boston (Etats-Unis), avec 54 points/km^2, soit 811 piézomètres sur environ 15 km^2 (www.bostongroundwater.org). Cette densité exceptionnelle d'ouvrages s'explique par un financement conséquent mais négligeable face aux coûts d'éventuels dommages pouvant apparaître sur les bâtiments suite à une baisse des niveaux de la nappe. En effet, la diminution des niveaux piézométriques menace d'exposer les fondations en bois à l'air ce qui les dégraderait et porterait atteinte à l'état structural des anciens bâtiments. Les impacts économiques engendrés par des dégradations de bâtiments historiques sont colossaux. A titre d'exemple, les réparations de l'hôtel de ville de Milwaukee (Wisconsin, Etats-Unis) qui rencontre le même type de problème sont estimées à 60 000 000 $.

Pour une gestion des ressources en eaux souterraines à grande échelle, la distribution des points de mesures peut être variée (Figure 7 – Gilbert R.O., 1987 ; Alley, 1993) : distribution aléatoire (a), distribution aléatoire stratifiée (b), distribution selon une grille (c), distribution par discrimination en blocs (d). En pratique, le type du réseau conditionne la localisation des points de surveillance. Pour un réseau de connaissance et de surveillance générale, les points sont répartis de façon homogène sur l'ensemble du territoire. Pour les ouvrages d'un réseau d'investigation, destiné à la détection d'éventuels polluants dans les eaux souterraines, la répartition est également homogène sur l'ensemble du territoire et certains ouvrages sont localisés au plus proche et en aval hydraulique immédiat des sources potentielles de pollution. Le réseau de surveillance spécifique permet de suivre l'évolution d'un panache de polluants. Les points sont donc implantés au centre, en limite et en aval immédiat du panache, afin d'apprécier ses déplacements ainsi que les concentrations et la nature des polluants. Ils doivent être complétés par d'autres points en aval hydraulique dès qu'ils sont touchés par la pollution.

Concernant le réseau de prévention et d'alerte, les ouvrages sont situés en amont hydraulique du point ou du secteur à protéger, à une distance suffisante afin de déployer les mesures de gestion prévues en cas de détection d'une pollution.

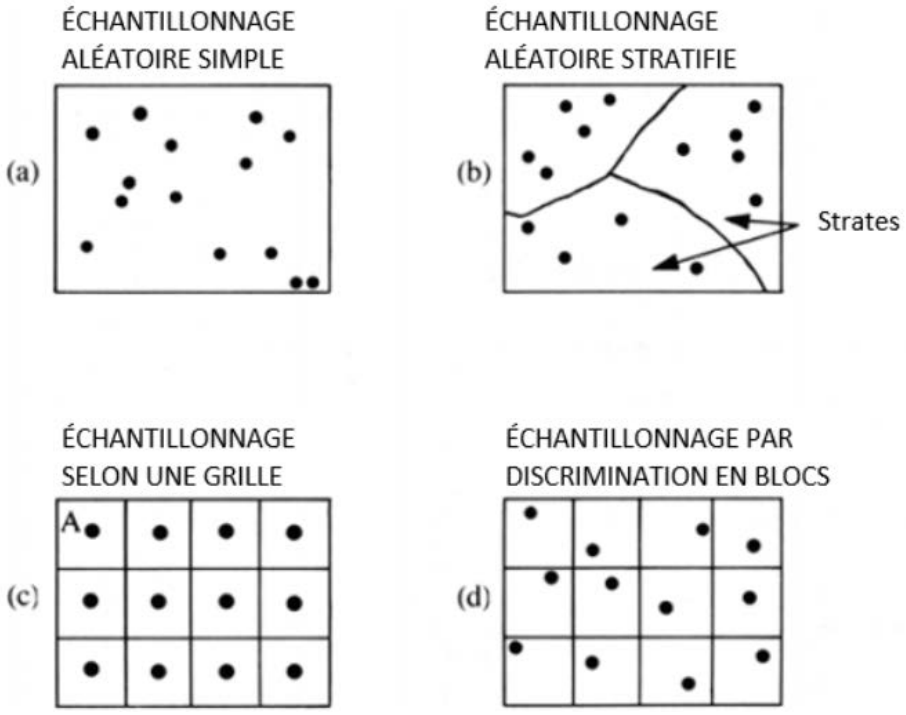


Figure 7 : Exemple d'échantillonnage présenté en 2D (source : traduit de Gilbert R.O., 1987 modifié par NGWMN, 2013)

La complexité des écoulements des eaux souterraines en milieu urbain fait généralement ressortir la nécessité de se baser sur une approche scientifique pour la conception d'un réseau de surveillance représentatif et optimisé. Les principaux freins sont alors certaines lacunes de connaissances limitant la compréhension du système aquifère (Bonsor H.C. et al., 2015) :

- le manque de données sur les niveaux, la qualité et la température des nappes au droit des milieux urbains et le manque de connaissances sur le fonctionnement de l'hydrosystème (écoulements, recharge, exutoires) ;
- l'absence de réglementations et de connaissances dans de nombreux pays sur l'anthropisation des sols et du sous-sol tels que les infrastructures souterraines (profondeur, longueur, conception), les forages de prélèvements ou de rejets (localisation, nappe captée, volumes prélevés ou injectés), les fuites de réseaux (localisation, profondeur et volume), la gestion des pollutions… ;
- le manque de compréhension des impacts passés et actuels des aménagements et des activités humaines sur l'état naturel de l'hydrosystème, conduisant à des calages non appropriés de modèles hydrodynamiques.

Quelques villes se basent sur des documents de référence réalisés avec une densité de points plus importants, comme des cartes piézométriques précises ou un modèle hydrodynamique ou hydrogéochimique, afin de vérifier ou d'optimiser la représentativité de leur réseau : Barcelone (Espagne), Bucarest (Roumanie) et Lyon (France). A l'échelle d'une ville, la réalisation d'un modèle hydrodynamique et/ou hydrogéochimique, intégrant l'ensemble des spécificités du sol et du sous-sol urbain permet de concevoir le réseau de surveillance ou de valider ce réseau après une ou plusieurs campagnes de mesures. La comparaison des niveaux calculés par le modèle hydrodynamique aux niveaux mesurés sur les piézomètres du réseau, permet de valider ce

réseau de suivi ou de proposer des ajustements nécessaires afin de garantir la représentativité vis-à-vis des écoulements des différentes nappes. Certains modèles hydrodynamiques peuvent intégrer les prélèvements, les fuites de réseaux et les barrières hydrauliques, afin de rendre compte des influences locales sur les sens d'écoulement. De tels modèles hydrodynamiques ont été mis en œuvre à Lyon (Amraoui N. et al., 2005 ; Seguin J.-J. et Nicolas J., 2006 ; Seguin J.-J., 2008) et à Paris (Lamé A., 2013).

Plus exceptionnellement, d'autres méthodes sont mises en œuvre pour la conception ou l'optimisation des réseaux de surveillance. A Bangkok (Thaïlande), la cartographie de la qualité des eaux souterraines a été déterminée à partir des résultats de campagnes d'analyses avec une méthode géostatistique (Das Gupta A., et al., 1995). La densité et la localisation des ouvrages de surveillance ont ensuite été optimisées afin de diminuer l'écart type de krigeage au droit de certains secteurs fortement pollués.

A Córdoba (Argentine), la mise en place des ouvrages de surveillance se base sur une carte des risques de pollution des eaux souterraines, combinant une cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution et une carte des sources potentielles de pollution hiérarchisées selon leur dangerosité pour les eaux souterraines (Ferral Anabella et al., 2014). Cette carte de risque permet de définir les secteurs à suivre prioritairement et un modèle hydrogéologique permet d'interpréter les résultats de la surveillance de la qualité de la nappe (Figure 8).

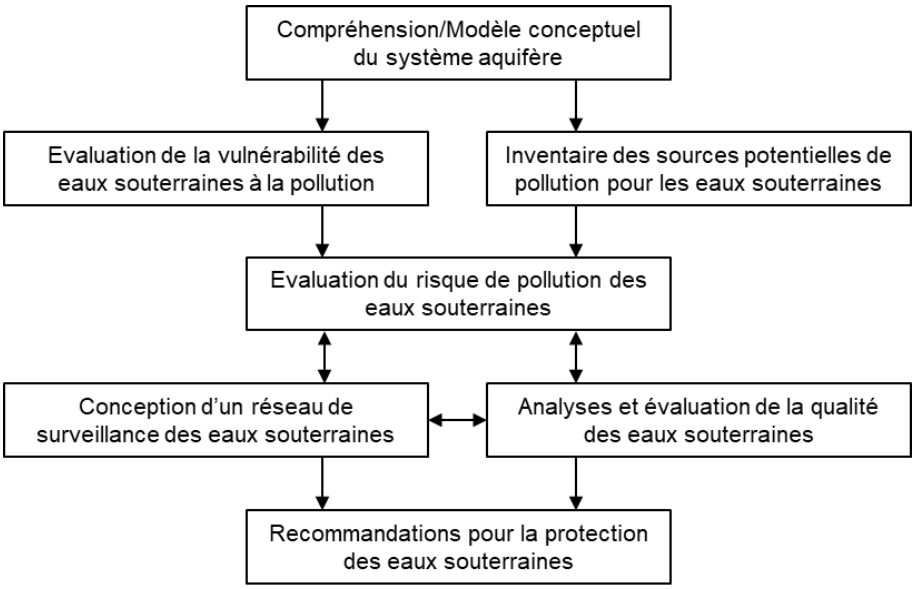


Figure 8 : Méthodologie pour la surveillance et la protection des ressources en eau souterraine à Córdoba (source : traduit de Ferral Anabella et al., 2014)

Sélection d'ouvrages existants ou création des ouvrages de surveillance

De nombreux réseaux de surveillance se construisent en privilégiant les ouvrages existants, pour des raisons évidentes d'économie. La sélection des points dépend tout d'abord de la localisation et des caractéristiques de l'ouvrage, afin qu'il soit représentatif de la nappe étudiée et qu'ils répondent aux objectifs du suivi. Des critères pratiques sont également pris en compte : l'accès, la protection de la tête de l'ouvrage et la pérennité des points sont des problèmes récurrents. L'existence d'un suivi historique constitue également un atout supplémentaire dans le choix d'un ouvrage, notamment pour vérifier si l'ouvrage est suffisamment profond (risque d'assec) et s'il n'est pas influencé. Cependant, la qualité des données des anciennes chroniques est parfois douteuse. De plus, les anciens réseaux de surveillance des eaux souterraines se sont développés

au fil du temps et selon des objectifs précis. Ils ne permettent pas toujours de recueillir des données appropriées pour les besoins actuels (Bonsor H.C. et al., 2015). A titre d'exemple, la ville de Hambourg a construit son réseau en sélectionnant 646 piézomètres et 167 qualitomètres parmi 4 000 ouvrages privés et publics faisant l'objet de suivis réguliers ou ponctuels. La construction de ce réseau a impliqué un travail long pour rencontrer et convaincre les propriétaires des ouvrages, signer des conventions d'accès et de partage des données, puis entretenir de bonnes relations sur le long terme avec l'ensemble des propriétaires.

Le principal avantage pour la création d'ouvrages est d'avoir un réseau sur mesure qui réponde aux objectifs du suivi, en terme de densité, localisation et caractéristiques (position des crépines et nappe captée, type de tubage…) des points de surveillances et qui garantisse un suivi pérenne sur le long terme (ouvrage protégé et pérenne, accès facilité…). Quelques rares réseaux sont constitués d'ouvrages forés dans le cadre du projet. Le réseau est alors adapté au plus près des problématiques et les ouvrages appartiennent au gestionnaire ou au financeur du réseau. Les points sont le plus souvent implantés en domaine public, ce qui favorise leur accès mais les exposent à des actes de vandalisme. C'est le cas des 811 piézomètres du réseau de Boston aux Etats-Unis (www.bostongroundwater.org), tous implantés sur le trottoir. La municipalité de Cologne (Allemagne) possède également 650 points de surveillance, même si tous ne sont pas suivis régulièrement (www.stadt-koeln.de).

Campagnes de prélèvements et analyses

Des préconisations sont fournies dans les nombreux guides méthodologiques édités en France et à l'international pour la conception des ouvrages de surveillance et la réalisation des campagnes de prélèvements et des analyses : substances et paramètres à suivre, fréquence et période des campagnes, échantillonnage, interprétation des résultats et rédaction d'un rapport, optimisation du réseau... (Ministère en charge de l'environnement, 2019).

Au droit des réseaux urbains, les fréquences de mesures et les analyses réalisées répondent aux objectifs du réseau de surveillance. Quelques villes ont ajouté des spécificités originales à leur suivi : analyses de la faune des eaux souterraines à Hanovre (Allemagne), analyses de résidus de drogues et métabolites à Barcelone (Espagne), création de piézomètres multiniveaux permettent de prélever à 6 profondeurs différentes et d'interpréter la stratification verticale de la qualité des eaux souterraines à Doncaster (Royaume-Uni).

3.2.4. Mutualisation et communication des données

La mutualisation et la diffusion des données auprès des acteurs du sol urbain et des ressources en eau ainsi qu'auprès du public sont importantes, afin de sensibiliser à la gestion d'une ressource invisible et d'éviter des dégradations volontaires d'ouvrages et de matériel. De plus, une bonne communication permet de valoriser l'image du gestionnaire à travers son action positive dans la gestion d'une ressource stratégique que sont les eaux souterraines.

En Europe, certaines villes ont mis en place des sites internet permettant de diffuser leurs données acquises, notamment afin de répondre à la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Le site de la ville de Hambourg intègre un espace cartographique permettant de croiser les informations sur la géologie, les niveaux et les écoulements des nappes (cartes piézométriques), la qualité des eaux souterraines, les eaux de surface, les secteurs sensibles et protégés (zone humide, captage d'eau potable et périmètre de protection…), l'occupation des sols (Figure 9 - geoportal-hamburg.de/geo-online/). L'intégration fréquente des données de surveillance dans les modèles hydrodynamiques et hydrogéochimiques permet de prévoir et d'anticiper pour une politique

d'aménagement durable : cartographie, évolutions passées et prévisions des niveaux d'eau, des écoulements, du déplacement de panaches de pollutions ou des intrusions salines….

L'association Boston Groundwater Trust a mis en place une initiative innovante avec l'installation de bouchons transparents et interactifs au droit de ces piézomètres, permettant aux passants de visualiser les eaux souterraines et de connaître la profondeur de l'eau en temps réel grâce à un afficheur numérique (Figure 10). Les chroniques complètes peuvent également être visualisées grâce à un site internet et une application mobile.

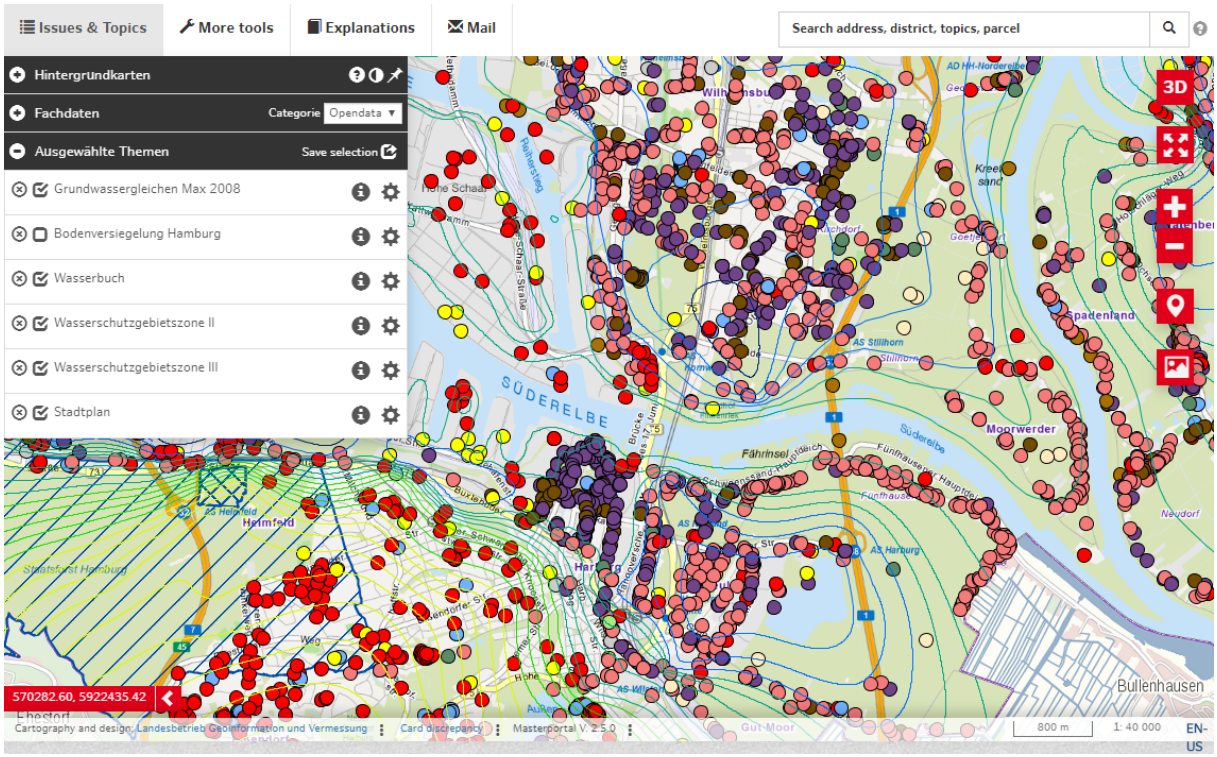


Figure 9 : Site internet de diffusion des données de Hambourg (source : geoportal-hamburg.de/geo-online/)

Figure 10 : Tête d'un piézomètre et bouchon interactif du réseau piézométrique de Boston (source : www.bostongroundwater.org, 2018)

3.2.5. Financement et pérennité du réseau

La conception et le suivi du réseau de surveillance en milieu urbain sont généralement portés par la Mairie ou la Métropole. Le financement et la pérennité du réseau dépendent alors de l'adhésion des élus au projet. Le financement nécessaire au développement et à la gestion d'un réseau de surveillance peut être largement compensé en mettant en parallèle les coûts induits par une mauvaise gestion des eaux souterraines : réfection d'infrastructures fissurées, dépollution de sites, traitement de l'eau potable ou de création d'un nouveau captage... Plus les conséquences sont coûteuses, plus l'intérêt de la mise en place d'un suivi des eaux souterraines est évident et plus les fonds alloués au réseau sont importants. La mise en place d'un réseau de surveillance s'intègre alors dans une démarche d'anticipation et non de gestion curative après la survenue d'un désordre ou d'une crise.

Le réseau de suivi des nappes de la métropole de Strasbourg a été piloté de façon innovante. En 1993, l'Eurométropole de Strasbourg a mis en place un observatoire appelé Observatoire de la Nappe Alluviale (ONAP), regroupant les services de l'Etat, des experts en hydrogéologie et des représentants des industriels. L'objectif de ce groupe de travail est notamment d'orienter les programmes d'actions selon les problématiques remontées par les partenaires et de définir les actions pour le suivi de la nappe alluviale de la plaine d'Alsace. Les objectifs du réseau ont ainsi évolué au cours du temps : suivi des solvants chlorés et cartographie des panaches de pollution ; suivi des niveaux d'eau et cartographies des écoulements en lien avec la qualité et le risque d'inondation par remontée de nappe ; suivi de la température et impact des installations géothermiques ; suivi des produits phytosanitaires, des résidus de médicaments et des perturbateurs endocriniens ; suivi de la qualité des eaux souterraines en aval des sites industriels et en amont des captages d'eau potable… Les financements sont également multiples, répartis entre les services de l'Etat et la ville.

4. Démarche méthodologique proposée et application à un cas concrêt

La deuxième partie de l'étude est rédigée sous la forme d'un guide méthodologique, destiné aux collectivités, maîtres d'ouvrage des études sur les agglomérations, et aux bureaux d'études, maîtres d'œuvre de ces études.

Ce guide méthodologique formule des recommandations sur des méthodes existantes à mettre en œuvre pour concevoir un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain. Chaque milieu urbain étant unique, ce guide se veut adaptable et vise à fournir les lignes directrices relatives à la conception d'un réseau de surveillance des eaux souterraines en zone urbaine.

4.1. PRESENTATION DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE

La démarche proposée est schématisée comme suit (Figure 11).

La méthodologie élaborée dans le cadre de ce projet se décline en phases successives et complémentaires, permettant de prendre en compte l'ensemble des spécificités du milieu urbain. Ces phases proposent des outils permettant de répondre aux questions qui se posent lors de la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines au droit d'une zone urbaine :

- phase 1 : Quels sont les principes et les objectifs du réseau de surveillance ?
- phase 2 : Quelle est la densité optimale des points de surveillance (nombre de points) ?
- phase 3 : Quelle est l'implantation idéale des points de surveillance (localisation) ?
- phase 4 : Quelles doivent être les caractéristiques des points de surveillance (profondeur, niveaux crépinés, nature du tubage…), des campagnes de prélèvements (fréquence et période) et du programme d'analyses ?
- phase 5 : Comment mettre en œuvre le réseau de surveillance, selon les préconisations des phases précédentes (sélection de points de surveillance, protocoles de prélèvements et d'analyse) ?
- phase 6 : Comment optimiser le nombre de points et le programme de surveillance ?

A noter que la première phase se poursuit en parallèle des phases suivantes. Les phases 5 et 6 sont itératives, afin de réaliser périodiquement un retour d'expérience et une éventuelle optimisation du réseau. Lors de cette optimisation, les phases 2 à 4 peuvent être rejouées, afin de prendre en compte de nouveaux inventaires historiques et la modification du milieu urbain au cours du temps.

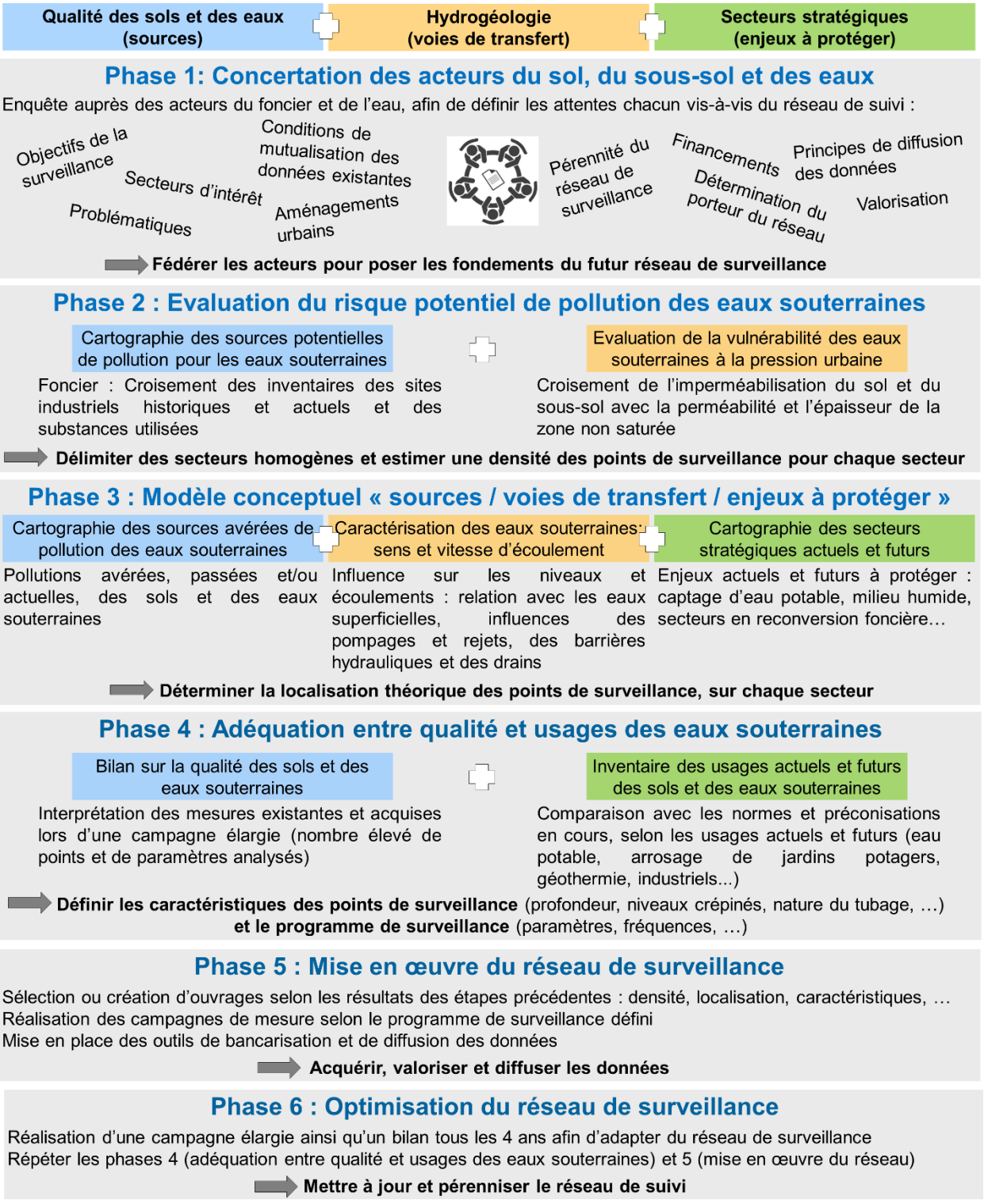


Figure 11 : Méthodologie détaillée pour la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain

4.2. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON

Les approches proposées dans le présent guide méthodologique ont été appliquées à l'agglomération de Lyon (Figure 12)**.** L'objectif est de confronter la méthodologie à un cas concret, sans pour autant réaliser une étude complète et définir un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines pleinement opérationnel. Compte tenu de la complexité du milieu urbain, certaines étapes n'ont été mises en œuvre qu'au droit d'un secteur de l'agglomération. En accord avec les acteurs lyonnais du sol et du sous-sol, la nappe alluviale du secteur de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne Saint Jean a été choisie (Figure 12). Cette zone est localisée en amont du champ captant de Crépieux-Charmy, qui représente une ressource d'alimentation en eau potable stratégique pour l'agglomération. Il s'agit par ailleurs d'un secteur où plusieurs aménagements fonciers sont en cours ou prévus et où plusieurs sources potentielles et avérées de pollution ont été identifiées. Ce secteur permet donc de répondre à des objectifs de protection de la ressource (réseau d'alerte en amont des captages d'eau potable) et de reconversion foncière.

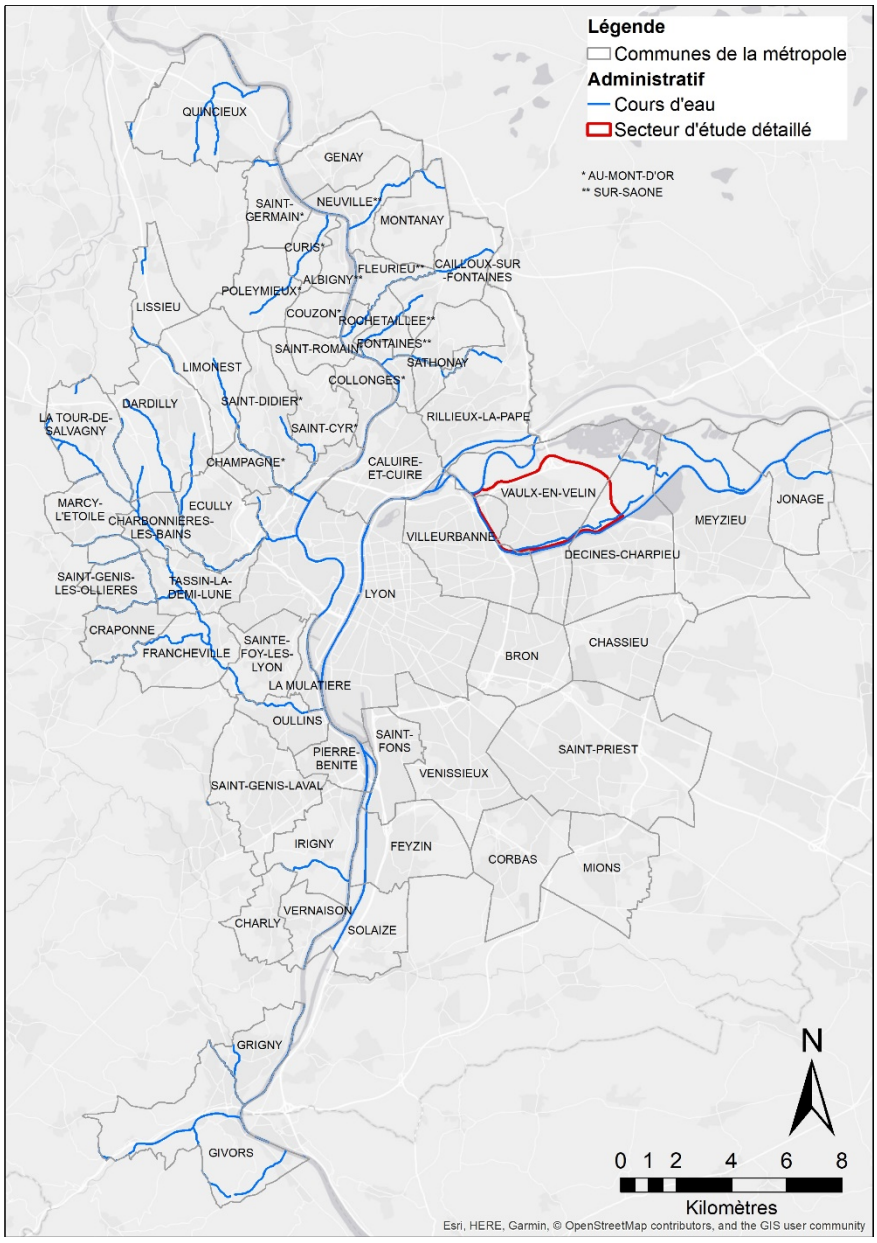


Figure 12 : Communes de la Métropole de Lyon et localisation du secteur d'étude détaillé

4.2.1. Contexte géologique et hydrogéologique

Le territoire de la Métropole de Lyon comprend 59 communes réparties sur 538 km^2, avec une démographie supérieure à 1,4 millions d'habitants (Figure 12). L'agglomération s'est développée à la confluence du Rhône et de la Saône. A l'ouest et au nord, le relief est marqué : les Monts d'Or culminent à 625 m d'altitude à l'ouest, alors que les collines de Fourvière à l'ouest et de la Croix Rousse au nord ne dépassent pas 250-350 m. La plaine alluviale se situe à environ 160-170 m d'altitude en moyenne. Enfin, à l'est, la « plaine de l'Est Lyonnais » a été façonnée lors des différentes glaciations. Le relief de cette plaine est divisé en 3 couloirs fluvioglaciaires distincts, Meyzieu, Décines et Heyrieux, séparés par des collines morainiques d'une altitude moyenne de 250 m.

Les ouvrages de Mongereau compilent un état de l'art des connaissances géologiques et hydrogéologiques du territoire de la Métropole de Lyon (Mongereau M., 2003 ; Mongereau M., 2008). Un modèle géologique et hydrodynamique a été élaboré entre 2000 et 2004. Il présente en détails la géométrie des formations aquifères et aquicludes (Nicolas J. et al., 2004 ; Amraoui N. et al., 2005 ; Seguin J.-J. et Nicolas J., 2006 ; Seguin J.-J., 2008).

La carte géologique permet de distinguer 3 secteurs majeurs (Figure 13) :

- les terrains cristallins du Primaire et les calcaires et marnes du Secondaire à l'ouest ;
- les formations fluvioglaciaires à l'est, séparées en couloirs par les moraines glaciaires (buttes témoins de Bron et de Décines) et recouvrant la molasse du Miocène ;
- les alluvions quaternaires du Rhône et de la Saône au centre de l'agglomération.

Plusieurs nappes se rencontrent au droit de l'agglomération de Lyon (Figure 13) :

- les nappes alluviales du Rhône et de la Saône s'étendent sur la plaine des Chères à Quincieux, le secteur de Vaise, la plaine de Miribel-Thil-Balan, l'île de Miribel-Jonage, Villeurbanne, Lyon rive gauche, la presqu'île de Lyon et la vallée du Rhône à l'aval de Lyon ;
- les nappes des dépôts fluvioglaciaires de l'est lyonnais sont présentes au sud du canal de Jonage et à l'est d'une ligne Cusset-Monplaisir-Saint Fons. Ces dépôts sont divisés par des buttes morainiques longitudinales qui individualisent des entités relativement indépendantes : couloirs de Meyzieu, de Décines et d'Heyrieux se séparant en couloirs de Vénissieux et de Saint Symphorien d'Ozon ;
- la nappe des cailloutis plio-quaternaires de Bresse, surmontée par un recouvrement morainique et par des limons, se retrouve au nord-est jusqu'à Rillieux-La-Pape, Caluire-et-Cuire et la Croix Rousse ;
- les nappes plus profondes sont représentées par la nappe des sables pliocènes dans la vallée de la Saône et par la nappe de la molasse miocène à l'est de la Saône et du Rhône ;
- des circulations d'eau sont également présentes dans les calcaires du massif des Monts d'Or ainsi que dans les roches du socle dans les Monts du Lyonnais.

Le secteur d'étude de Vaulx-en-Velin est situé sur les alluvions du Rhône, épaisses de 20 à 25 m et constituées de galets, graviers et sables, surmontant des formations argileuses des moraines. La molasse du Miocène représentant l'aquifère profond n'est pas étudiée : elle est relativement bien protégée par les argiles morainiques et n'est pas exploitée sur ce secteur.

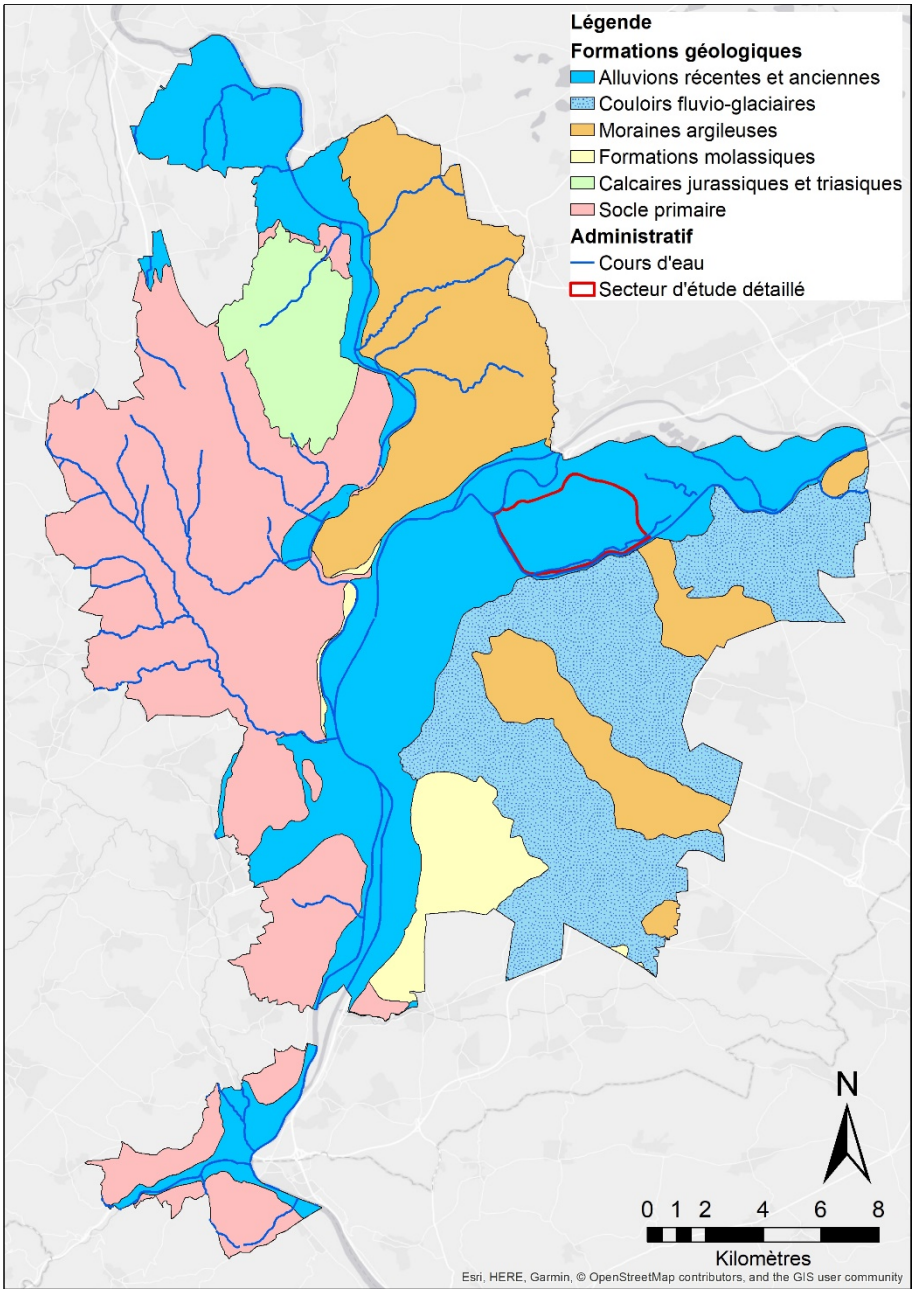


Figure 13 : Carte hydrogéologique de l'agglomération de Lyon (source : bdlisa.eaufrance.fr)

4.2.2. Déroulement de l'étude de cas sur l'agglomération de Lyon

En 2017, plusieurs villes, gestionnaires de réseaux de surveillance, ont été contactées lors de la réalisation du retour d'expérience : Boston (Etats-Unis), Hanovre (Allemagne), Toulouse et Strasbourg (France). Des contacts ont également été pris avec les acteurs du sol et du sous-sol de l'agglomération de Lyon par téléphone, messages électroniques et lors de réunions dans les locaux du BRGM de Villeurbanne. Les premiers constats ont démontré la difficulté de mener des échanges exhaustifs et constructifs lors de réunions rassemblant de nombreuses personnes, du fait de la complexité du milieu urbain, de ses multiples acteurs, utilisateurs et problématiques.

Il a donc été jugé préférable de mener des entretiens individuels, afin de recueillir des informations sur les réseaux de surveillance existants et les données associées et sur la

perception de chaque acteur vis-à-vis d'un réseau de surveillance des eaux souterraines. 14 entretiens se sont déroulés sur une semaine en juillet 2018. Chaque entretien a réuni de 1 à 3 personnes et a duré entre 1 et 2 heures. Ils ont permis de recueillir le point de vue de 26 personnes parmi les structures suivantes :

- Métropole de Lyon – Direction de l'Eau ;
- Métropole de Lyon – Direction Foncier & immobilier ;
- Métropole de Lyon – Service écologie et développement durable ;
- Ville de Lyon – Service Stratégie immobilier ;
- Ville de Lyon – Service Santé-environnement ;
- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse ;
- SAGE Est-Lyonnais ;
- DREAL Auvergne-Rhône-Alpes ;
- DREAL UD 69 – Inspecteurs des installations classées ;
- DDT 69 – Service Eau et Nature (Police de l'eau) ;
- Compagnie Nationale du Rhône (CNR) - Pôle domanial ;
- Transports en commun lyonnais (TCL) - Sytral (Direction des équipements et du patrimoine) ;
- TCL – Kéolis (Hygiène Sécurité et Environnement) ;
- BRGM – Direction des Actions Territoriales Auvergne-Rhône-Alpes basée à Villeurbanne.

Le service Environnement et Développement Durable d'Orléans Métropole a également été rencontré, afin de connaître son ressenti vis-à-vis de la mise en place d'un réseau de surveillance sur son territoire. La réunion s'est déroulée conformément à la démarche mise en place lors des entretiens menés à Lyon.

Des outils de communication, consultables en Annexe 3, ont été élaborés afin de présenter les attentes du projet et de s'immerger dans l'étude de cas concret. Environ deux semaines avant les entretiens individuels, une plaquette a été envoyée au participants, afin de leurs exposer le projet et de commencer à les faire réfléchir à l'intérêt d'un réseau de surveillance des eaux souterraines. Les entretiens individuels se sont ensuite déroulés en deux étapes. Dans un premier temps, le projet est contextualisé avec l'exemple de réseaux remarquables mis en place à Boston et Hambourg. Puis la démarche propose aux participants d'imaginer un futur réseau de surveillance sur le territoire de la métropole. Le support de présentation rappelle les grandes lignes directives et les questions principales à se poser. Les entretiens se sont ainsi déroulés dans un esprit de dialogue constructif et ont permis de recueillir un maximum d'informations pertinentes auprès des participants. Enfin, pour les personnes non expertes, une présentation schématique permet de visualiser l'évolution, de 1850 à 2019, de l'aménagement du sol et du sous-sol d'une ville française, des impacts sur les écoulements et la qualité des eaux souterraines et de ses réseaux de surveillance en lien avec la réglementation.

A l'issue des entretiens, les restitutions ont été réalisées auprès des participants, soit durant une réunion dans les locaux du BRGM à Villeurbanne, soit par téléphone et messages électroniques. La présentation de la réunion, retranscrite en Annexe 4, synthétise les principaux ressentis et idées exprimés par les différentes personnes rencontrées. Les échanges ont permis de faire émerger un certain nombre de constats et de formaliser différents messages.

5. Phase 1 : Concertation des acteurs du sol, du sous-sol et des eaux

La première phase de concertation des acteurs du sol, du sous-sol et de l'eau est déterminante et sert de base à la mise en place du réseau de suivi (Figure 14). Elle permet à la fois de fédérer les acteurs autour du projet, d'identifier les sources d'informations puis de collecter l'ensemble des données. Cette phase n'est pas à négliger car c'est la définition de fondements solides qui permettra de garantir la pérennité à long terme du réseau de suivi.

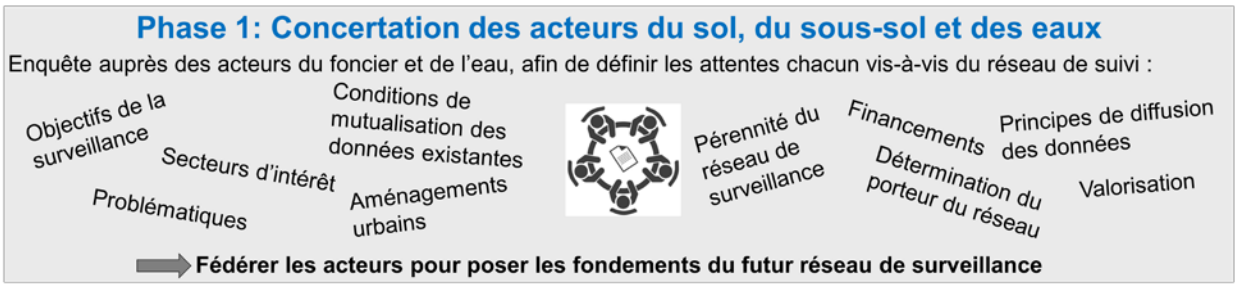


Figure 14 : Méthodologie de la phase 1 - concertation des acteurs du sol, du sous-sol et des eaux

5.1. CONCERTATION DES ACTEURS

Le retour d'expérience montre que la mise en œuvre et la pérennité d'un réseau de surveillance dépendent de l'adhésion des acteurs au projet. Ainsi, la concertation des acteurs du sol et du sous-sol urbain est une première étape incontournable pour poser les fondements du futur réseau de suivi : de la conception du réseau à la diffusion des données. Cet échange avec les acteurs de l'eau, du sol et du sous-sol urbain doit se poursuivre dans le temps.

Une liste (non exhaustive) des principaux acteurs peut être la suivante :

- services de la métropole et des communes (environnement, eau, urbanisme, foncier, risques technologiques…) ;
- Agence de l'eau ;
- DREAL (environnement, inspection des installations classées) ;
- DDT(M) (Police de l'eau) ;
- BRGM ;
- représentants de SAGE ;
- organismes/établissement disposant de données sur les eaux souterraines : services de transport en commun, Voies Navigables de France, aménageurs, gestionnaires de parking, représentants d'industriels, associations, observatoires…

Les échanges avec les différents acteurs du sol, du sous-sol et de l'eau peuvent se faire lors de réunions, d'ateliers techniques ou d'entretiens individuels et ont pour objectifs d'aborder les différents points suivants permettant de définir les fondements du futur réseau de suivi :

- connaitre les attentes des différents acteurs vis-à-vis de ce réseau ;
- recenser les problématiques « eaux souterraines » et secteurs géographiques associés ;
- aborder la question du financement et de la coordination du réseau ;
- avoir un avis sur la gestion, la mutualisation et les conditions de diffusion des données.

Afin de susciter l'intérêt des acteurs du sol et du sous-sol, la démarche proposée lors de l'étude du cas concret de l'agglomération de Lyon peut se décliner sur d'autres villes. Les outils de communication, consultables en Annexe 3, peuvent être adaptés pour mener différentes réunions et entretiens individuels.

5.1.1. Concertation entre les acteurs du sous et du sous-sol

Groupe de travail et coordination

La mise en place d'un observatoire, regroupant l'ensemble des acteurs du sol, du sous-sol et de l'eau, est une solution intéressante permettant un pilotage du réseau de surveillance. Un tel groupe de travail a été mis en œuvre pour piloter le réseau de suivi des eaux souterraines de la métropole de Strasbourg. L'objectif d'un observatoire est d'orienter les programmes d'actions selon les problématiques remontées par les partenaires et de définir les actions à mettre en œuvre pour assurer la surveillance de la nappe. Les objectifs du réseau évoluent ainsi au cours du temps, selon le bilan de l'état des eaux souterraines et selon les nouvelles problématiques. Les financements sont également multiples et mutualisés, répartis entre différents acteurs.

Vu le nombre important d'acteurs d'horizons variés voués à participer aux échanges, il apparait indispensable d'identifier un coordinateur. Celui-ci sera chargé du pilotage et de la gestion de tous les aspects de la mise en œuvre du réseau de surveillance. Le coordinateur devra être indépendant, reconnu par l'ensemble des acteurs et disposer des compétences techniques suffisantes pour pouvoir traiter de l'ensemble des thématiques. Il doit également être diplomate et être force de propositions, afin de dégager une solution ou un compromis parmi différentes actions proposées par les acteurs.

Il est par ailleurs recommandé de s'adjoindre ponctuellement les conseils d'experts en hydrogéologie (bureau d'études, consultant, établissement public, hydrogéologue agréé…) afin d'apporter une aide sur certains aspects techniques ciblés.

Financement

La question du financement est certainement l'une des premières questions qui se posent lors de la mise en place d'un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines. Le coût total du réseau (comprenant la conception, la réalisation, l'entretien et le suivi) dépend essentiellement du nombre d'ouvrages suivis, et donc de la superficie de la ville et de la densité d'ouvrages considérée, du programme analytiques (fréquence de prélèvements et analyses) et de l'éventuelle instrumentation d'ouvrages. A noter que ce coût est évalué précisément à la fin de la phase 4 une fois les caractéristiques du réseau définies.

Plusieurs arguments peuvent être avancés pour convaincre les financeurs, et notamment les élus de la métropole et des communes. Une étude socio-économique complète permet d'évaluer si les bénéfices d'un réseau de suivi des eaux souterraines compenseront ses coûts. A noter que les études bibliographiques issues du retour d'expérience ne mentionnent jamais les coûts associés à la mise en place et au suivi d'un réseau de surveillance. Aucune étude économique concernant la comparaison de ces coûts aux enjeux à protéger (abandon de captage, destruction d'un bâtiment…) n'a été retrouvée. Enfin, le présent guide méthodologique n'a pas eu pour objectif de fournir une étude socio-économique complète sur un cas concret.

Quelques éléments qualitatifs ressortent du retour d'expérience concernant les bénéfices économiques d'un réseau de surveillance des eaux souterraines. Ainsi, des économies

conséquentes pourraient être réalisées en mutualisant les coûts des réseaux existants et en palliant à l'absence de données sur certains secteurs. Les coûts potentiels engendrés par les complications sur le milieu urbain du fait d'une mauvaise gestion des eaux souterraines peuvent être élevés. Par exemple, la dégradation de la qualité d'un captage d'eau potable génèrera des coûts de traitement des eaux ou de recherche d'une nouvelle ressource, de réalisation d'un nouveau forage et de raccordement au réseau existant. Suite à des tassements de terrain du fait d'une surexploitation ou de remontées de la nappe, la déstabilisation de bâtiments peut conduire à des travaux coûteux. L'exemple de la ville de Boston est une parfaite illustration pour sensibiliser l'interlocuteur.

5.1.2. Problématiques et secteurs géographiques stratégiques

Afin d'être pertinent et pérenne, le réseau de surveillance doit permettre de caractériser le milieu souterrain et de répondre aux multiples problématiques rencontrées en milieu urbain. La mise de côté d'un objectif peut avoir pour conséquence le désintérêt d'un acteur, potentiellement financeur. La fédération des acteurs doit donc être réalisée autour d'objectifs collectifs et individuels, qui peuvent évoluer au cours du temps.

Lors des échanges, doit être recensé l'ensemble des différentes problématiques liées aux eaux souterraines auxquelles la ville est confrontée. Dans la mesure du possible, ces problématiques sont à associer à un secteur géographique de la ville, afin d'adapter au mieux certaines caractéristiques du futur réseau de suivi (notamment localisation et conception technique des ouvrages). A titre d'exemple, en se limitant au suivi de la qualité des eaux souterraines, les problématiques et secteurs géographiques associés peuvent concernés :

- le suivi de la qualité des eaux souterraines en amont d'un champ captant destiné à l'alimentation en eau potable (suivi de prévention et d'alerte) ;
- la détermination de l'étendue d'un panache de pollution en aval d'un site pollué et le suivi de son évolution, afin d'adapter les restrictions d'usage mises en place (surveillance spécifique) ;
- le suivi de la qualité des eaux souterraines à proximité et en relation avec un cours d'eau particulièrement vulnérable vis-à-vis des pollutions ;
- l'amélioration de la connaissance globale de la qualité des eaux souterraines sur l'ensemble du territoire de la ville
- …

Certains secteurs stratégiques peuvent être définis afin de prioriser les actions (exemple : protection d'un captage d'eau potable, zone en cours de reconversion…). La délimitation de secteurs stratégiques permet de relativiser l'importance de certains critères intégrés à la méthodologie de conception du réseau de surveillance, en exprimant des choix politiques en matière de gestion des eaux souterraines (par exemple : reconversion foncière, protection de captages d'eau potable ou de milieux humides, nappes soumises à de fortes pressions agricoles, panaches de pollutions connus…). Le réseau sera alors densifié, de façon pérenne ou temporaire, au droit de ces secteurs afin de répondre à un objectif précis. La définition d'un coordinateur prendra alors tout son sens pour définir les secteurs stratégiques prioritaires et pour décider du début et de la fin des suivis au droit de ces secteurs. En cas de l'arrêt du suivi, certains points de surveillance pourront intégrer définitivement le réseau de surveillance.

5.1.3. Mutualisation des données

Les principes de mutualisation et de diffusion, aux professionnels et au public, des données historiques ou acquises dans le cadre du futur réseau doivent être définis.

Il existe de nombreuses données existantes sur les eaux souterraines (quantités et qualité) et sur les sols à l'échelle d'une ville. La mutualisation de ces données historiques est souvent dans l'intérêt commun. Pour cela, il est utile d'identifier quelles sont les données disponibles, quels sont les acteurs détenteurs de données (ville, sociétés de transport en commun, industriels…) et quelles sont les conditions de bancarisation et de diffusion de ces données. La mutualisation des suivis futurs peut également être envisagée. Ainsi, dans le cadre d'une surveillance réglementaire des eaux souterraines (ICPE ou IOTA), les ouvrages pourront intégrer temporairement ou définitivement le réseau de la ville, notamment s'il s'agit d'un secteur stratégique. Les analyses réalisées sur ces points seront alors effectuées en commun.

Le caractère public ou confidentiel des données est fonction de son cadre d'acquisition. Dans le cas de données acquises par des organismes privés, l'accès et la diffusion des données peut être complexe. La directive 2003/4/CE concernant l'accès du public à l'information en matière d'environnement définit les règles d'accès et de diffusion de l'information détenue par les autorités publiques. Cette directive est l'application des principes de la Convention d'Aarhus. **Les données environnementales publiques doivent être, autant que possible, diffusées librement et gratuitement sur Internet, aux professionnels et au public :**

- Principe de diffusion des documents administratifs : Depuis l'adoption de la loi n°2016-1321 du 7 octobre 2016 (loi pour une République numérique), l'article L. 312-1-1 du CRPA impose aux administrations (notamment aux établissements publics) de plus de cinquante agents de publier en ligne, lorsqu'ils existent sous forme électronique, les documents administratifs détenus, et, lorsqu'elles sont mises à jour régulièrement, les bases de données ainsi que les données dont la publication présente un intérêt économique, social, sanitaire ou environnemental ;
- Diffusion des informations relatives à l'environnement : Les articles R. 124-4 et 5 du Code de l'environnement (en vigueur par décret n°2006-578 du 22 mai 2006) imposent aux établissements publics de diffuser certains documents et données notamment : les rapports établis par les autorités publiques sur l'état de l'environnement, les données ou résumés des données recueillies par les autorités publiques dans le cadre du suivi des activités ayant ou susceptibles d'avoir des incidences sur l'environnement.

Des conventions peuvent être signées avec les gestionnaires de points de mesures, ainsi que, si nécessaire, avec les organismes de mesure, pour assurer le respect des règles définies concernant la gestion et la transmission régulière des données. Ces conventions seront également l'occasion de fixer un protocole d'échantillonnage et d'analyse commun.

5.1.4. Gestion et diffusion des données

Les données du réseau de surveillance concernent les mesures piézométriques et analyses ainsi que les interprétations des résultats sous forme de rapports, chroniques et autres graphiques, cartographies ponctuelles, linéaires (isovaleurs) et spatialisées, modèles hydrogéologiques et hydrogéochimiques… Le moyen de diffusion des données peut prendre différentes formes : un rapport, une base de données, un système d'information géographique, un site internet pouvant intégrer l'ensemble des informations du milieu urbain, un espace cartographique et des outils de valorisation… Quel que soit le moyen de diffusion, celui-ci devra être adapté aux besoins des utilisateurs (collectivités, service de l'Etat, bureaux d'études, aménageurs, industriels, syndicats des eaux, particuliers…).

Il est fortement recommandé de déclarer le réseau de surveillance et de bancariser les données (niveaux et analyses) dans ADES, portail national de diffusion des données sur les eaux souterraines. Le site ADES fait partie du système d'information sur l'eau (SIE) conçu pour répondre aux besoins des parties prenantes en matière d'information environnementale publique dans le domaine de l'eau. Son objectif est de constituer un outil de collecte, de conservation et de partage des données sur les eaux souterraines, sous un langage commun géré par le SANDRE. Les données de qualité physicochimique et de niveaux des eaux souterraines d'ADES peuvent être intégrées facilement à d'autres sites grâce aux API Rest « Qualité des nappes d'eau souterraine » et « Piézométrie » développées dans le cadre de Hub'eau (hubeau.eaufrance.fr). Le projet Hub'eau favorise l'accès aux données du Système d'Information sur l'Eau (SIE) dans des formats simples et permettant une réutilisation : prélèvements en eau, piézométrie, qualité des eaux souterraines, hydrométrie qualité des cours d'eau… Certaines API proposent la fourniture des observations des niveaux d'eau superficielle et souterraine dites quasi "temps réel", certains producteurs mettant à jour les données toutes les 5 à 60 minutes pour les cours d'eau et tous les jours pour les eaux souterraines.

5.2. COLLECTE DES DONNEES ET COMPREHENSION DU CONTEXTE DE L'AGGLOMERATION

L'adhésion de l'ensemble des acteurs permet d'identifier les organismes et personnes susceptibles de détenir des informations utiles à la mise en place du réseau de suivi, d'inventorier l'ensemble des données et de lister les lacunes de connaissances. La méthodologie pour la conception d'un réseau de surveillance des eaux souterraines en milieu urbain nécessite d'avoir au préalable caractérisé, dans toute sa complexité, le fonctionnement du milieu naturel et anthropisé urbain (sol, sous-sol et eaux souterraines). A la manière du schéma conceptuel, qui constitue les fondations de toute démarche de gestion des sites et sols pollués en France, cet état des lieux doit permettre de croiser les informations relatives aux sources de pollution potentielles et avérées, aux voies de transfert et aux enjeux à protéger identifiés comme prioritaires (usages de l'eau par exemple). Les informations à acquérir nécessitent de collecter des données à partir d'études, de documents cartographiques ou spatialisés, de banque de données, ainsi que, si nécessaire, lors de reconnaissances de terrain et d'acquisition de données complémentaires. Les investigations ne doivent pas se limiter aux frontières administratives mais bien aux limites des aquifères concernés. En effet, les eaux superficielles et souterraines font partie d'un même hydrosystème complexe et la conception du réseau doit tenir compte des relations spatiales des différents aquifères avec la surface (occupation des sols et eaux). L'ensemble des données à collecter lors de la phase 1 sont présentées en Annexe 5 et résumées ci-après. Elles permettront de mener à bien les phases suivantes de la méthodologie (Tableau 2).

Annexe 5 / Phase de la méthodologie	**Phase 2**	**Phase 3**	**Phase 4**	**Phase 5**	**Phase 6**
Données sur les sources de pollution					
1.1. Sources potentielles de pollution	Oui		Oui		
1.2. Sources avérées de pollution	Oui	Oui	Oui		
1.3. Qualité des eaux souterraines		Oui	Oui		
1.4. Liste des substances polluantes (potentiellement) problématiques	Oui		Oui		
Données sur les enjeux à protéger					
2.1. Populations et usage des eaux souterraines		Oui	Oui		
2.2. Ressources et milieux naturels		Oui	Oui		
2.3. Sources de données		Oui	Oui		
Données sur les voies de transfert					
3.1. Contextes géologique et hydrogéologique	Oui	Oui			
3.2. Contexte hydrologique	Oui	Oui			
3.3. Occupation des sols et aménagements du sol et du sous-sol	Oui	Oui			
Données sur les points d'eau existants					
4.1. Points d'eau				Oui	
4.2. Réseaux qualitatifs des eaux souterraines			Oui	Oui	
4.3. Réseaux quantitatif des eaux souterraines			Oui	Oui	

Tableau 2 : Données à collecter et utilisation lors des différentes phases de la méthodologie proposée.

5.2.1. Données sur les sources de pollution et la qualité des eaux souterraines

Les sources de pollution en milieu urbain peuvent être de nature variée : activités industrielles et de service, activités de transport, activités domestiques et habitat, aménagements et constructions, activités d'entretien… Afin d'évaluer l'état des eaux souterraines et les risques de dégradation de leur qualité, une démarche d'identification des sources de pollution suivante peut être entreprise :

- identifier les sources potentielles de pollution (Annexe 5- 1.1 Sources potentielles de pollution) ;
- identifier les sources avérées de pollution (Annexe 5 - 1.2 Sources avérées de pollution) ;
- interpréter les données existantes sur la qualité des eaux souterraines (Annexe 5 - 1.3 Qualité des eaux souterraines) pour identifier les impacts avérés ;
- croiser les bases de données avec la matrice activités/polluants (Annexe 5 - 1.4 Liste des substances polluantes (potentiellement) problématiques).

S'il est connu, les données qualité doivent comparées au fond géochimique naturel, afin que celui-ci ne soit pas confondu avec une pollution anthropique.

5.2.2. Données sur les enjeux à protéger

Les enjeux potentiels à protéger sont représentés par les populations (Annexe 5 - 2.1 Populations et usage des eaux souterraines) ainsi que par le milieu naturel (Annexe 5 - 2.2 Ressources et milieux naturels). Ces enjeux sont à identifier en étroite relation avec les acteurs de l'agglomération afin de réaliser l'inventaire le plus précis possible (Annexe 5 - 2.3 Sources de données). Toutefois, des recherches documentaires apporteront également de nombreuses informations.

Les voies d'exposition entre ces enjeux à protéger et les eaux souterraines potentiellement polluées sont nombreuses et doivent être identifiées. Elles concernent les usages actuels des sols et des eaux souterraines (eau potable, irrigation agricole, potagers, parcs et jardins, loisirs, nettoyage des voiries, eau industriel, chantier avec pompage…), les usages futurs (aménagement d'une nouvelle zone) mais aussi les expositions indirectes (phénomène de dégazage des eaux souterraines et de remontées de vapeurs dans les bâtiments).

5.2.3. Données sur les transferts

Les transferts regroupent l'ensemble des phénomènes permettant de lier les enjeux à protéger et les différentes sources potentielles et avérées de pollutions. Pour évaluer la possibilité de transfert des polluants, il est nécessaire d'acquérir un certains nombres d'éléments sur :

- le contexte géologique et hydrogéologique (Annexe 5 - 3.1 Contextes géologique et hydrogéologique) ;
- le contexte hydrologique (Annexe 5 -3.2 Contexte hydrologique) ;
- les aménagements souterrains (Annexe 5 -3.3 Occupation des sols et aménagements du sol et du sous-sol).

A l'échelle d'un territoire urbain, la mise en œuvre d'un modèle hydrodynamique sur l'ensemble de l'hydrosystème est très souvent indispensable pour appréhender les modifications du cycle de l'eau (recharge et exutoires) et des écoulements des eaux souterraines (barrières étanches et drains). Un modèle en régime permanent doit permettre de modéliser l'état naturel de l'hydrosystème : recharges, exutoires, écoulements, caractéristiques hydrodynamiques, relations entre aquifère… Un recensement, une localisation et une description précise de l'ensemble de aménagements anthropiques du sol et du sous-sol sont nécessaires pour connaître les éventuelles perturbations sur les niveaux et l'écoulement des eaux souterraines et caler un modèle en régime transitoire. Ce recensement concerne notamment les prélèvements, les rejets et fuites de réseaux (volumes d'eau), les ouvrages souterrains (section et profondeur), les collecteurs et drains (diamètre, profondeur et volume d'eau), les caractéristiques des berges des cours d'eau, les surfaces imperméabilisées...

Un modèle hydrogéochimique permet de caractériser la qualité des eaux souterraines, de délimiter les panaches de pollutions et de suivre leurs évolutions dans le temps. Le couplage avec un modèle hydrogéologique fournit un outil puissant de gestion et d'anticipation, permettant de prédire les modifications de la qualité des eaux souterraines et la migration des panaches de pollution. On pourra se référer au guide OPUSS qui présente de nombreux éléments de synthèse bibliographique et des retours d'expérience relatifs à la modélisation des transferts de polluants en milieu urbain (Le Guern C. et al., 2012).

5.2.4. Données sur les points d'eau existants

Le réseau de surveillance peut se baser sur des points d'eau existants (Annexe 5 - 4.1 Points d'eau) faisant éventuellement partie de réseaux qualitatifs (Annexe 5 - 4.2 Réseaux qualitatifs des eaux souterraines) et/ou quantitatifs (Annexe 5 - 4.3 Réseaux quantitatif des eaux souterraines.

5.3. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON

Pour rappel, les entretiens individuels avec les acteurs de l'agglomération de Lyon ont été menés en 2017. Les outils de communication élaborés pour mener ces réunions sont consultables en Annexe 3. Les restitutions des entretiens sont retranscrites en Annexe 4.

5.3.1. Concertation des acteurs

Les discussions avec les acteurs de l'agglomération de Lyon ont porté sur l'intérêt de disposer d'un réseau de suivi des eaux souterraines en milieu urbain ainsi que sur les objectifs de surveillance et sur les secteurs problématiques et prioritaires. Les questions de pérennité du réseau et des ouvrages, de mutualisation et de diffusion des données, de financement, de gestion et de coordination du projet ont également été abordées. Les restitutions des entretiens, retranscrites en Annexe 4, synthétisent les principaux ressentis et idées exprimés par les différentes personnes rencontrées.

La connaissance des eaux souterraines en milieu urbain reste très imparfaite mais est considérée comme une priorité. Ainsi, les personnes interrogées ont montré un intérêt important pour la mise en place d'un réseau de suivi des eaux souterraines, notamment dans le cadre d'une politique d'aménagement durable de l'espace urbain et de gestion des sites potentiellement pollués et des anciennes friches industrielles.

Actuellement, les services de l'Etat en charge de la gestion de l'eau soulignent l'absence de vision à une échelle comprise entre des réseaux de connaissance régionaux (BRGM, Agence de l'eau et SAGE de l'Est Lyonnais) et des réseaux d'investigations et de surveillance spécifique ponctuels et locaux, déployés à l'échelle du site (suivi des ICPE et IOTA, protection des champs captants). Actuellement, les décisionnaires se retrouvent souvent démunis lors de l'instruction d'un dossier Police de l'eau, du fait de l'absence de données historiques et/ou actuelles sur la qualité et les écoulements des eaux souterraines. La mise en œuvre d'un réseau de suivi opérationnel permettrait d'avoir une approche globale, intégrant les effets cumulatifs qualitatifs et quantitatifs, sur l'ensemble du territoire. Une vision détaillée des circulations d'eaux souterraines, notamment par la conception de modèles hydrogéologiques plus robustes, permettrait une meilleure anticipation et une meilleure réaction des parties prenantes en cas de problèmes majeurs impliquant les eaux souterraines.

La mutualisation des données semble indispensable, afin d'optimiser les différents suivis et leurs coûts, de combler les lacunes de connaissances, notamment sur les secteurs potentiellement pollués, et d'anticiper le suivi au droit des futurs secteurs stratégiques (reconversion foncière, futur champ captant…). Un enjeu particulier consiste à construire une connaissance commune et partagée entre les services décisionnaires de l'Etat, les bureaux d'études, les industriels et les aménageurs. Certains producteurs de données ont insisté sur la confidentialité de certaines informations.

Enfin, les entretiens ont démontré que, pour être pérenne, le réseau doit fédérer les acteurs et donc répondre aux multiples problématiques de qualité et de quantité des eaux souterraines.

Dans le cas de l'agglomération lyonnaise, les points bloquants risquent d'être de trouver un coordinateur du réseau et des financements pérennes.

5.3.2. Secteurs stratégiques

Les secteurs stratégiques listés par les acteurs de l'agglomération de Lyon concernent principalement les nappes des alluvions récentes et des couloirs fluvioglaciaires. Les problématiques évoquées concernent des pollutions connues (arrêtés municipaux de restriction d'usage de l'eau) ou suspectées, la protection de la ressource (captages d'eau potable) et la réhabilitation en cours ou prévue d'anciennes friches industrielles (Figure 15). La protection de zones humides en vallée du Rhône, en relation avec la nappe alluviale et abritant un écosystème remarquable, a également été abordée.

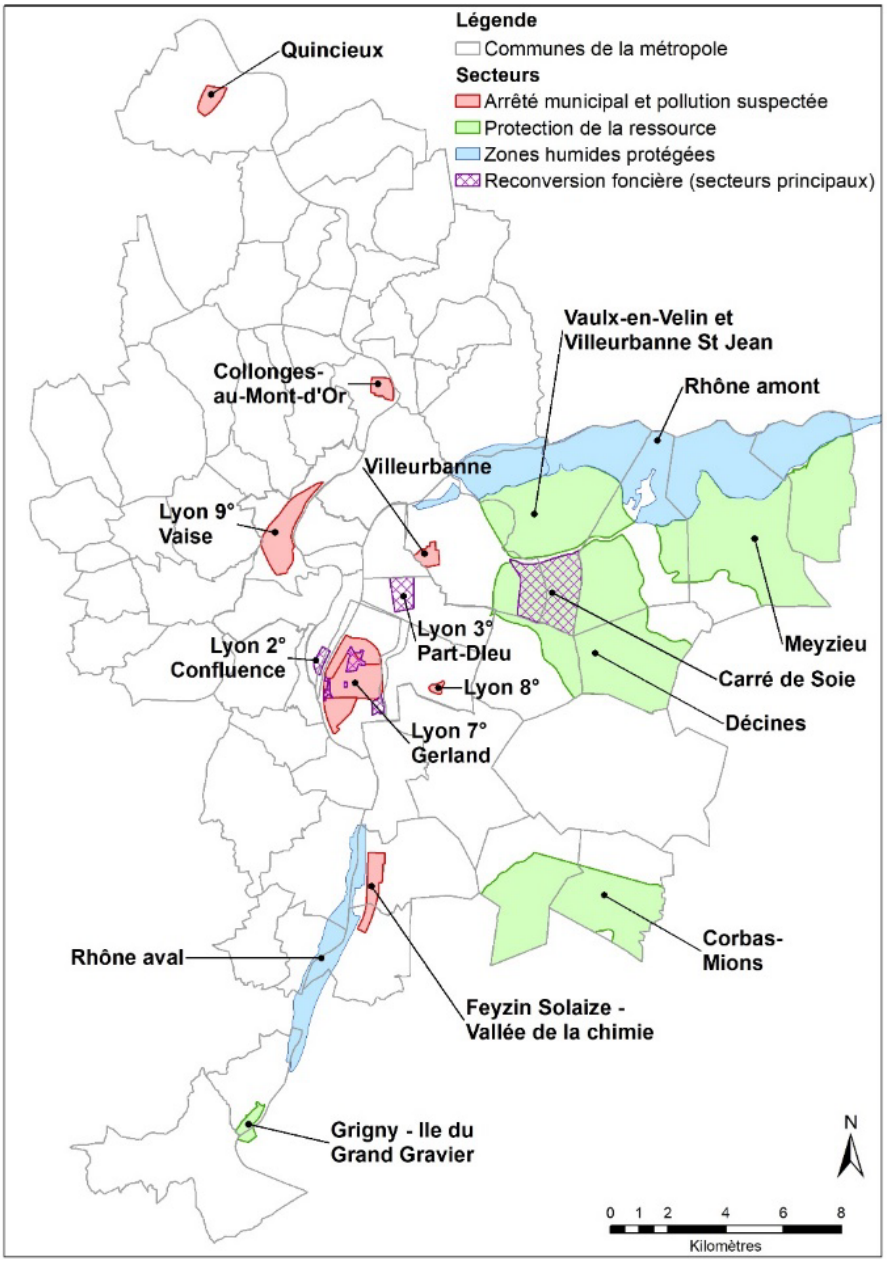


Figure 15 : Secteurs stratégiques de la métropole de Lyon.

Le secteur de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean est soumis à une forte pression historique, industrielle et agricole. La nappe du couloir fluvioglaciaire de Décines, entre Chassieu et Vaulx-en-Velin, est impactée par des pollutions au pyralène, en trichloroéthylène (solvant chloré), en nitrates et en pesticides. Le secteur est situé en amont immédiat du champ captant de Crépieux-Charmy, qui représente une ressource stratégique et la principale ressource d'alimentation en eau potable de la ville. De plus, des aménagements fonciers sont en cours ou prévus et plusieurs friches industrielles sont actuellement réhabilitées. Ce secteur permet donc de répondre à des objectifs de protection de la ressource en eau et de reconversion foncière.

5.3.3. Collecte des données et compréhension du contexte de l'agglomération

Un inventaire des études et des données existantes a été effectué concernant :

- la géologie et l'hydrogéologie : compréhension du système aquifère, relations entre les aquifères, écoulements des eaux souterraines, relations avec les cours d'eau, vulnérabilité des eaux souterraines, etc ;
- le foncier : historique de l'occupation des sols, imperméabilisation des sols, aménagements du sous-sol, usages des sols et des eaux souterraines, secteurs sensibles, évolutions prévues et secteurs stratégiques actuels et futurs, etc ;
- les sources potentielles et avérées dans les sols et les eaux souterraines.

Le modèle géologique et hydrogéologique existant permet de définir l'extension des formations aquifères et aquicludes et de visualiser les écoulements souterrains incluant les barrières hydrauliques, les drains, les prélèvements et les rejets (Amraoui N. et al., 2005 ; Seguin J.-J. et Nicolas J., 2006 ; Seguin J.-J., 2008). De nombreuses informations géoréférencées sont disponibles dans une base de données gérée par les services de la métropole et accessible librement et gratuitement : data.grandlyon.com.

Les informations relatives à certains réseaux et points de surveillance ont été récupérées auprès des gestionnaires de réseaux et auprès des services collectant la déclaration d'ouvrages. Pour rappel, l'article 131 du Code Minier impose la déclaration de tout sondage, ouvrage souterrain ou forage dont la profondeur dépasse 10 mètres. Ces points sont enregistrés en BSS (Banque de données du Sous-Sol). S'il s'agit d'un puits ou forage destiné au prélèvement (< 1000 m^3/an) ou à des fins d'usage domestique, la déclaration est obligatoire en mairie au titre de l'article L. 2224-9 du Code général des collectivités territoriales. Les ouvrages dont l'usage n'est pas domestique (irrigation, industriel) ou dont le volume annuel est supérieur à 1000 m^3 relèvent du Code de l'Environnement et nécessitent une déclaration et/ou une demande d'autorisation au service en charge de la police de l'eau ou des ICPE (DDT(M), DREAL…). Enfin, le décret n°2015-15 du 08/01/15 définit et réglemente les activités de géothermie dite de « minime importance ».

Les informations relatives à certains réseaux et points de surveillance ont été récupérées auprès du SAGE de l'Est lyonnais, de la DDT (points IOTA et ICPE), de la Métropole (points de surveillance de secteurs en reconversion), de la Compagnie Nationale du Rhône. A noter que les services communaux gérant les voiries, les parcs et jardins, les équipements sportifs et les cimetières utilisent des forages pour l'entretien et l'arrosage. Ces points ne sont souvent pas déclarés mais constituent des ouvrages intéressants pour la conception d'un réseau de surveillance.

6. Phase 2 : Estimation d'une densité de points de surveillance

Lors de la phase 2, des cartographies sont dressées sur la vulnérabilité des eaux souterraines, en fonction des modes de transferts identifiés ainsi que sur les pressions passées et actuelles exercées par les activités potentiellement polluantes du territoire (Figure 16). Les méthodes de caractérisation de la vulnérabilité et de la pression proposées sont basées sur des méthodes existantes, impliquant une nécessaire simplification de la réalité (Comte J.P. et al., 1997 ; Vernous J.F. et al., 2007, Ferral A. et al., 2014). La méthodologie de ce guide pourra évoluer sur la base de retours d'expérience et du développement de nouvelles méthodes appliquées au milieu urbain et à ses spécificités.

Les éléments de diagnostic sont ensuite confrontés afin de délimiter des secteurs cohérents en terme de risque potentiel de pollution des eaux souterraines. Cette étape permet de hiérarchiser les secteurs pour la mise en œuvre d'un réseau de surveillance efficace et durable. La densité de points de suivi est déterminée selon les secteurs, au regard des enjeux actuels et futurs de protection de la ressource.

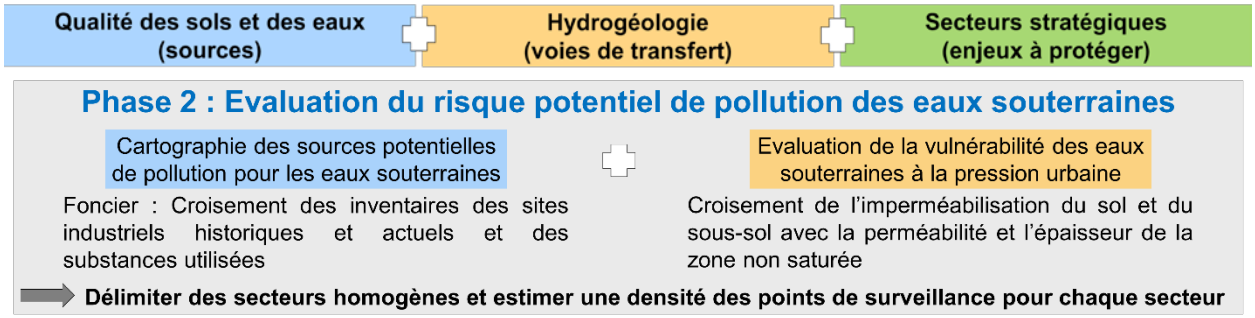


Figure 16 : Méthodologie de la phase 2 - évaluation du risque potentiel de pollution des eaux souterraines.

L'ensemble des données à collecter sont présentées en Annexe 5. Elles concernent :

- les sources de pollution (1.1 Sources potentielles de pollution - 1.2 Sources avérées de pollution - 1.4 Liste des substances polluantes (potentiellement) problématiques) ;
- et les transferts (3.1 Contextes géologique et hydrogéologique - 3.2 Contexte hydrologique - 3.3 Occupation des sols et aménagements du sol et du sous-sol).

6.1. CARTOGRAPHIE DES SOURCES POTENTIELLES DE POLLUTION ET DE LA PRESSION POLLUANTE POTENTIELLE POUR LES EAUX SOUTERRAINES

La pression polluante potentielle sur les sols et les eaux souterraines exprime les risques identifiés ou potentiels d'atteinte à la qualité des eaux souterraines. Afin de l'évaluer, la démarche suivante peut être entreprise :

- identifier les potentielles sources sol de pollution : sites industriels, activités de service, activités agricoles, réseau de collecte des eaux pluviales, réseau d'eaux usées, cimetières, parcs et jardins publics… ;
- identifier les sources avérées de pollution des eaux souterraines ;

- évaluer la pression potentielle pour les eaux souterraines exercées par les sources identifiées.

Afin d'identifier les sources potentielles et avérées de pollution pour les eaux souterraines, une recherche est à envisager quel que soit le type de polluants suspectés, métalliques ou organiques, et quel que soit l'âge, récent ou ancien, du ou des évènements. Diverses approches complémentaires sont alors à aborder : exploiter les inventaires existants sur les sources potentielles et avérées (Annexe 5 – 1.1., 1.2. et 1.4.), recenser et localiser lors d'enquêtes de terrain les sites ayant pu générer des substances polluantes, enquêter sur les pratiques agricoles (épandage, boues de STEP, phytosanitaires, arrosage par une rivière polluée, stockage sur des aires pouvant être polluées…). Concernant les bases existantes (Annexe 5 - 1.1. et 1.2.), un travail de recherche de localisation précise est à envisager pour les sites dont les coordonnées renseignées correspondent au centroïde de la commune.

En s'appuyant sur les données existantes, une cartographie des activités industrielles et de service passées et actuelles peut être réalisée. Une densité de sites est calculée pour une interprétation plus aisée, le nombre de sites pouvant être très élevé sur certains secteurs historiquement urbanisés et industrialisés. Le territoire de l'agglomération est alors découpé en un maillage carré régulier, adapté à l'échelle et au contexte urbain de la ville étudiée. A titre d'exemple sur la Métropole de Lyon, une maille de 250 m de côté a été favorisée. La densité de sites est ensuite calculée au sein de chaque maille puis hiérarchisée afin de rendre compte de la pression potentielle des sources de pollution sur les eaux souterraines.

Une analyse affinée peut également être ciblée pour un type de polluant. Ce travail est notamment réalisé lorsque, lors des entretiens avec les acteurs de l'agglomération, une substance ressort comme problématique sur une partie ou l'ensemble du territoire urbain. Il est proposé d'utiliser la matrice de corrélation Activités/Polluants, outil permettant une identification des substances ou familles de substances (les plus fréquemment rencontrées) potentiellement associées à une ou des activités industrielles (Annexe 5 – 1.4). En pratique, la matrice permet de définir, en fonction du code NAF renseigné dans les bases de données utilisées pour identifier les sources sol potentielles, les composés potentiellement présents dans les eaux souterraines. Elle permet de localiser les sites émettant potentiellement certains groupes de substances dans le milieu « eau souterraine » mais ne permet pas de quantifier une probabilité de présence. Les conditions d'utilisation de la matrice activités/polluants comprennent les points suivants :

- l'utilisation de la matrice de corrélation activités/polluants ne remplace en aucun cas les études spécifiques à mener sur chaque site ;
- les limites de l'outil sont liées à la non exhaustivité des données sources ne permettant généralement pas de remonter aux substances chimiques spécifiques et à leur qualité variable (fiabilité des prélèvements et des mesures pour les bases de données, archives peu documentées ou manquantes sur les substances ou produits associés aux anciens sites industriels dans BASIAS et aux sites pollués dans BASOL…) ;
- les codes NAF renseignés dans les bases de données correspondent majoritairement au code NAF de l'activité principale du site industriel ou activité de service. Toutes les activités potentiellement polluantes du site industriel ou activité de service ne sont pas englobées dans ce code NAF.

A noter que certaines bases de données ne fournissent pas le code NAF et il faut alors trouver un équivalent entre code activité (fourni dans les bases BASOL ou BASIAS) et le code NAF, rendant parfois cette tâche fastidieuse si la conversion se fait manuellement.

N.B. : le travail réalisé dans le cadre de ce rapport méthodologique a été réalisé sur la base de la version v0.2 de la matrice activités/polluants (Aubert N. et al., 2014.). Depuis décembre 2018,

un site internet dédié à la base de données BD ActiviPoll (base de données permettant d'identifier des typologies de substances potentiellement liées à des sites industriels : ssp-infoterre.brgm.fr/bd-activipoll) permet d'accéder à la version la plus à jour de la matrice. Une version 2.7 a été publiée en janvier 2019, comprenant un système de notation différent de la matrice utilisée pour le présent rapport.

6.2. EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES NAPPES A LA PRESSION URBAINE

La vulnérabilité intrinsèque d'une nappe correspond à la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de l'infiltration de polluants de surface liés à des activités humaines. Elle dépend de la capacité d'infiltration du sol et du sous-sol, qui se caractérise par un certain nombre de critères (Tableau 3). Les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de l'hydrosystème doivent être collectées pour déterminer ces critères (Annexe 5 – 3.1. et 3.2.). Il convient de différencier les systèmes aquifères libres et les systèmes aquifères captifs. Certains critères sont communs mais d'autres, comme le sol et la zone non saturée, diffèrent. Pour une nappe captive, il est notamment nécessaire d'identifier les relations avec la nappe sus-jacente lorsque celle-ci existe.

<table>
<tr><th colspan="3">VULNERABILITE INTRINSEQUE</th></tr>
<tr><th>Sol</th><th>Zone non saturée (ZNS)</th><th>Zone saturée</th></tr>
<tr><td>Topographie
(pente)</td><td>Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS</td><td>Type de nappe
(libre ou captive)</td></tr>
<tr><td>Pédologie
(perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols)</td><td>Temps de transfert
(perméabilité verticale)</td><td>Temps de résidence
(dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)</td><td>Relation eaux souterraines/eaux superficielles</td></tr>
<tr><td></td><td>Structure de la ZNS
(variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)</td><td>Piézométrie
(sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique)</td></tr>
<tr><td></td><td>Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci</td><td>Epaisseur de l'aquifère
(quantité de réserve)</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>La recharge
(recharge annuelle nette).</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>Type de système hydrogéologique
(caractères plus ou moins capacitif et transmissif)</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Battement de nappe</td></tr>
<tr><td colspan="3">Fracturation (directions et densité)</td></tr>
</table>

Tableau 3 : Critères conditionnant la vulnérabilité des eaux souterraines (source : Mardel V. et Gravier A., 2005).

Au cours des 20 dernières années, de nombreuses méthodes d'évaluation de la vulnérabilité ont été développées, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques, à des méthodes de pondération entre différents critères (Vrba et Zaporozec, 1994). La méthode de superposition et d'indexation DRASTIC est la méthode la plus couramment utilisée à l'international pour les bassins sédimentaires. Des méthodes spécifiques, comme RISK, ont été conçues pour les aquifères karstiques. Le rapport relatif à la vulnérabilité des aires d'alimentation des captages vis-à-vis des pollutions diffuses définit la notion de vulnérabilité intrinsèque et propose une revue bibliographique ainsi qu'une comparaison des différentes méthodes utilisées à l'international (Vernoux J.F. et al., 2007).

En France, la vulnérabilité intrinsèque est approchée par croisement entre l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) et l'épaisseur de la zone non saturée (Mardhel V. et Gravier A., 2005). L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR), développé par le BRGM, évalue la capacité des formations géologiques naturelles à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface. Il se fonde sur la comparaison d'un réseau hydrographique théorique (issu d'un modèle numérique de terrain) au réseau hydrographique naturel (BD Carthage) conditionné par la géologie. Cependant, l'échelle de validité de la carte de l'IDPR disponible sur la France est de 1/50 000 et n'est donc valable que pour des grandes masses d'eau (plusieurs dizaines de km^2). De plus, cette approche simplifiée de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque s'intéresse uniquement à l'infiltration. Les autres phénomènes indirects pouvant participer à la recharge (drainance, apport des eaux de surface, recharge urbaine…) ou l'amenuiser (écoulements hypodermiques) ne sont pas pris en compte.

Le milieu urbain modifie le cycle de l'eau (Annexe 1) et influe sur certains des critères pris en compte lors du calcul de la vulnérabilité, par exemple :

- la perméabilité et la nature des sols (imperméabilisation des surfaces, anthropisation des sols…) ;
- l'épaisseur et la nature de la zone non saturée (remblais, aménagements souterrains…) ;
- la recharge (imperméabilisation des sols, fuites des réseaux, arrosage et irrigation excessifs…) ;
- la relation avec les eaux superficielles (canalisations des cours d'eau, drains) et avec les autres aquifères (mise en relation d'aquifères par des forages mal conçus ou par des aménagements ayant détruit la couche imperméable séparant deux aquifères).

L'occupation des sols et les aménagements du sous-sol doivent alors être pris en compte lors de la cartographie de la vulnérabilité en milieu urbain (Annexe 5 – 3.3.). Certains aménagements peuvent être considérés comme potentiellement infiltrants : stades sportifs, parcs et jardins, voies ferrées, chemins et sentiers, cimetières, zones humides, terrains agricoles, ilots directionnels (ronds-points). D'autres aménagements sont considérés comme imperméables, bien que leur dégradation puisse permettre une infiltration des eaux : bâtiments, parkings, routes et trottoirs. A titre d'exemple, les villes d'Hambourg (geoportal-hamburg.de/geo-online) et de Milan (Colombo L. et al, 2017) actualisent régulièrement des cartes détaillées de l'imperméabilisation de leurs sols permettant d'appréhender la recharge des eaux souterraines (Figure 17).

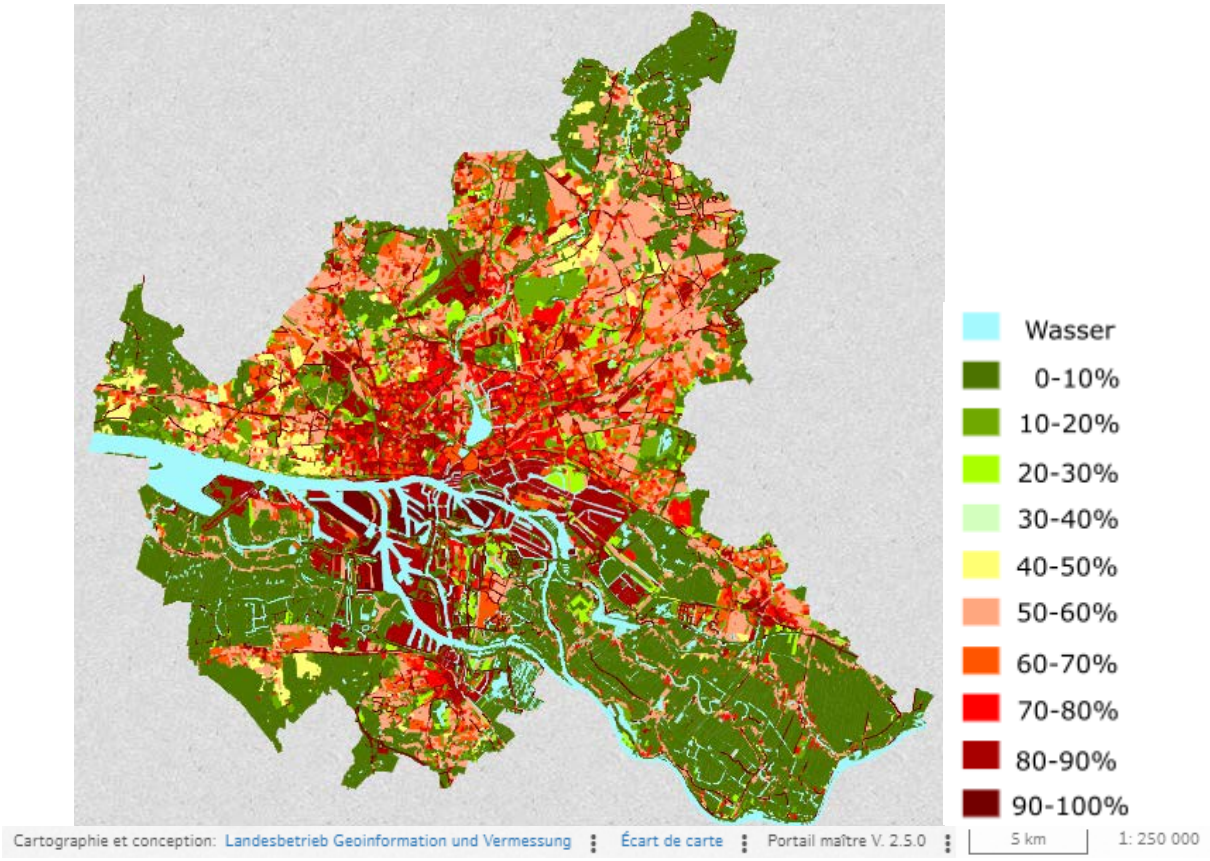


Figure 17 : Cartographie de l'imperméabilisation des sols à Hambourg en 2017 (source : geoportal-hamburg.de/geo-online/)

6.3. DEFINITION DE SECTEURS ASSOCIES A UNE DENSITE DE POINTS DE SURVEILLANCE

Si un système aquifère est jugé vulnérable, le risque d'infiltration d'une pollution de surface vers la nappe est a priori élevé. Toutefois, ce risque n'est probable que s'il existe des activités susceptibles de générer une pollution. Le croisement des cartographies de vulnérabilité et de pression potentielle à la pollution des eaux souterraines permet donc de définir un risque potentiel de pollution des eaux souterraines et de proposer une densité graduée de points de suivi selon des secteurs homogènes en terme de risque. Ainsi, la densité du réseau de suivi sera faible au droit d'un secteur à risque faible, c'est-à-dire pour lequel il n'existe pas ou peu de sources potentielles de pollution et pour lequel la vulnérabilité de la nappe à ces pressions est faible. A l'inverse, elle sera élevée si les sources potentielles sont nombreuses et la vulnérabilité forte.

Le suivi de base correspond à une surveillance minimum de secteurs peu ou pas influencés par les activités anthropiques et d'une nappe peu vulnérable ou d'importance mineure :

- Secteurs sans nappe : 0 point/km^2 ;
- Secteurs non stratégiques avec un risque potentiel de pollution des eaux souterraines faible : 0,1 à 0,2 point/km^2.

Le suivi usuel correspond à la surveillance du milieu urbain anthropisé ou d'une nappe vulnérable à la pression urbaine. La densité de points de surveillance est graduée en fonction de la pression potentielle et de la vulnérabilité des eaux souterraines. Le suivi doit permettre de contrôler la

situation et ses éventuelles évolutions pour être à même d'identifier les anomalies qualitatives et quantitatives :

- Secteurs non stratégiques avec un risque potentiel de pollution des eaux souterraines moyen : 0,2 à 0,5 point/km^2 ;
- Secteurs non stratégiques avec un risque potentiel de pollution des eaux souterraines fort : 0,5 à 2 point/km^2.

Un suivi renforcé, correspondant à une surveillance détaillée au droit de secteurs stratégiques définis avec les acteurs de l'agglomération, peut également être intégré dans cette approche. Ces secteurs stratégiques présentent notamment des risques ou des impacts identifiés. Une densité plus importante de points est alors définie :

- Secteurs stratégiques avec un risque potentiel de pollution des eaux souterraines faible : 0,5 à 2 points/km^2 ;
- Secteurs stratégiques avec un risque potentiel de pollution des eaux souterraines moyen : 2 à 5 points/km^2 (par exemple : 54 points/km^2 à Boston, soit 811 points sur 15 km^2).
- Secteurs stratégiques avec un risque potentiel de pollution des eaux souterraines fort : 5 à plusieurs dizaines de points/km^2 (par exemple : 54 points/km^2 à Boston sur 15 km^2).

Les valeurs de densité proposées se basent sur le retour d'expérience sur les réseaux urbains existants à l'international et restent évidemment indicatives. Plus le nombre d'ouvrages suivis est élevé, mieux le milieu est caractérisé dans toute sa complexité et plus la probabilité d'interception d'un panache de pollution augmente. Néanmoins, les coûts liés à ce suivi peuvent alors être très importants et être de nature à remettre en cause la pérennité du réseau si les enjeux ne sont pas très importants. Le choix de la densité est fréquemment un compromis à trouver entre la précision, le coût et les enjeux.

6.4. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON

6.4.1. Cartographie des sources potentielles de pollution et de la pression potentielle pour les eaux souterraines

Lors de l'extraction des bases en 2018, 9 188 sites BASIAS, 231 sites BASOL et 429 sites ICPE, dont 24 localisés au centroïde de la commune, étaient identifiés sur les 59 communes de la Métropole de Lyon (Figure 18). Sur le territoire du secteur stratégique de Vaulx-en-Velin, sont répertoriées 212 sites BASIAS, 19 ICPE et 7 sites BASOL. Tous ces sites sont répertoriés par des identifiants différents, ce qui ne permet donc pas de lier les sites entre eux.

Les 9 188 sites BASIAS et leurs données associées sont issues en grande partie des inventaires IHR (Inventaire Historique de sites industriels et d'activités de service du Rhône) et IHU (Inventaire Historique Urbain) de la Métropole de Lyon (Clozel Leloup B., 2018). Ce recensement compte 5 000 sites industriels et activités de service, ayant été en activité sur la ville de Lyon depuis le XIX^{ème} siècle et plus de 11 000 sites sur le département du Rhône. Ce constat traduit la forte activité industrielle historique que le territoire a connu par le passé. La densité de sites dans certains quartiers lyonnais et la succession des activités sur un même site (jusqu'à 35 codes NAF) rendent une exploitation de cette base très complexe et il est difficile d'en dégager des informations spatiales sur la distribution des activités en fonction des secteurs géographiques. Néanmoins, ce recensement permet aux politiques locales de prioriser le développement et l'aménagement de certains quartiers. La localisation des sites étant à l'échelle du parcellaire, elle permet une haute résolution de la pression industrielle sur les sols de la Métropole de Lyon.

182 sites industriels déclarent en 2016 dans la base de données du registre des émissions polluantes (IREP) sur le territoire de la Métropole de Lyon, dont :

- 20 sites déclarant des rejets dans le milieu eau (rejet direct majoritairement) ;
- 46 sites déclarant des prélèvements en eau (dans les eaux souterraines et le réseau majoritairement) ;
- 9 sites produisent des déchets non dangereux et 20 sites traitent des déchets non dangereux ;
- 121 sites produisent des déchets dangereux et 26 sites traitent des déchets dangereux.

Le territoire de la Métropole de Lyon a été découpé en mailles carrées de 250 m de côté. Cette échelle correspond à un îlot urbain du centre de la ville de Lyon et semble adaptée à contexte urbain de l'agglomération pour le traitement des données décrit ci-après. Pour chaque maille, le nombre de sites ICPE, BASOL et BASIAS a été comptabilisé, rendant ainsi compte du nombre total de sites industriels identifiés dans les bases de données de sources sol de pollutions (Figure 18). Les données IREP n'ont pas été intégrées compte-tenu de la localisation des sites au centroïde de la commune. Les sources de pollutions des eaux souterraines potentielles et avérées sont localisées sur l'ensemble du territoire, avec une concentration faible en vallées, forte sur les parties avales des couloirs fluvioglaciaires et très importante sur la ville de Lyon.

Sur le secteur de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean, les sources potentielles et avérées de pollution sont nombreuses. Le secteur est soumis à une forte pression historique, industrielle à l'ouest et agricole à l'est.

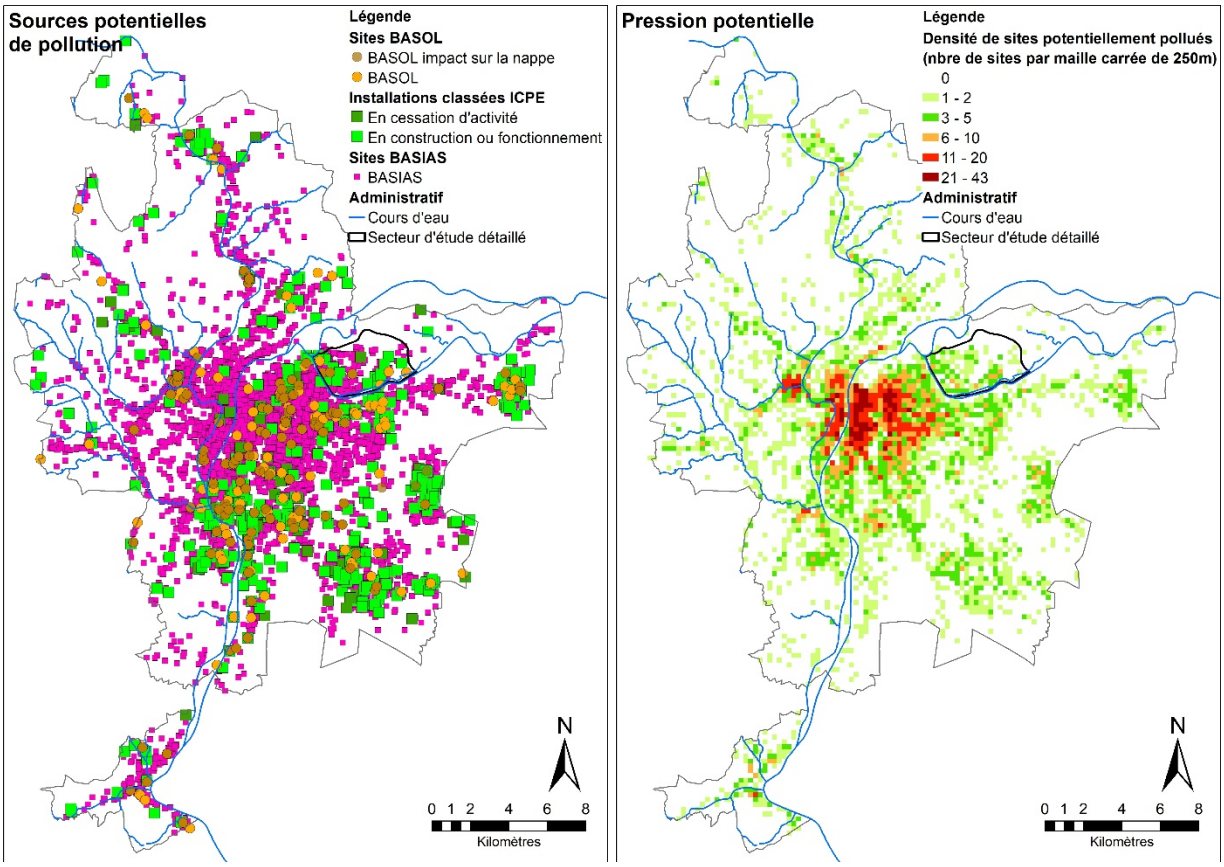


Figure 18 : Localisation et nombre (par mailles carrées de 250 m) de sites industriels historiques et actuels de la Métropole de Lyon (source : basol.developpement-durable.gouv.fr et www.georisques.gouv.fr).

Deux familles de composés organiques présentant des caractéristiques différentes ont été étudiées dans le cadre de la présente étude. D'une part, le tétrachloroéthylène (PCE) et le tricholoéthylène (TCE) font partie des composés organo-halogénés volatils (COHV), polluants volatils, persistants dans les eaux souterraines, plus denses que l'eau et fortement toxiques pour l'homme. Largement utilisés par le passé dans les procédés industriels (dégraissage des pièces métalliques) et les activités de service (teinturerie), ils sont communément retrouvés dans les eaux souterraines en France et sur la Métropole de Lyon. D'autre part, la famille des phtalates qui contient des composés semi-volatiles, visqueux, assez peu persistants dans les eaux souterraines, toxiques pour l'homme a aussi été retenue. Utilisés comme plastifiant dans les matières plastiques, ces composés sont peu recherchés dans les eaux souterraines.

Sur la base des données récoltées, 9 436 sites industriels ont au moins un code NAF renseignés, à savoir 248 sites ICPE et 9 188 sites BASIAS. L'utilisation de la matrice activités/polluants (version v0.2) permet, pour chaque code NAF renseigné dans les bases de données, d'associer la liste des polluants potentiels pouvant être émis dans les eaux souterraines. L'exploitation des résultats pour les deux familles de composés étudiées montre que :

- pour les COHV, la totalité des sites BASIAS et la moitié des sites ICPE peuvent être potentiellement contributeur à une pollution des eaux souterraines ;
- pour les Phtalates, un tiers des sites BASIAS et un cinquième des sites ICPE peuvent potentiellement polluer les eaux souterraines.

Les cartes permettent de constater une présence homogène sur le territoire de sites utilisant ou ayant utilisé des composés organiques de la famille des COHV ou des phtalates (Figure 19).

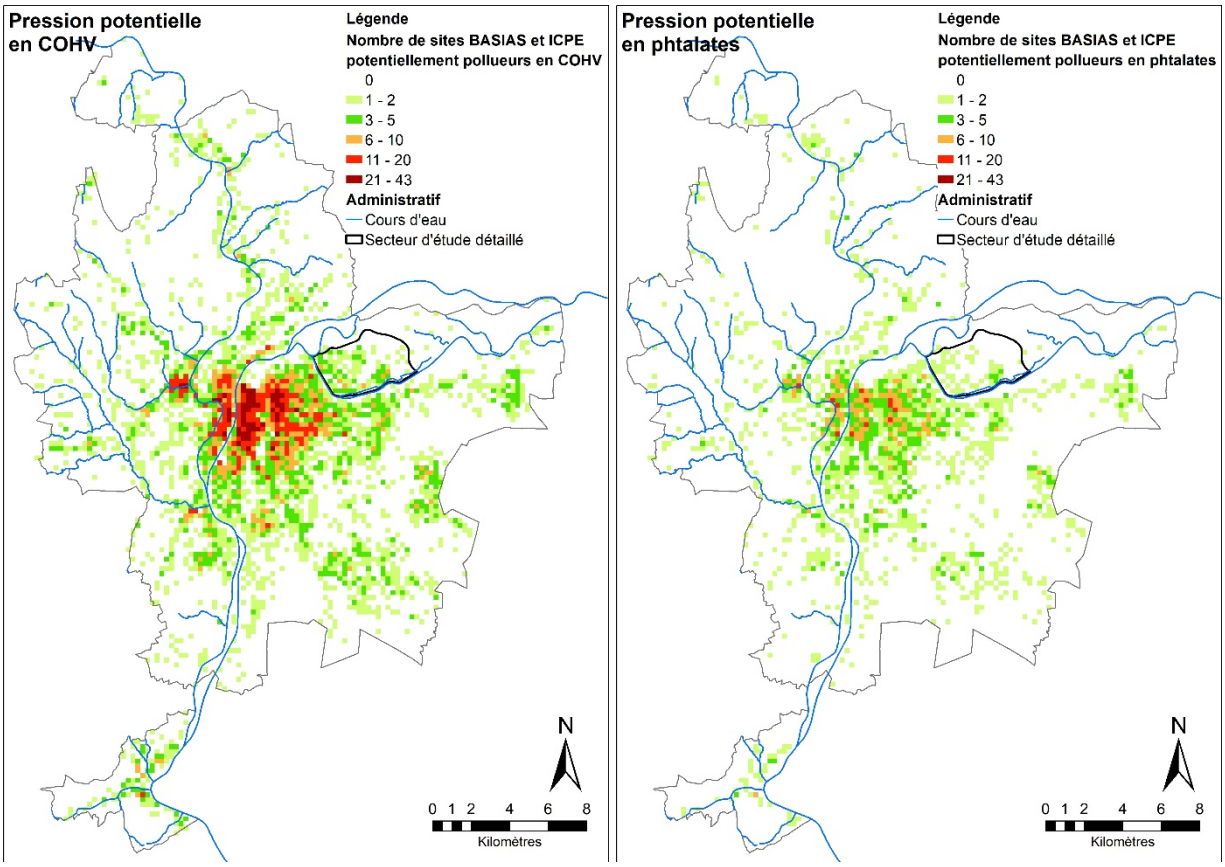


Figure 19 : Densité de sites ICPE et BASIAS potentiellement émetteurs de COHV (à gauche) et de phtalates (à droite) (source : basol.developpement-durable.gouv.fr et www.georisques.gouv.fr).

6.4.2. Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pression urbaine

Dans le cadre de l'étude de cas, seules les nappes superficielles ont été étudiées. De plus, la méthode de croisement de l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) et de l'épaisseur de la zone non saturée a été privilégiée (Mardhel V. et Gravier A., 2005). Le milieu urbain de la Métropole de Lyon est complexe et il aurait été impossible de mener une étude complète sur la vulnérabilité de l'ensemble des nappes à la pression urbaine dans le périmètre prévu pour le présent travail. L'objectif n'est pas ici d'obtenir une estimation très fine de la vulnérabilité mais plutôt de donner une évaluation globale de celle-ci.

Les cartographies obtenues montent une vulnérabilité forte pour les nappes alluviales et les nappes fluvioglaciaires, avec des terrains infiltrants et une zone non saturée peu épaisse (Figure 20). Les nappes du cailloutis plio-quaternaires de la Dombes ainsi que du socle et des calcaires de l'ouest sont très faiblement vulnérables, les sols étant majoritairement ruisselants et/ou les eaux souterraines profondes.

Sur le secteur de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean, la vulnérabilité de la nappe alluviale est élevée, du fait d'une faible profondeur des eaux souterraines et de l'absence de couche protectrice.

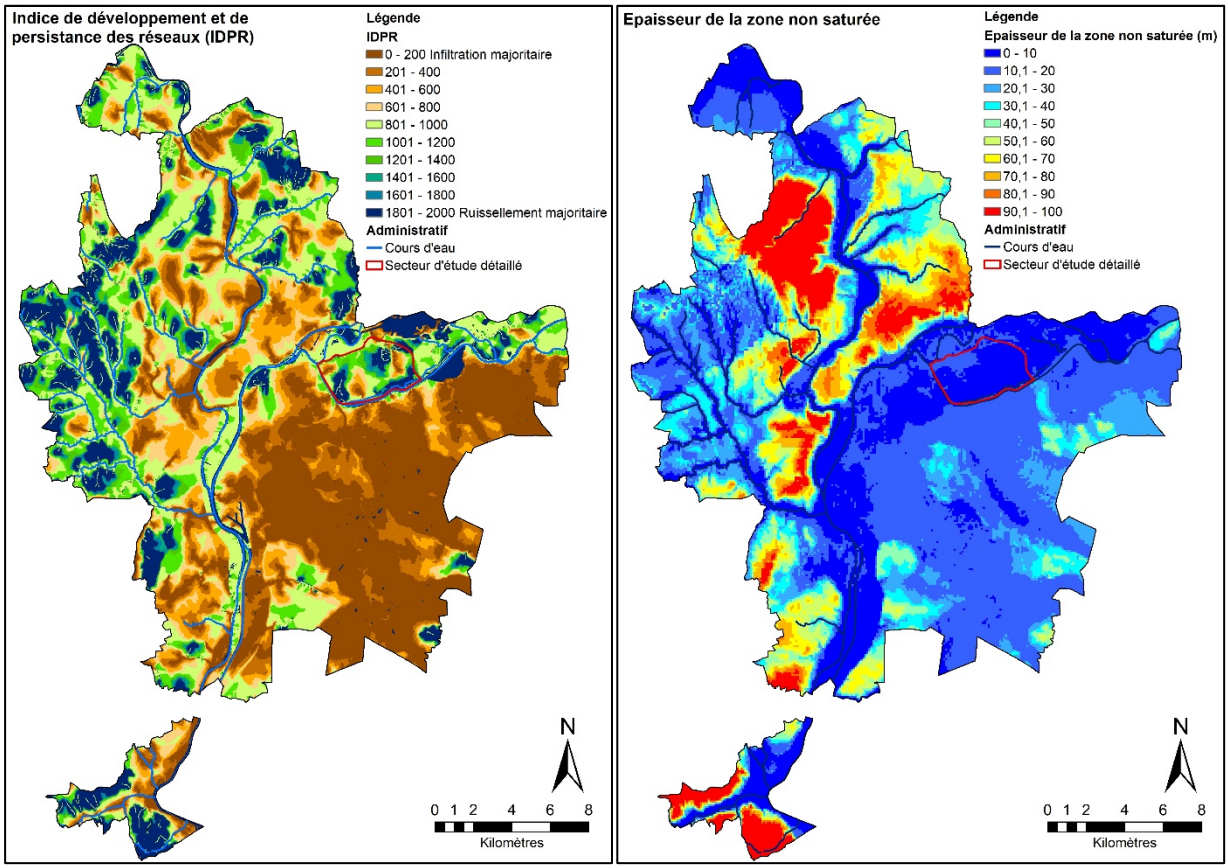


Figure 20 : Estimation de la vulnérabilité, croisement de l'indice de développement et de persistance des réseaux (à gauche) et de l'épaisseur de la zone non staturée (à droite) (source : infoterre.brgm.fr)

6.4.3. Définition de secteurs associés à une densité de points de surveillance

Des secteurs homogènes, en terme de pression et de vulnérabilité, sont définis par croisement des cartes précédentes (Figure 18, Figure 20 et Figure 21). En appliquant les densités minimales et maximales proposées dans ce guide, le réseau de surveillance devrait comprendre entre 83 et 217 points pour 538 km^2, soit 0,15 à 0,40 point par km^2. A noter que, pour les zones en vulnérabilité faible, il est nécessaire de vérifier la présence d'une nappe continue. Au droit des buttes morainiques aquicludes de l'est lyonnais, l'implantation de points de surveillance est inutile. Sur le socle de l'ouest de l'agglomération, en absence de puits, les sources pourraient faire l'objet d'une surveillance. Pour rappel, la nappe de la molasse du Miocène n'a pas été intégrée à l'étude de cas.

Le nombre de secteurs stratégiques définis sur l'agglomération est volontairement important et certains de ces secteurs sont très étendus (couloirs fluvioglaciaires), aucun travail de priorisation n'ayant été effectué avec l'ensemble des acteurs. En intégrant tous les secteurs stratégiques, hors objectif de protection des zones humides, le nombre total de points du réseau de surveillance serait de 180 à près de 750, soit une densité de 0,33 à 1,39 points par km^2 (Figure 21).

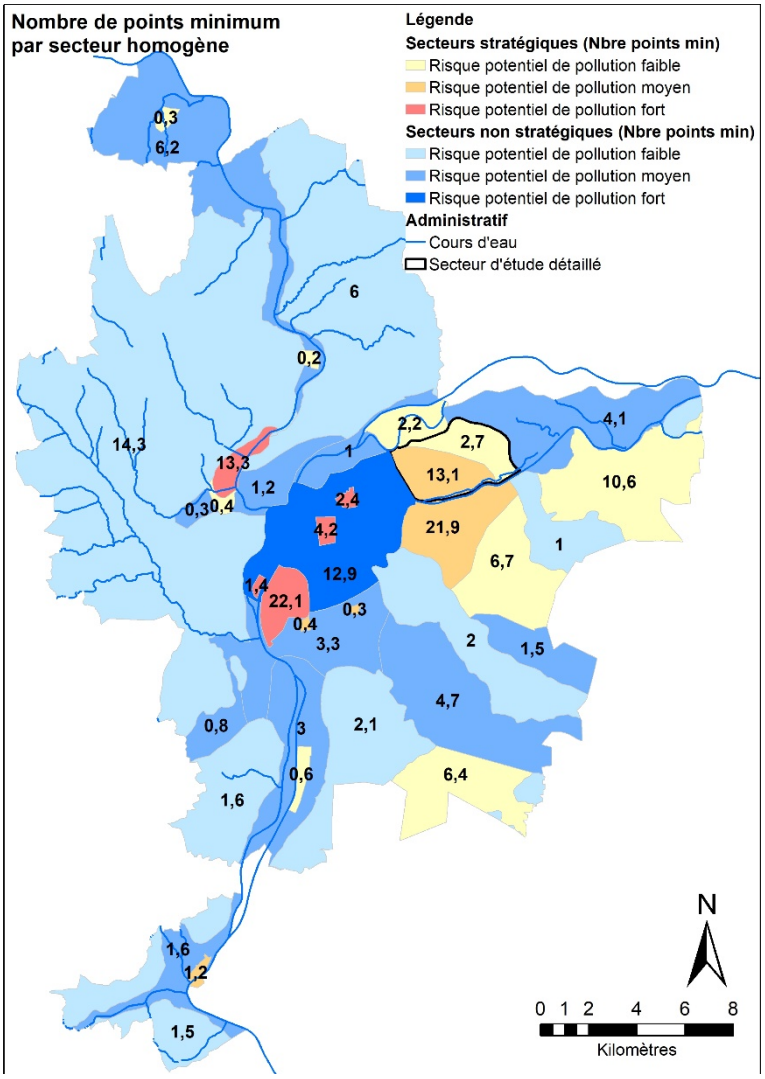


Figure 21 : Proposition d'un nombre minimum de points de surveillance selon le secteur.

Les densités obtenues sont cohérentes avec celles relevées lors du retour d'expérience sur les réseaux urbains existants en France et à l'international. Actuellement, le réseau piézométrique de la Métropole de Lyon compte environ 30 ouvrages sur le centre de l'agglomération (48 km^2). En respectant les densités proposés dans ce guide et sans tenir compte des secteurs stratégiques, le nombre de points devrait être de 21 à 78 sur cette zone. Le réseau actuel possède donc une densité correcte. Certains grands secteurs stratégiques pourraient être redéfinis, afin de cibler les zones prioritaires et diminuer ainsi les densités.

Le secteur stratégique de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean se caractérise par une vulnérabilité forte sur l'ensemble de son territoire et par une pression potentielle forte au sud-ouest et faible au nord-est. Le nombre de points préconisé est de 13 à 33 au sud-ouest (6,5 km^2) et de 3 à 27 au nord-est (5,5 km^2).

7. Phase 3 : Implantation théorique des points de surveillance

L'approche multicritère proposée lors de la phase 3 permet de croiser les données sur les sources de pollution avérées, passées et actuelles, sur les transferts vers la nappe, naturels et influencés par les aménagements anthropiques, et sur les enjeux à protéger actuels et futurs, afin d'esquisser un modèle conceptuel « sources / voies de transfert / enjeux à protéger » (Figure 22 et Figure 23). Les éléments cartographiés sont ensuite confrontés pour définir l'emplacement le plus approprié des points de surveillance.

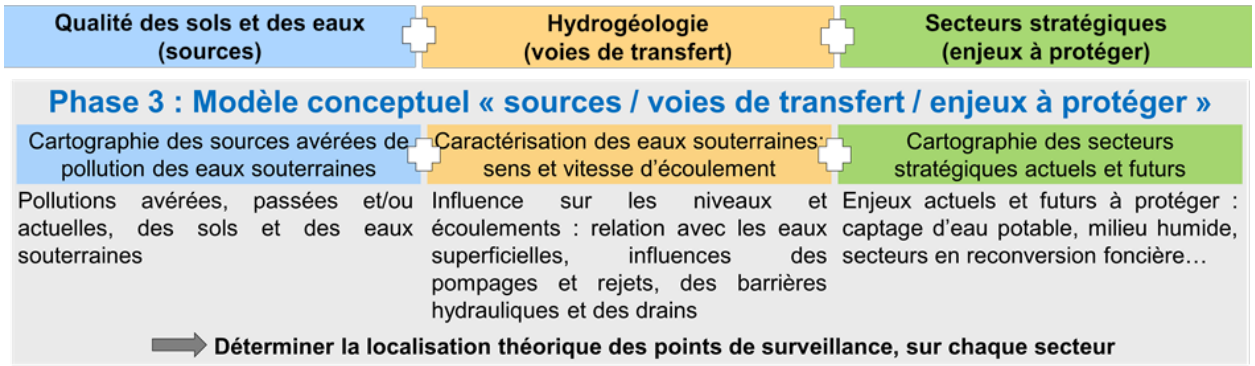


Figure 22 : Méthodologie de la phase 3 - modèle conceptuel « sources / voies de transfert / enjeux à protéger »

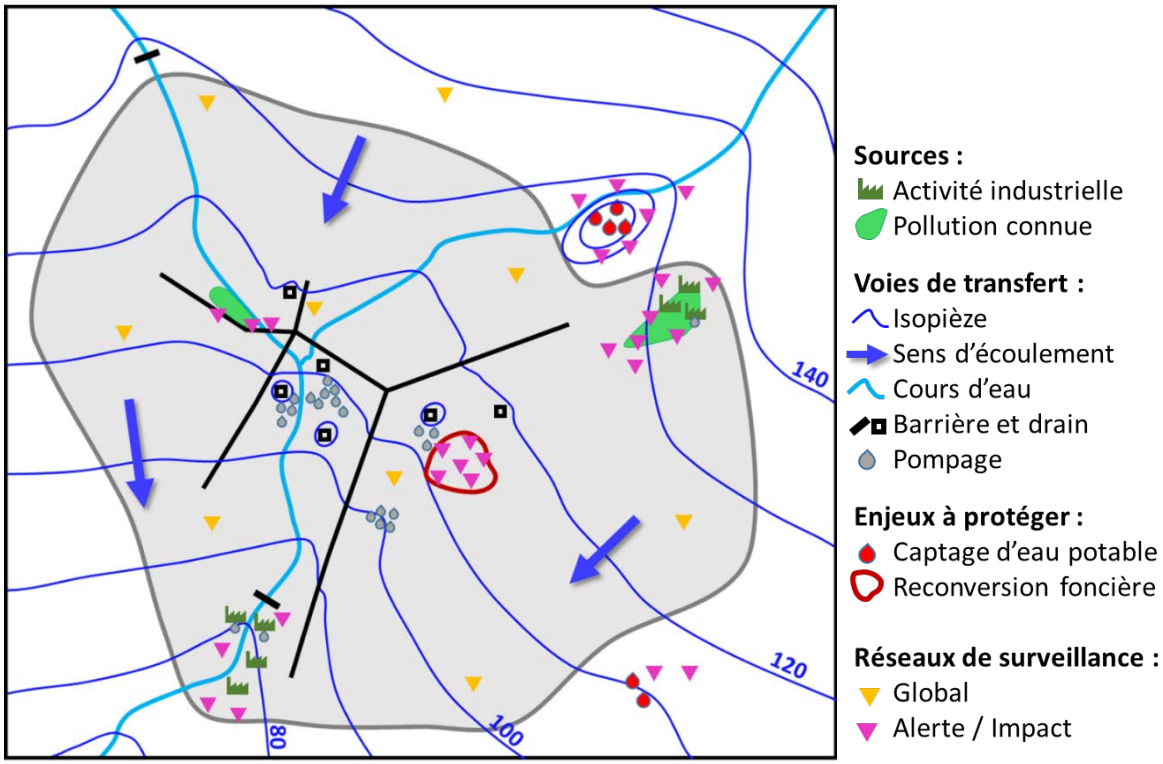


Figure 23 : Schéma d'un réseau de surveillance des eaux souterraines en milieu urbain

L'ensemble des données à collecter, recherches documentaires, enquêtes auprès des acteurs des eaux, du sol et du sous-sol et campagnes de mesures, sont présentées en Annexe 5 et concernent les données :

- sur les sources de pollution (1.2 Sources avérées de pollution - 1.3 Qualité des eaux souterraines) ;
- sur les enjeux à protéger (2.1 Populations et usage des eaux souterraines - 2.2 Ressources et milieux naturels - 2.3 Sources de données) ;
- et sur les transferts possibles (3.1 Contextes géologique et hydrogéologique - 3.2 Contexte hydrologique - 3.3 Occupation des sols et aménagements du sol et du sous-sol).

7.1. MODELE CONCEPTUEL SOURCES / VOIES DE TRANSFERT / ENJEUX A PROTEGER

Le modèle conceptuel « sources / voies de transfert / enjeux à protéger » permet de localiser les sources de pollution et les enjeux à protéger ainsi que de schématiser et de caractériser leurs relations. Cette étape s'apparente à une partie de la norme NF X 31-620-2 concernant les prestations de services relatives aux sites et sols pollués. Dans ce cadre, il peut être utile de se référer aux recommandations mentionnées dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués concernant le schéma conceptuel ainsi que dans les documents « Schéma conceptuel et modèle de fonctionnement » et « Diagnostics du site » disponibles sur les liens suivants : ssp-infoterre.brgm.fr/methodologie-nationale-gestion-sites-sols-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2017), ssp-infoterre.brgm.fr/schema-conceptuel (Ministère en charge de l'environnement, 2007b) et ssp-infoterre.brgm.fr/diagnostic-site (Ministère en charge de l'environnement, 2007a).

7.1.1. Sources avérées de pollution des eaux souterraines

Les sources de pollution en milieu urbain peuvent être de nature très variée : activités industrielles et de service, activités de transport, activités domestiques et habitat, aménagements et constructions, activités d'entretien… Afin d'évaluer l'état de la qualité des eaux souterraines, la démarche d'identification des sources de pollution suivante peut être entreprise :

- identifier les sources avérées de pollution ;
- interpréter les données existantes notamment sur la qualité des eaux souterraines pour identifier les impacts avérés.

Au préalable, les inventaires historiques issus de BASOL permettent de localiser les sources avérées impactant les sols et les eaux souterraines (Annexe 5 – 1.2.). Concernant les bases existantes, un travail de recherche de localisation précise est à envisager pour les sites BASOL dont les coordonnées renseignées correspondent au centroïde de la commune. D'autres sources de données peuvent également apporter des informations précieuses quant à la présence de pollutions existantes :

- les arrêtés municipaux de restriction d'usage des eaux souterraines ;
- la base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) inventoriant les plaintes, procès-verbaux de gendarmerie ou de police municipale ayant trait à des accidents (par exemple renversement de camion-citerne, incendie de dépôt de pneus ou autres) ;
- des études diverses (notamment Interprétation de l'Etat des Milieux ou Plan de Gestion) réalisées suite à la mise en évidence d'une pollution.

Ces documents doivent être considérés dans leur contexte, les panaches délimités dans les arrêtés municipaux et études anciennes ont pu migrer et des travaux de gestion ou dépollution des sols et des eaux souterraines ont pu avoir été menés...

D'autre part, les analyses récentes disponibles sur les eaux souterraines peuvent être interprétées, en comparaison avec des seuils réglementaires, pour identifier les impacts sur la qualité des eaux souterraines (Annexe 5 – 1.3.). S'il est connu, les valeurs doivent être comparées au fond géochimique naturel, afin que celui-ci ne soit pas confondu avec une pollution anthropique. Cependant les données de qualité sont souvent définies pour un objectif et un site (champ captant, site industriel, chantier). Les analyses sont alors ponctuelles et non homogènes en terme de paramètres analysés et de répartition spatiale. Elles ne permettent pas souvent de caractériser une anomalie ou un panache de pollution à l'échelle d'une agglomération. La difficulté à caractériser et à délimiter un panache de pollution est notamment liée aux caractéristiques hydrogéologiques locales (gradient hydraulique, dispersivité, perméabilité ou conductivité hydraulique) et à la variabilité de la géométrie des panaches.

Ainsi, une vaste campagne de mesures, appelée campagne élargie, regroupant un nombre élevé d'ouvrages prélevés et de paramètres analysés, peut être menée durant la conception du réseau de surveillance afin de caractériser le fond géochimique naturel et urbain des différentes nappes ainsi que les anomalies sur la qualité (pollution) et sur les niveaux (écoulements). Les résultats de cette campagne élargie aideront également à la réalisation des phases suivantes (cf. 8.1.1 Bilan sur la qualité des eaux souterraines).

7.1.2. Enjeux actuels et futurs à protéger

Les enjeux à protéger représentent la population et le milieu naturel (faune et flore). Les usages des eaux souterraines et des sols constituent des voies d'exposition entre les populations et les nappes potentiellement contaminées. Les usages actuels et futurs des sols et des eaux souterraines doivent donc être identifiés lors de la collecte de données (Annexe 5 - 2.) : eau potable, process industriel, irrigation agricole, de potagers, de parcs et de jardins, de stades sportifs, de cimetières, nettoyage et entretien des voiries, chantier avec pompage… Les enjeux à prendre en compte sont à définir en étroite relation avec les acteurs de l'agglomération afin de réaliser un inventaire exhaustif mais également pour les prioriser.

7.1.3. Voies de transferts et écoulements dans les eaux souterraines

Les voies de transferts regroupent l'ensemble des phénomènes permettant de mettre en relation les enjeux à protéger et les sources de pollution. Une étude hydrogéologique complète permet de déterminer les conditions d'écoulement des eaux au sein des aquifères (Annexe 5 - 3.) :

- géométrie des aquifères (étendues, épaisseur, affleurement…), nature et épaisseur de la zone non saturée et/ou des couches de protection ;
- caractéristiques des nappes : type (libre ou captive), zones de recharge, sens d'écoulement, niveaux piézométriques et fluctuations… ;
- flux entre aquifères (ascendants, descendants, relation hydraulique) ;
- relations avec les cours d'eau et la mer (biseau salé) ;
- modifications anthropiques des écoulements (prélèvements, drainage, canaux…).

Le couplage d'un modèle hydrogéochimique avec un modèle hydrogéologique fournit un outil puissant pour prédire les modifications de la qualité des eaux souterraines et la migration des panaches de pollution (cf 5.2.3 Données sur les transferts).

7.2. DEFINITION DE LA LOCALISATION THEORIQUE DES POINTS DE SURVEILLANCE

Le réseau de surveillance doit suivre plusieurs objectifs : obtenir une vision globale de la qualité des eaux souterraines sur l'ensemble de la zone urbaine et avoir une vision locale indispensable pour caractériser les anomalies sur la qualité et les écoulements et ainsi que protéger les enjeux identifiés. La localisation des points doit alors permettre de définir la qualité et les écoulements des eaux souterraines en dehors de l'influence directe de toute source de pollution identifiée, des barrières hydrauliques et des drains. La répartition de ces ouvrages de surveillance peut alors être homogène sur un secteur associé. Elle est ensuite affinée, selon les problématiques de chaque secteur et selon la densité fixée, avec la cartographie des sources avérées de pollution, des enjeux (actuels et futurs) et des influences naturelles et anthropiques sur les écoulements.

Les points devant permettre de caractériser les influences sur la qualité et les écoulements des eaux souterraines, doivent se placer en aval de sources avérées ou suspectées, au droit et au voisinage de panaches de pollution ainsi qu'à proximité (amont/aval) de barrières étanches et de drains. La bibliographie spécialisée en sites et sols pollués montre que plus un ouvrage est situé proche d'une source sol potentielle ou avérée et moins il est probable d'intercepter une éventuelle fuite (Guérin V. et Hubé D., 2008). Il est donc recommandé d'installer des ouvrages supplémentaires à une plus grande distance de sources, afin d'augmenter ses chances d'intercepter un éventuel panache. Dans le cas d'une recherche de l'origine d'une pollution, l'implantation de piézomètres en amont du site étudié (non impacté, hors zone d'influence) est indispensable afin d'être en mesure de discerner la part de pollution potentiellement imputable aux activités du site.

L'implantation de points de surveillance en amont ou au droit d'enjeux à protéger permet de créer un réseau de prévention et d'alerte. Certains points devront être placés suffisamment en amont des enjeux sensibles (par exemple : captables d'eau potable), pour alerter précocement en cas de détection d'une anomalie. D'autres points de surveillance peuvent se situer au droit même des enjeux à protéger, en intégrant par exemple les forages utilisés pour l'arrosage des pelouses accueillant du public. Ils permettront de vérifier l'adéquation entre la qualité et l'usage des eaux souterraines.

Enfin, la localisation des ouvrages doit être adaptée au contexte hydrogéologique. Lorsque les sens d'écoulement varient naturellement au cours d'un cycle hydrologique ou du fait d'influences anthropiques, il est nécessaire de disposer les piézomètres de façon à prendre en compte les différentes directions d'écoulement. Plusieurs points de suivis peuvent alors être disposés pour caractériser les amonts et les avals hydrauliques des sources et des enjeux à protéger.

Il est recommandé de soumettre la représentativité du réseau théorique de surveillance à l'expertise des acteurs du sol et du sous-sol du territoire urbain concerné.

7.3. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON

7.3.1. Modèle conceptuel sources / voies de transfert / enjeux à protéger

Les enjeux actuels ont été choisis en accord avec les acteurs de l'agglomération lyonnaise et concernent (Figure 24) :

- les 155 captages d'eau potable en nappe, dont 113 points sur le champ captant de Crépieux-Charmy, 8 sur celui de l'île du Grand Gravier à Givors et 10 sur celui de la plaine de Chères à Quincieux (source : www.ades.eaufrance.fr) ;

- les 605 équipements sportifs, parmi un total de 1409, utilisant potentiellement les eaux souterraines pour l'arrosage des terrains ou le remplissage des piscines, et notamment les parcs de loisirs et plaines de jeux, les centres équestres et hippodromes, les city parks et city stades, les complexes aquatiques, les golfs, les stades et terrains multisports, de football, de rugby et d'athlétisme (source : data.grandlyon.com) ;
- les 364 parcs et jardins répartis sur 12 km^2, certains étant arrosés par des forages (source : data.grandlyon.com) ;
- les 22 espaces naturels sensibles, soit 127 km^2, dont les zones humides situées en vallées et en relation étroite avec les eaux souterraines (source : www.data.gouv.fr).

Les enjeux futurs sont représentés par les zones en reconversion foncière, en cours ou prévue, constituant 7 sites de 6,6 km^2 situés à la Part-Dieu, Confluence, Gerland et Villeurbanne Carré de Soie (Figure 24). On aurait également pu imaginer intégrer à l'inventaire des enjeux à protéger les établissements sensibles (écoles, hôpitaux…) et réaliser une enquête poussée sur les stades, parcs et jardins de la ville arrosés par des forages.

La base de données BASOL a été exploitée afin d'identifier les sources avérées de pollution. 231 sites BASOL sont répertoriées dont 119 induisent des concentrations anormales dans les eaux souterraines, soit 51% (Figure 24). Sur le territoire du secteur stratégique de Vaulx-en-Velin, sont répertoriées 7 sites BASOL dont 3 présentent des concentrations anormales dans les eaux souterraines.

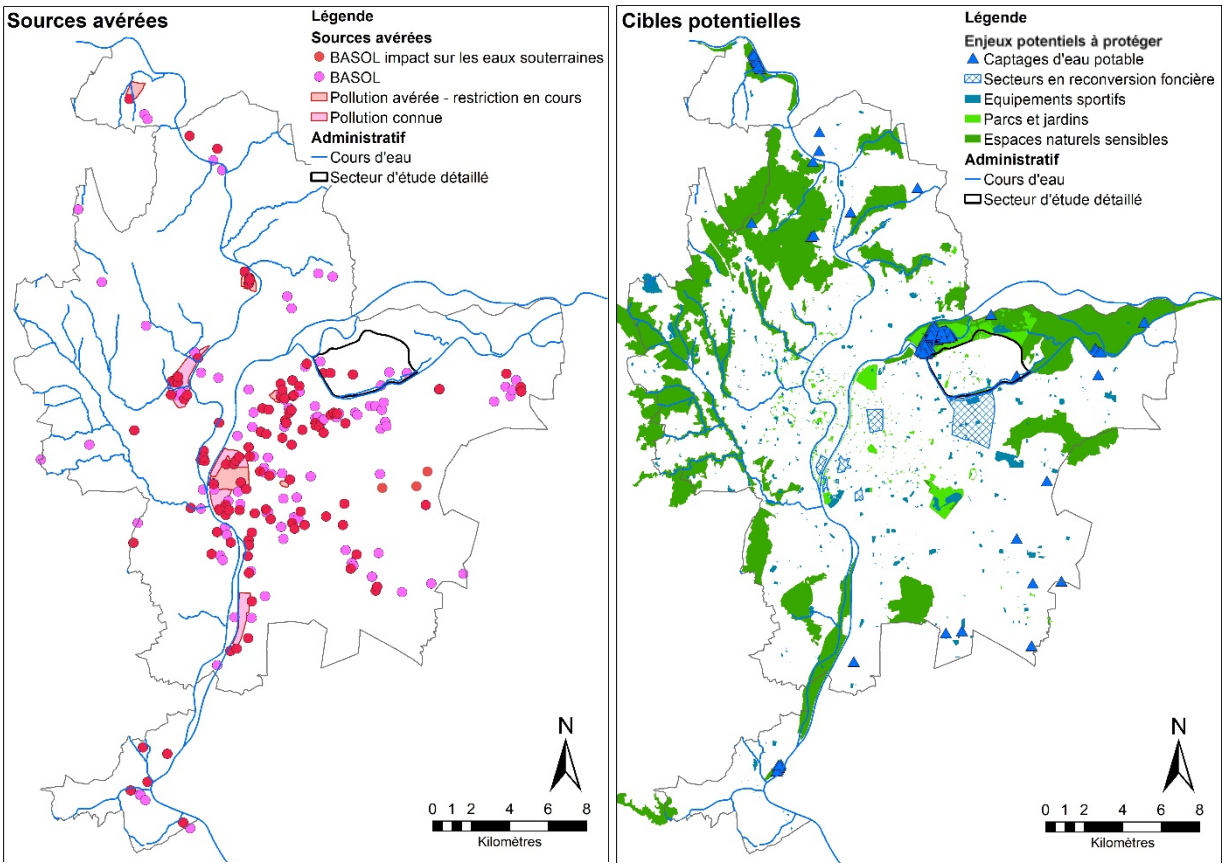


Figure 24 : Cartographie des sources avérées de pollution des eaux souterraines (à gauche) et des enjeux actuels et futurs à protéger (à droite) (source : www.ades.eaufrance.fr, data.grandlyon.com, www.data.gouv.fr et basol.developpement-durable.gouv.fr)

Les voies de transferts naturelles ont été caractérisées grâce aux différentes cartes piézométriques existantes. La construction du modèle hydrogéologique de Lyon a été l'occasion d'inventorier, entre 2005 et 2007, les aménagements du sous-sol (Seguin J.-J., 2008). Les modélisations ont permis d'identifier les drains et barrières hydrauliques pour les écoulements des eaux souterraines, par croisement entre la profondeur des ouvrages et les niveaux statiques (ou le toit de l'aquifère pour le cas d'une nappe captive). Compte tenu de la complexité du sous-sol de l'agglomération lyonnaise, le modèle hydrogéologique n'a pas été mis à jour et seuls les résultats des modélisations ont été intégrés aux cartographies (Figure 25) :

- canalisations de grand diamètre (1 m pour l'eau potable et 2 m pour l'assainissement) ;
- drain CNR, mis en place conjointement avec le barrage de Pierre-Bénite afin de rabattre le niveau piézométrique et d'éviter des inondations de nappe dans la ville de Lyon. Ce drain est un exutoire important de la nappe avec un débit moyen de 400 l/s en rive droite et de 1000 l/s en rive gauche ;
- tunnels (métro, routes, voies ferrées) et trémies (routes) ;
- 26 ouvrages de stationnement, composés majoritairement 5 à 7 niveaux en sous-sols. Les niveaux de la nappe peu profonde (4-5 m) sont rabattus par pompage et, dans certains cas, les eaux d'exhaure servent au remplissage de bassins et du lac du parc de la Tête d'Or, à l'arrosage d'espaces verts… Pour information, les parkings récents sont construits sur radier drainant.

Concernant les autres exutoires, la localisation des prélèvements d'eaux souterraines a été mise à jour par une extraction de la base national des prélèvements en eau (bnpe.eaufrance.fr). Le Rhône et la Saône forment un système hydraulique en interaction avec les nappes alluviales : les cours d'eau drainent ou alimentent la nappe en fonction des différentiels de charge hydraulique entre les eaux superficielles et souterraines. Les cours d'eau et canaux busés sont considérés comme étanches empêchant les relations avec la nappe alluviale (data.grandlyon.com).

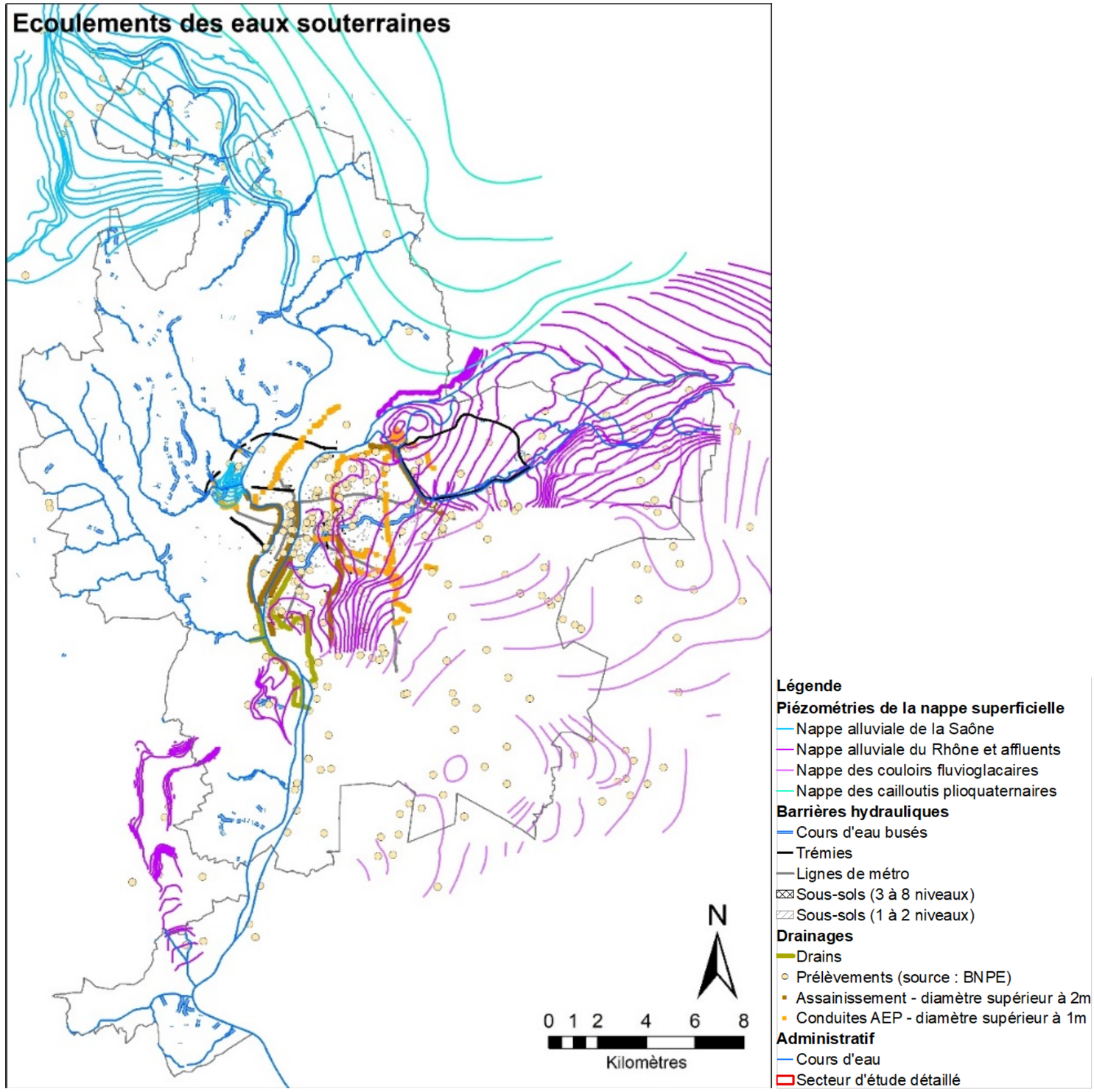


Figure 25 : Ecoulement de la nappe, barrières étanches et drains (source : Seguin J.-J.,2008 ; data.grandlyon.com et bnpe.eaufrance.fr)

7.3.2. Proposition de localisation théorique des points de surveillance

L'ensemble des données recensées sur Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean et relatives au modèle sources / voies de transfert / enjeux à protéger ont été cartographiées (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Au droit du secteur, les sources avérées sont peu nombreuses. Cependant, la zone est soumise à une forte pression industrielle et agricole. La nappe du couloir fluvioglaciaire de Décines, entre Chassieu et Vaulx-en-Velin, est connue pour être impactée par des pollutions en pyralène, trichloroéthylène (solvant chloré), nitrates et pesticides.

Concernant les enjeux, le secteur est situé en amont immédiat du champ captant de Crépieux-Charmy, qui représente la ressource stratégique et principale d'alimentation en eau potable de l'agglomération lyonnaise. Un petit champ captant est également localisé au nord-est, en amont du secteur. Le champ captant au nord-ouest et le parc de Miribel-Jonage au nord-est constituent des espaces naturels sensibles en vallée du Rhône. De nombreux parcs publics parfois étendus (jardin des violettes, parc de la Rize, parc François Mitterrand) et des stades sont présents et susceptibles d'être arrosées par la nappe du couloir fluvioglaciaire. Des forages d'irrigation sont ainsi déclarés pour les stades Eyquem et des Peupliers (bnpe.eaufrance.fr). Un forage agricole est également recensé sur la partie nord-est, soumise à une faible pression urbaine. Enfin, des aménagements fonciers sont en cours ou prévus et plusieurs friches industrielles sont actuellement réhabilitées mais n'ont pas été cartographiées dans les bases consultées.

Les écoulements se font du sud-est vers le nord-ouest, le Rhône et le champ captant de Crépieux-Charmy soumettant la nappe à un fort drainage. Ils sont probablement influencés localement par la Rize et les éventuelles fuites du canal de Jonage, longeant le sud et l'ouest du secteur, et par les forages de prélèvements.

Les 13 points minimum de la partie sud-ouest doivent permettre de caractériser la forte pression anthropique urbaine et de protéger les différents enjeux, notamment le champ captant de Crépieu-Charmy et les stades arrosés par des forages. Les 3 points minimum du nord-est doivent permettre de suivre les pollutions diffuses, d'origine agricole et industrielle, et de protéger le petit champ captant. Sur l'ensemble du secteur, les 16 ouvrages de surveillance sont répartis de façon homogène, avec une caractérisation de l'amont et de l'aval de l'ensemble du territoire (Figure 26). Sur la partie sud-ouest, certains points sont implantés spécifiquement en amont ou au droit des enjeux à protéger, en aval des sources avérées et à proximité des barrières étanches et drains.

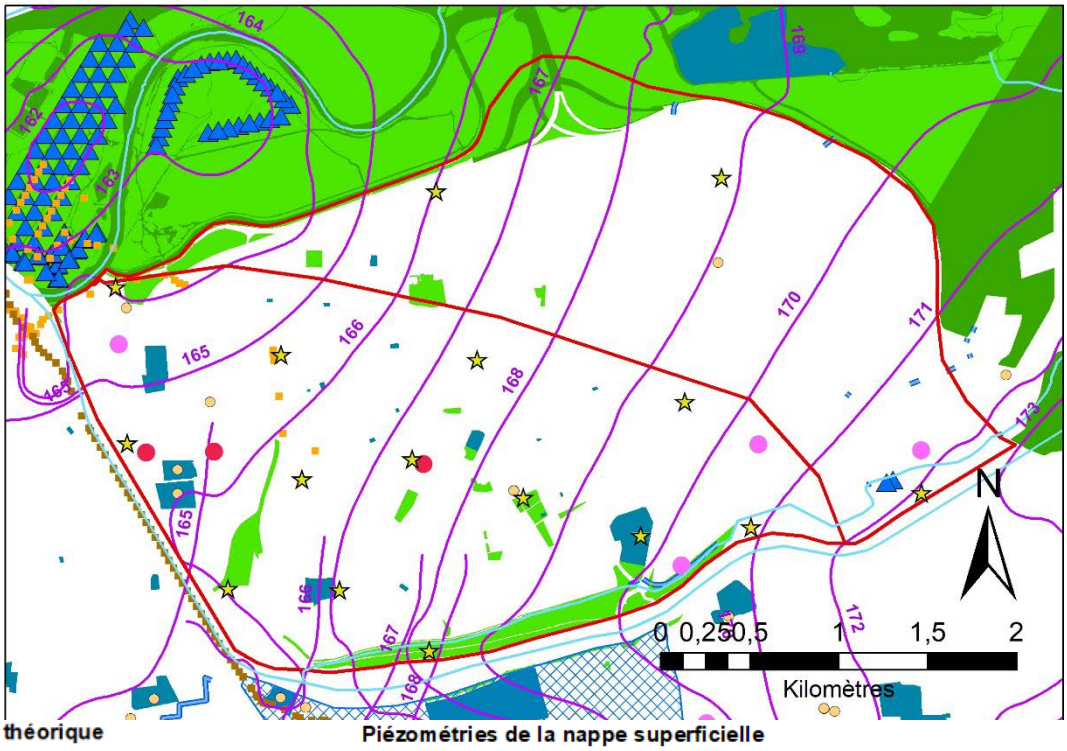


Figure 26 : Proposition d'implantation des ouvrages de surveillance sur la base du modèle sources / voies de transfert / enjeux à protéger au droit du secteur d'étude de Vaulx-en-Velin.

8. Phase 4 : Définition des caractéristiques des points et du programme de surveillance

L'inventaire des usages actuels et futurs des sols et des eaux souterraines (enjeux à protéger) ainsi que les caractéristiques physico-chimiques des substances recherchés permettent de définir les caractéristiques des ouvrages de suivis (profondeur, niveaux crépinés, nature du tubage…) et de cibler le programme de mesure (paramètres, fréquences…) (Figure 27). Afin de dresser un bilan de la qualité des eaux souterraines et de répondre au mieux aux objectifs de cette phase, une première campagne élargie peut être mise en œuvre.

Pour rappel, l'étendue des pollutions doit pouvoir être visualisée en deux dimensions (plan horizontal), du fait d'une densité (phase 2) et d'une localisation (phase 3) optimales des ouvrages de surveillance. La phase 4 doit amener à formuler des préconisations sur les niveaux crépinés des ouvrages de surveillance et la profondeur d'échantillonnage. Ces recommandations visent à ajouter une composante verticale (profondeur) permettant de caractériser les pollutions en trois dimensions, au sein d'une même nappe (Figure 28). Ce travail est à effectuer pour chacune des nappes en cas d'aquifères superposés.

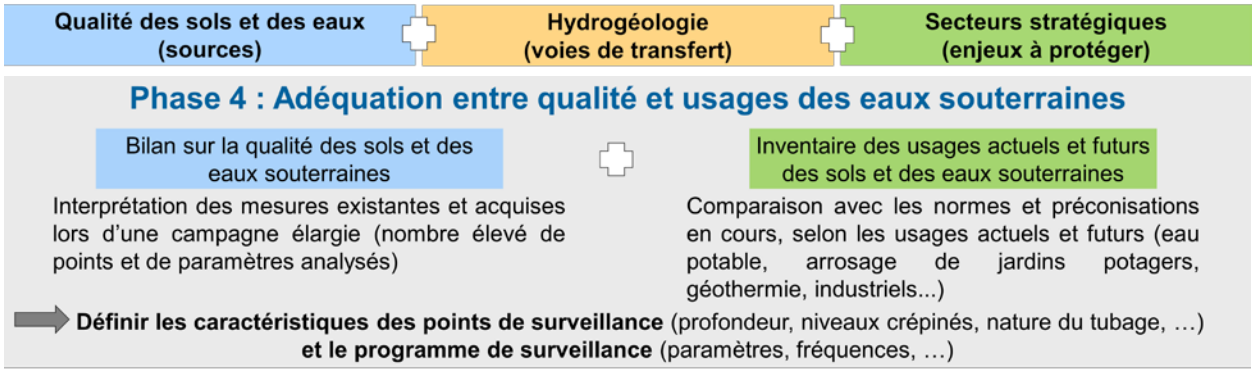


Figure 27 : Méthodologie de la phase 4 - adéquation entre la qualité et les usages des eaux souterraines.

L'ensemble des données à collecter sont présentées en Annexe 5 et concernent les données :

- sur les enjeux à protéger (2.1 Populations et usage des eaux souterraines - 2.2 Ressources et milieux naturels - 2.3 Sources de données) ;
- sur les sources de pollution (1.1 Sources potentielles de pollution - 1.2 Sources avérées de pollution - 1.3 Qualité des eaux souterraines - 1.4 Liste des substances polluantes (potentiellement) problématiques) ;
- et sur les points d'eaux existants (4.2 Réseaux qualitatifs des eaux souterraines - 4.3 Réseaux quantitatif des eaux souterraines).

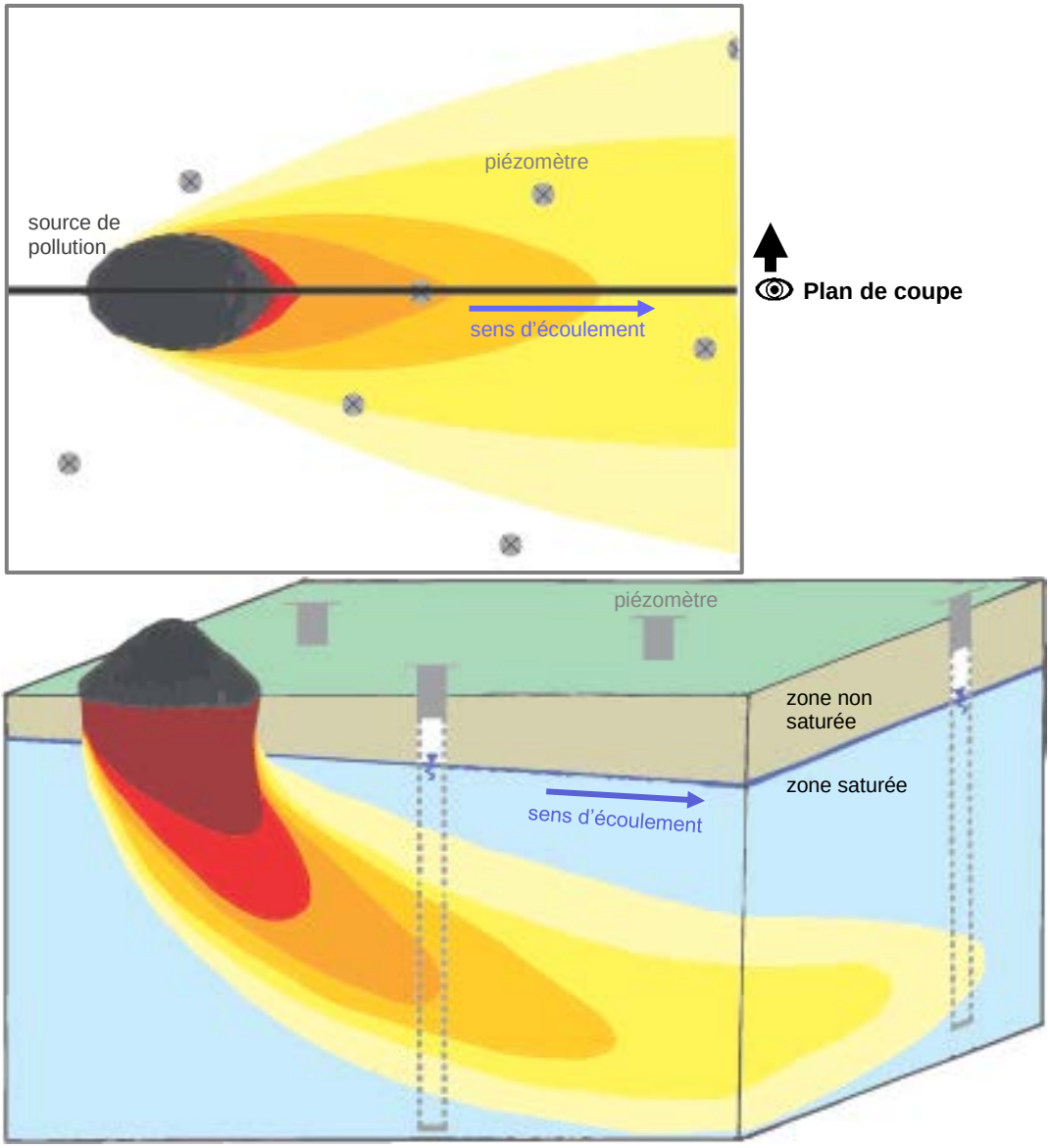


Figure 28 : Visualisation schématique en 2 dimensions (plan horizontal) et en 3 dimensions (bloc diagramme) d'un panache de pollution (courbes d'isoconcentration).

8.1. ADEQUATION ENTRE LA QUALITE ET L'USAGE DES EAUX SOUTERRAINES

Une large variété de polluants peut être retrouvée dans les sols et une pollution des sols peut engendrer une pollution des eaux souterraines par migration à travers la zone non saturée vers la zone saturée. Les migrations dans la zone non saturée dépendent notamment des propriétés intrinsèques de la substance chimique (viscosité, volatilité, solubilité, persistance, densité, etc.), des caractéristiques du milieu souterrain (porosité, perméabilité, etc.) et des conditions physico-chimiques régnant dans le milieu (pH, température, potentiel d'oxydoréduction, etc.). Au sein de la zone saturée, le comportement des polluants n'est pas non plus homogène, certains sont considérés comme flottants et sont hautement volatils (carburants et chimie du pétrole…), d'autres plus denses que l'eau tendent à se propager moins vite (PCB, HAP…). Ainsi, des pollutions dans les eaux souterraines peuvent engendrer des panaches de pollution bien plus étendus spatialement (latéralement et verticalement) que la zone de pollution dans les sols (y

compris jusqu'à atteindre le mur de l'aquifère), et d'autres pollutions vont rester plus localisées dans l'espace. Certaines zones sont plus critiques (zone de battement de la nappe, changement d'interface…). A noter que certaines substances peuvent aussi se dégrader au fil du temps en fonction des conditions du milieu et des métabolites sont alors à prendre en compte.

8.1.1. Bilan sur la qualité des eaux souterraines

Les phases précédentes ont permis de recenser les familles de produits utilisés par le passé ou utilisées actuellement et de localiser les sources potentielles ou avérées de ces substances (Annexe 5 – 1.1., 1.2. et 1.4.). Au cours de la phase 4, ce travail doit être complété par un bilan sur la qualité des eaux souterraines, afin de définir les substances couramment ou ponctuellement détectées dans les eaux souterraines (Annexe 5 – 4.2.). La connaissance des variations saisonnières de la nappe et la détermination des extrema sont également essentiels (Annexe 5 – 4.3.). L'interprétation de l'ensemble des résultats doit permettre de répondre aux questions qui se posent concernant les caractéristiques des points de suivi et la définition des campagnes d'analyses.

Le site internet ADES (www.ades.eaufrance.fr) permet de collecter les données sur la qualité et les niveaux des eaux souterraines, à la condition de posséder un compte utilisateur afin d'accéder aux informations de certains qualitomètres, tels que ceux des réseaux ICPE et SISE-EAUX. D'autres résultats d'analyses et de chroniques piézométriques, menés dans le cadre de divers suivis, peuvent être intégrés (Annexe 5 – 4.2. et 4.3.). Cependant, la répartition des points et les paramètres analysés ne sont souvent pas adaptés au milieu urbain et ne permettent pas une caractérisation représentative des différentes nappes présentes à l'échelle d'une agglomération.

Une première campagne élargie peut alors être menée, consistant en une recherche relativement complète d'éléments et composés sur un nombre élevé de points. Il est souhaitable de procéder à la recherche de l'ensemble des paramètres caractérisant la composition naturelle des eaux (température, potentiel d'oxydoréduction, conductivité, pH, éléments majeurs) et des éléments ou composés caractéristiques de chacun des groupes suivants, en référence aux normes disponibles : substances indésirables, substances toxiques, pesticides et métabolites. D'autres composés ou familles de composés peuvent également être ajoutés à cette liste : polychlorobiphényles PCB, composés émergents comme les résidus de médicaments, perturbateurs endocriniens, polyfluoroalkylées PFAS… Cette campagne est également l'occasion de réaliser une recherche de points et une visite de terrain, permettant de collecter le maximum d'information sur les points existants et opérationnels. La sélection des points du réseau menée en phase 5 sera ainsi facilitée et se basera sur des éléments concrets et vérifiés.

8.1.2. Comparaison avec des valeurs de référence et selon les usages actuels et futurs

Après contrôle qualité, notamment au niveau du laboratoire, la simple détection confirmée d'un polluant dans un échantillon prélevé, soit en solution, soit en phase séparée, peut être considérée comme une anomalie, même pour une faible concentration. Afin de qualifier une éventuelle anomalie, les résultats d'analyses doivent être comparés à des valeurs de référence définies en lien avec les usages de l'eau, par un fond géochimique naturel, un fond géochimique anthropique, des seuils de gestions, des normes réglementaires… L'inventaire des usages actuels et futurs des sols et des eaux souterraines permet de localiser les ouvrages de prélèvements (captages d'alimentation en eau potable, forages industriels et d'irrigation, puits de particuliers) et de fixer des valeurs de références (Annexe 5 – 2.).

Quelques références utiles pour définir les valeurs réglementaires ou de gestion à respecter sont données à titre indicatif :

- Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 30 juin 2020 (INERIS, 2020) ;
- Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du Code de la santé publique ;
- Arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines ;
- Circulaire du 23 octobre 2012 relative à l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines (circulaire abrogée par la note du 19 décembre 2019) ;
- Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE).

De plus, une attention particulière doit être portée à l'incertitude analytique, aux seuils de détection et de quantification des analyses lors de l'interprétation des résultats et de la qualification d'une anomalie. Les méthodes de calculs pouvant varier entre laboratoires et au cours du temps, il convient de veiller à reporter, sur les graphiques de restitution des résultats, les incertitudes fournies par le laboratoire et de caractériser les valeurs situées en-dessous de la limite de quantification.

8.1.3. Outils d'interprétation des résultats

Quelques pistes sur les modalités d'interprétation et de restitution des résultats sont précisées dans le document « Maîtrise et Gestion des Impacts des polluants sur la qualité des Eaux Souterraines (ESO) » et le guide sur la surveillance des eaux souterraines, disponibles sur le lien : ssp-infoterre.brgm.fr/maitrise-gestion-des-impacts-sur-qualite-eaux-souterraines (Ministère en charge de l'environnement, 2009) et ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2019).

Les résultats peuvent faire l'objet d'une évaluation temporelle. Cependant, les considérations sur les incertitudes de mesures soulignent la précarité des conclusions qui seraient établies sur des analyses ponctuelles, ou au terme d'une période de suivi de courte durée. En particulier, il faudra s'attacher plus aux tendances et aux ordres de grandeurs, observées sur le plus grand nombre possible de mesures faites au cours du temps, qu'aux valeurs ponctuelles et absolues. De façon empirique, et de manière générale (car cela est dépendant des contextes hydrogéologiques), l'établissement d'un état des lieux avec évaluation d'une tendance « fiable » d'évolution de la qualité des eaux souterraines nécessite au moins 4 ans de suivi (bilan quadriennal), intégrant les périodes de hautes et basses eaux de la nappe pour pouvoir affirmer la validité d'une tendance.

La première étape d'une évaluation temporelle est souvent la réalisation de chroniques d'évolution de la concentration d'un composé en fonction du temps, avec le report des valeurs de référence. De nombreuses autres méthodes existent également : graphiques d'occurrence d'apparition, boîtes à moustaches, autocorrélogrammes, corrélogrammes croisés… Des outils statistiques puissants peuvent être mis en œuvre si les chroniques sont suffisamment longues.

L'outil HYPE, développé par le BRGM, permet l'étude statistique des chroniques de qualité des eaux souterraines. Il intègre les méthodes statistiques les plus puissantes et robustes dans ce

domaine spécifique. Un excellent site en anglais de Interstate Technology and Regulatory Council répertorie et illustre de nombreuses méthodes de statistiques pour l'interprétation des données de qualité sur les eaux souterraines (Groundwater Statistics for Monitoring and Compliance - Statistical Tools for the Project Life Cycle) : www.itrcweb.org/gsmc-1. Certains outils statistiques puissants permettant d'étudier les chroniques et de rechercher des tendances (R, MATLAB et MAROS). Plusieurs de ces logiciels statistiques couramment utilisés à l'international sont résumés dans l'annexe D du site : www.itrcweb.org/gsmc-1/Content/GW%20Stats/Appendix%20D%20Software/D%200%20Introduction.htm.

L'interprétation des résultats peut également se faire de façon à visualiser leur répartition spatiale. Les données ponctuelles peuvent être cartographiées avec un logiciel SIG ou interpolées et spatialisées par une approche géostatistique (krigeage avec modèle de variogramme). A l'échelle d'un territoire urbain, la mise en œuvre d'un modèle hydrodynamique et hydrogéochimique représente un outil puissant de gestion et d'anticipation (cf 5.2.3 Données sur les transferts).

8.2. PRECONISATIONS POUR LE PROGRAMME DE SUIVI

Le guide de surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués fait de nombreuses recommandations par la mise en place et la réalisation d'une surveillance des eaux souterraines. Dans ce cadre, il est intéressant de se référer à ce document disponible sur le lien suivant : ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2019).

8.2.1. Programme analytique

La liste des analyses se base sur le bilan réalisé sur la qualité des eaux souterraines et, selon le contexte, le programme analytique peut varier. Les mesures communément préconisées sont :

- la mesure piézométrique du niveau statique ;
- les paramètres physico-chimiques classiques, à mesurer in situ lors du prélèvements, permettant de comprendre les mécanismes régissant le devenir d'un polluant en nappe : pH, conductivité, oxygène dissous, potentiel d'oxydoréduction, température ;
- les paramètres chimiques fréquemment retrouvés et responsables de la dégradation de la qualité des eaux souterraines (Le Guern C. et al., 2012 ; IFEN, 2018) : nitrates, pesticides, micropolluants minéraux (zinc, cadmium, arsenic,…), autres micropolluants organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, polychlorobyphényles PCB, composés organo-halogénés volatils COHV) ; pouvant être complétés par les fluorures, cyanures, hydrocarbures totaux, BTEX, produits pharmaceutiques et par les métabolites de dégradations ;
- les paramètres ciblés issus du bilan sur la qualité des eaux souterraines.

Le bilan de la qualité des eaux souterraines et l'inventaire des activités polluantes potentielles et/ou avérées peuvent permettre de localiser des panaches de polluants et d'ainsi affiner le programme analytique pour chaque point du réseau de surveillance. Cependant, compte tenu de la complexité du milieu urbain, il est conseillé de garder le même programme analytique sur l'ensemble du réseau ou au moins sur chaque secteur. La liste analytique peut être adaptée pour des paramètres très spécifiques et selon les usages des eaux souterraines : traceurs spécifiques de l'activité polluante (« signature de l'activité d'un site »), traceurs de mobilité c'est-à-dire les substances les plus mobiles et les plus persistantes permettant de déterminer l'extension d'un panache de pollution (sels, chlorures, sulfates, nitrates et ammonium, phosphates et bore, fluorures), substances porteuses du risque c'est-à-dire les plus toxiques et cancérigènes (métaux lourds, certains composés organiques), molécules originelles et métabolites de dégradation.

8.2.2. Profondeur d'échantillonnage

La nature des substances définies dans le programme analytique va conditionner leur comportement au sein du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée. Ce comportement est à considérer pour définir la profondeur d'échantillonnage, en lien avec les niveaux crépinés de l'ouvrage de surveillance. Les recommandations sont détaillées au chapitre 8.3.1 (Profondeur totale et niveaux crépinés). En cas de prélèvements avec une pompe immergée, cette dernière devra toujours être positionnée en face des niveaux crépinés (lorsqu'ils existent). Pour plus de détails sur la profondeur d'échantillonnage, on pourra se référer à la norme NF X31-615 de décembre 2017 relative au prélèvement et échantillonnage des eaux souterraines dans des forages de surveillance pour la détermination de la qualité des eaux souterraines.

8.2.3. Fréquence des campagnes de mesures

Des méthodes permettant de définir la fréquence des prélèvements sont données dans le document « Maîtrise et Gestion des Impacts des polluants sur la qualité des Eaux Souterraines (ESO) », disponible sur le lien : ssp-infoterre.brgm.fr/maitrise-gestion-des-impacts-sur-qualite-eaux-souterraines (Ministère en charge de l'environnement, 2009).

Il est recommandé de réaliser un minimum de 2 campagnes par an et de manière synchrone pour l'ensemble des ouvrages. Cependant, la fréquence des prélèvements et des mesures doit être suffisamment élevée, c'est-à-dire impliquant des prélèvements suffisamment rapprochés, pour permettre de suivre précisément l'évolution de la qualité des eaux souterraines. La fréquence de suivi sera conditionnée par la vitesse de transfert des polluants, à savoir :

- les spécificités de la zone non saturée ;
- les caractéristiques hydrodynamiques de la zone saturée ;
- les caractéristiques des polluants.

Lorsque les vitesses de transfert dans la zone saturée sont faibles, quelques mètres par an par exemple, il n'est pas utile d'échantillonner fréquemment. A contrario, quand la vitesse est élevée, les polluants peuvent se déplacer rapidement, ce qui nécessite des contrôles plus fréquents. Pour certains types de nappe à forte transmissivité ou à chenaux préférentiels d'écoulement (milieu alluvial, karstique ou fissuré), il peut être nécessaire d'opter pour une fréquence importante, notamment après certains épisodes pluvieux exceptionnels.

Enfin, la fréquence peut être augmentée en cas d'anomalie sur un point ou sur un secteur. Plus la fréquence sera importante, plus l'information sera précise. Un compromis devra être trouvé entre le niveau d'information, le coût et les enjeux.

8.2.4. Période des campagnes de mesures

Une fois la fréquence déterminée, les périodes retenues pour l'échantillonnage au cours de l'année doivent prendre en compte les fluctuations piézométriques de la nappe (variations saisonnières et interannuelles). En effet, il est nécessaire de disposer d'informations au cours des situations particulières de hautes eaux et de basses eaux où la pollution peut être diluée ou encore remobilisée (s'il existe une source résiduelle en zone non saturée). Une fois définie, la période d'intervention doit être respectée d'une année sur l'autre.

8.2.5. Suivi en continu

La mise en place de capteurs sur des points ciblés permet d'enregistrer certains paramètres à fréquence régulière (par exemple, toutes les heures ou tous les jours). Des tels capteurs sont installés couramment pour les paramètres niveaux, température et conductivité et de nouvelles générations de capteurs sont sorties pour les paramètres pH, oxygène dissous, turbidité, ammonium, chlorures, nitrates…. Les résultats obtenus sur ces points permettront de préciser l'évolution dans le temps des paramètres mesurés. Le suivi de la conductivité en continu peut être intéressant pour faire ressortir d'éventuelles anomalies sur la qualité des eaux souterraines.

Les données peuvent éventuellement être télétransmises et diffusées en quasi-temps réel, en couplant le capteur à un modem. Les données brutes sont transmises par télétransmission à un serveur, grâce à la technologie M2M (SMS et GPRS) ou IoT (LoRa, SigFox), et sont intégrés automatiquement dans une base de données et/ou exposés directement sur un site internet. Une phase de vérification et de validation des données est toutefois nécessaire régulièrement pour passer d'une donnée brute à une donnée validée.

8.3. PRECONISATIONS POUR LES CARACTERISTIQUES DES POINTS DE SUIVIS

Le guide de surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués fait de nombreuses recommandations sur les caractéristiques des ouvrages de surveillances. Dans ce cadre, il est intéressant de se référer à ce document disponible sur le lien suivant : ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2019). Pour plus de détails sur la conception d'un ouvrage, on pourra se référer aux normes NF X31-614 de décembre 2017 relative à la réalisation d'un forage de contrôle ou de suivi de la qualité de l'eau souterraine au droit et autour d'un site potentiellement pollué et NF X10-999 d'août 2014 concernant la réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages. La norme NF X31-615 de décembre 2017 fournit des recommandations sur les méthodes de caractérisation et de surveillance des pollutions en nappe dans le cadre des sites pollués ou potentiellement pollués et notamment sur la profondeur d'échantillonnage.

Les principales préconisations concernant les ouvrages existants ou à créer qui seront intégrés au réseau de surveillance portent sur :

- la conception technique de l'ouvrage selon le suivi envisagé, et l'état de cet équipement (profondeur totale et niveaux crépinés, nature du tubage, bouchon d'argile au droit des aquicludes, massif filtrant…) ;
- la protection de la tête et de l'ouvrage (cimentation, dalle de propreté et capot fermé) ;
- la pérennité et l'accessibilité de l'ouvrage.

8.3.1. Profondeur totale et niveaux crépinés (et profondeur d'échantillonnage)

Les points de surveillance devront avoir des caractéristiques techniques leur permettant de capter le niveau aquifère souhaité. Dans le cas de plusieurs aquifères superposés au droit de la zone urbaine, il est conseillé d'avoir un suivi principal de la première nappe rencontrée, et de suivre les nappes sous-jacentes dans un réseau plus restreint (excepté en cas d'identification de migration de la pollution dans les nappes plus en profondeur). Les ouvrages captant plusieurs nappes sont à exclure.

La nature des substances va conditionner leur comportement au sein de la zone saturée (nappe). Le comportement des substances définies dans le programme analytique est donc à considérer

pour définir les caractéristiques des ouvrages de surveillance et la profondeur d'échantillonnage (Figure 29) :

- pour les composés très solubles dans l'eau (alcools, métaux…) présents en phase dissoute dans les eaux souterraines :
    - o la profondeur du niveau crépiné est fonction de l'éloignement à la source, du fait de la dispersion verticale ;
    - o le prélèvement pourra se faire à l'aide d'une pompe immergée au milieu de la crépine, afin d'avoir un échantillon représentatif de l'ensemble de la section captée ;
- pour les substances LNAPL, flottantes car moins denses que l'eau (hydrocarbures pétroliers…) :
    - o la crépine doit s'étendre des niveaux des plus hautes eaux et jusqu'à plusieurs mètres (par principe de précaution) sous les plus basses eaux ;
    - o l'échantillonnage pourra se faire par un prélèvement directement dans la phase flottante et/ou par une pompe immergée juste sous la surface de la nappe ;
- pour les substances DNAPL, plongeantes car plus denses que l'eau :
    - o le bas de la crépine doit atteindre le mur de l'aquifère ;
    - o l'échantillonnage pourra se faire par un prélèvement directement dans la phase située au mur de l'aquifère et/ou par une pompe immergée au fond de l'ouvrage.

Compte tenu de la grande diversité de substances potentiellement présentes dans les eaux souterraines en milieu urbain, il est préconisé de privilégier une crépine positionnée sur toute l'épaisseur de l'aquifère. Ce dispositif permet en effet d'intercepter au mieux l'ensemble des panaches de pollution (Figure 29). En cas d'hétérogénéité verticale des concentrations, l'utilisateur gardera toutefois à l'esprit le risque de mélange d'eaux de qualités différentes sur toute la hauteur de la crépine. Des systèmes peuvent être envisagés afin de caractériser les évolutions de la qualité de la nappe selon la profondeur d'échantillonnage : piézomètres en flûte de pan (piézomètres proches crépinés à différentes profondeurs), système à plusieurs niveaux au sein d'un même forage, obturateurs (packers) permettant d'isoler des portions de la nappe, échantillonneurs passifs disposés à une profondeur donnée…

Concernant les aquifères très épais, il est possible de ne pas positionner la crépine sur l'ensemble de la zone saturée sous réserve de disposer d'éléments indiquant que la présence des composés recherchés en fond d'aquifère est peu probable. Cependant, dans le cas d'une zone non saturée épaisse et peu profonde, la recharge pluviométrique peut influencer le transport vertical du panache de pollution. Ainsi, il est possible de constater un enfoncement du panache avec l'éloignement de la source de pollution. L'absence de composés recherchés en surface n'implique donc pas nécessairement la même absence en profondeur.

Une attention particulière devra également être portée aux aquifères hétérogènes, présentant des fracturations ou des variations de faciès horizontales et/ou verticales. La distribution des perméabilités influence les écoulements et le transport des polluants. La répartition des concentrations dans la zone saturée ne suit alors plus uniquement les lois physiques de convection/dispersion/dilution mais est contrainte par la structure de l'aquifère. De telles contraintes se rencontrent notamment en aquifères alluviaux entrecoupés de chenaux sablo-graveleux et de niveaux argileux.

Enfin, dans le cas de plusieurs aquifères superposés, les qualitomètres captant plusieurs nappes sont à exclure. Il est nécessaire de vérifier que la conception technique de l'ouvrage ne favorise pas le transfert d'eau et de polluants entre aquifère par drainance descendante ou ascendante.

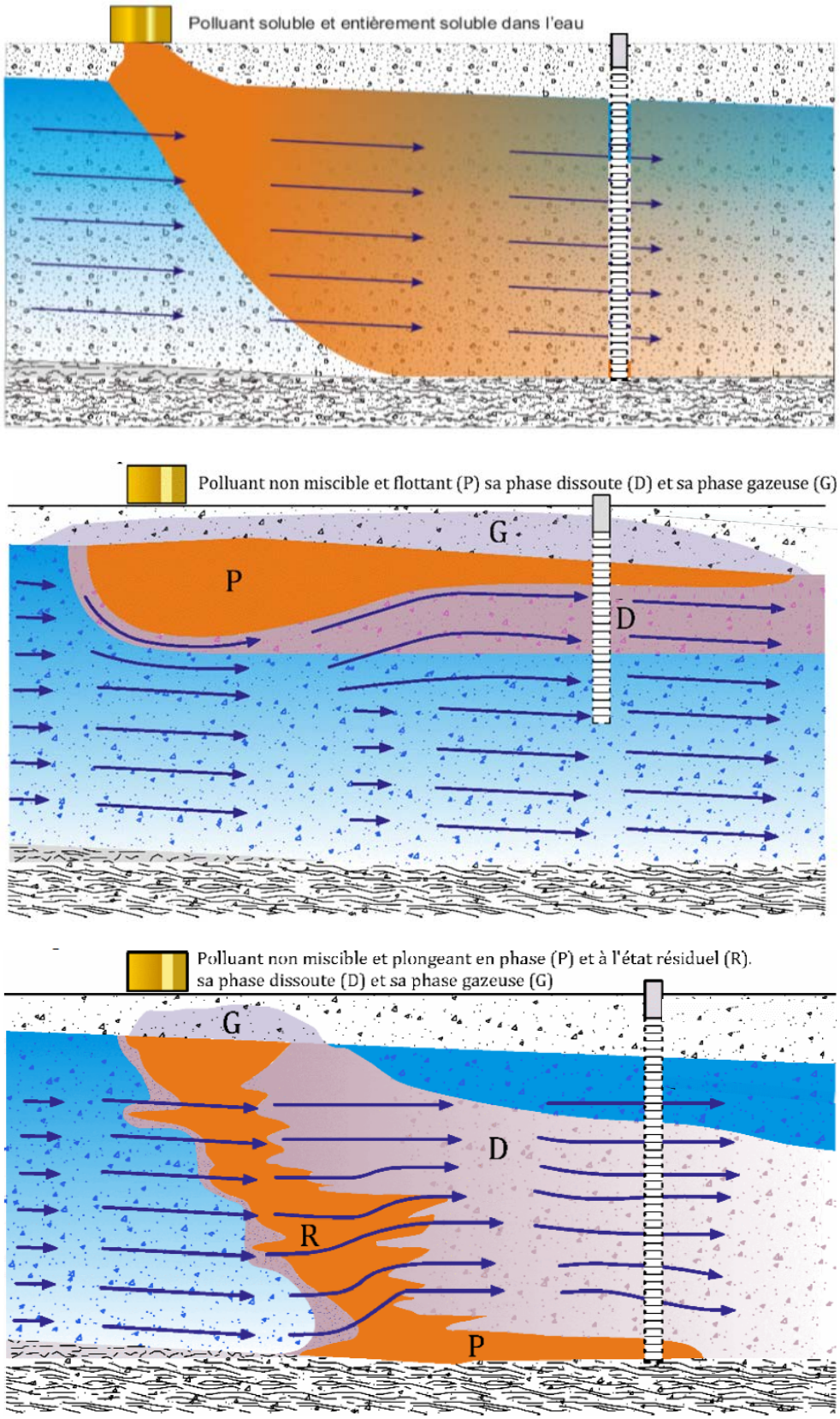


Figure 29 : Positionnement de la crépine selon le comportement du polluant recherché en zone saturée (Lemière, 2008 modifié).

8.3.2. Nature du tubage

Les parois des forages recensés en milieu urbain peuvent être constituées du terrain naturel, de béton (buses), de tubages vissés ou collés en acier simple, en acier inox, en polychlorure de vinyle (PVC) ou en polyéthylène haute densité (PEHD). Les parois, tubages et joints peuvent se dégrader naturellement ou par contact avec des substances agressives et ainsi altérer la qualité des eaux souterraines et influencer la représentativité de l'échantillonnage. Par exemple, les solvants en phase organique peuvent dissoudre les joints d'étanchéité et les tubages PVC. Une attention doit être portée en particulier sur la résistance des matériaux utilisés aux agressions des polluants suspectés dans les terrains traversés et dans les eaux souterraines ainsi que sur le potentiel de relargage de ces matériaux.

Certains fournisseurs de tubes en PVC ou PEHD proposent des tables de résistance de ces matériaux en fonction des substances susceptibles d'être rencontrées, de leur concentration et de la température du fluide à « transporter ». En complément, l'Annexe B de la norme NF X31-614 de décembre 2017 (réalisation d'un forage de contrôle ou de suivi de la qualité de l'eau souterraine au droit et autour d'un site potentiellement pollué) présente une liste de produits susceptibles d'attaquer, ou non, à une température de 20 °C à 25 °C, le PEHD ou le PVC en fonction des concentrations trouvées dans les formations traversées ou dans les eaux souterraines. L'attention est cependant attirée sur le fait que, pour certaines substances, même placées dans des conditions identiques, l'appréciation donnée en termes de résistance à l'attaque chimique est variable selon les documents consultés.

8.3.3. Pérennité et accessibilité de l'ouvrage

L'ouvrage doit présenter une certaine garantie de conservation en bon état à long terme. La bonne réalisation technique de l'ouvrage sera jugée au vue notamment de la bonne protection des eaux souterraines vis-à-vis des pollutions de surface : capot fermé, tubage sortant du sol, cimentation de surface, dalle de propreté et présence d'un bouchon d'argile surmontant le massif filtrant. Pour plus de détails sur la bonne réalisation d'un forage, on pourra se référer aux normes NF X10-999 d'août 2017 concernant la réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages et NF X31-614 de décembre 2017 relative à la réalisation d'un forage de contrôle ou de suivi de la qualité de l'eau souterraine au droit et autour d'un site potentiellement pollué.

Le site doit également être accessible facilement et en toute sécurité pour les intervenants et le matériel. Il doit permettre le déploiement du matériel de prélèvement autour de l'ouvrage sans trop de difficultés. Le diamètre de l'ouvrage doit permettre la mise en place du matériel de prélèvement à l'intérieur. L'éventuelle pompe en place doit pouvoir être enlevée ou utilisée pour le prélèvement si elle n'altère pas la qualité des eaux souterraines et permet de garantir une bonne représentativité de l'échantillon.

Afin de garantir leur pérennité, les points du réseau de surveillance pourraient figurer dans les documents d'urbanisme : plan local d'urbanisme (PLU), plan d'occupation des sols (POS) ou carte communale (CC).

8.4. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON

8.4.1. Bilan sur la qualité des eaux souterraines

Un bilan complet sur la qualité des eaux souterraines de la Métropole de Lyon demande une étude détaillée et complexe. L'analyse réalisée dans ce chapitre reste partielle et concerne une méthode simplifiée d'occurrence de détection.

Sur la Métropole de Lyon, un total de 617 qualitomètres est présent dans la base de données ADES (www.ades.eaufrance.fr) (Figure 31). L'ensemble des qualitomètres suivent partiellement la localisation des zones de sources de pollution potentielles et avérées (réseau ICPE) ainsi que des captages d'eau potable (réseau SISE-EAUX). Ainsi, la densité de qualitomètres est forte au droit du champ captant de Crépieux-Charmy et sur la vallée du Rhône au sud de Lyon (vallée de la chimie). Bien que ces qualitomètres sont répartis sur une partie importante de la Métropole de Lyon, il est possible de noter des lacunes de suivi, notamment dans le centre de Lyon, sur la plaine de l'est lyonnais et sur les aquifères peu vulnérables et soumis à une faible pression urbaine. 471 qualitomètres, comportant au moins une analyse, se répartissent 605 529 résultats pour des composés très variés :

- 1 384 composés chimiques ont au moins un résultat d'analyse ;
- ces 1384 composés chimiques sont regroupés en 6 groupes (et 68 sous-groupes) de composés définis dans la matrice activités/polluants (Annexe 5 – 1.4.) :
    - groupe « Chimique » : 18 composés chimiques ;
    - groupe « Eléments minéraux » : 36 composés chimiques ;
    - groupe « Métaux et métalloïdes » : 37 composés chimiques ;
    - groupe « Micropolluants organiques » : 848 composés chimiques ;
    - groupe « Pharmaceutiques et hormones » : 17 composés chimiques ;
    - groupe « Phytosanitaires » : 190 composés chimiques ;
    - non listés dans la matrice activités/polluants : 238 composés chimiques.

Les deux familles de composés, COHV et phtalates, sont reprises pour l'exploitation des analyses disponibles dans ADES (cf. 6.4.1 Cartographie des sources potentielles de pollution et de la pression potentielle pour les eaux souterraines). Sont extraits, les qualitomètres pour lesquels des analyses sont disponibles et pour lesquels les valeurs ont déjà été supérieures au seuil de quantification, pour (Figure 30) :

- les COHV : tétrachloroéthylène (PCE), tricholoéthylène (TCE) et somme PCE et TCE ;
- les phtalates : butyl-benzyl-phtalate, dibutylphtalate (code SANDRE gelé en 2005), diéthyl-phtalate, ethyl-hexyl-phtalate, n-buytl-phtalate et phtalate de diméthyle.

A noter que l'analyse est effectuée sur l'ensemble des chroniques, sans tenir compte de la nappe captée, de la date de prélèvement et d'éventuelles actions de dépollution.

Les cartes obtenues permettent de constater que les composés organiques de la famille des COHV sont fréquemment analysés sur la Métropole de Lyon (7920 analyses sur 292 qualitomètres). Le tétrachloroéthylène (PCE) et le tricholoéthylène (TCE) sont détectés sur une grande partie des qualitomètres (2550 analyses sur 213 qualitomètres) et se rencontrent sur l'ensemble du territoire, compte-tenu de la spatialisation des qualitomètres. La présence répandue du tricholoéthylène dans les eaux souterraines de l'agglomération est connue par les autorités et les acteurs locaux. Les phtalates sont rarement analysés (267 analyses sur 37 qualitomètres) et sont peu détectés (39 analyses). Cependant, 15 qualitomètres ont déjà enregistré la présence de phtalates, et notamment en n-butyl-phtalate. Ces points sont répartis sur l'ensemble du territoire et plus étonnamment sur l'amont des couloirs fluvioglaciaires.

Sur le secteur stratégique de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean, seuls 7 qualitomètres et 1 groupement (mélange de 2 qualitomètres) existent : 2 du réseau du SAGE de l'Est lyonnais, 3 du réseau ICPE et 3 du réseau SISE-EAUX (Figure 31). 112 qualitomètres, correspondant aux captages d'eau potable de Crépieux-Charmy, sont situés en aval. Les COHV sont détectés sur tous les qualitomètres prélevés, en amont et en aval du secteur, et les phtalates ne sont pas détectés en amont mais le sont en aval sur le champ captant de Crépieux-Charmy (Figure 30).

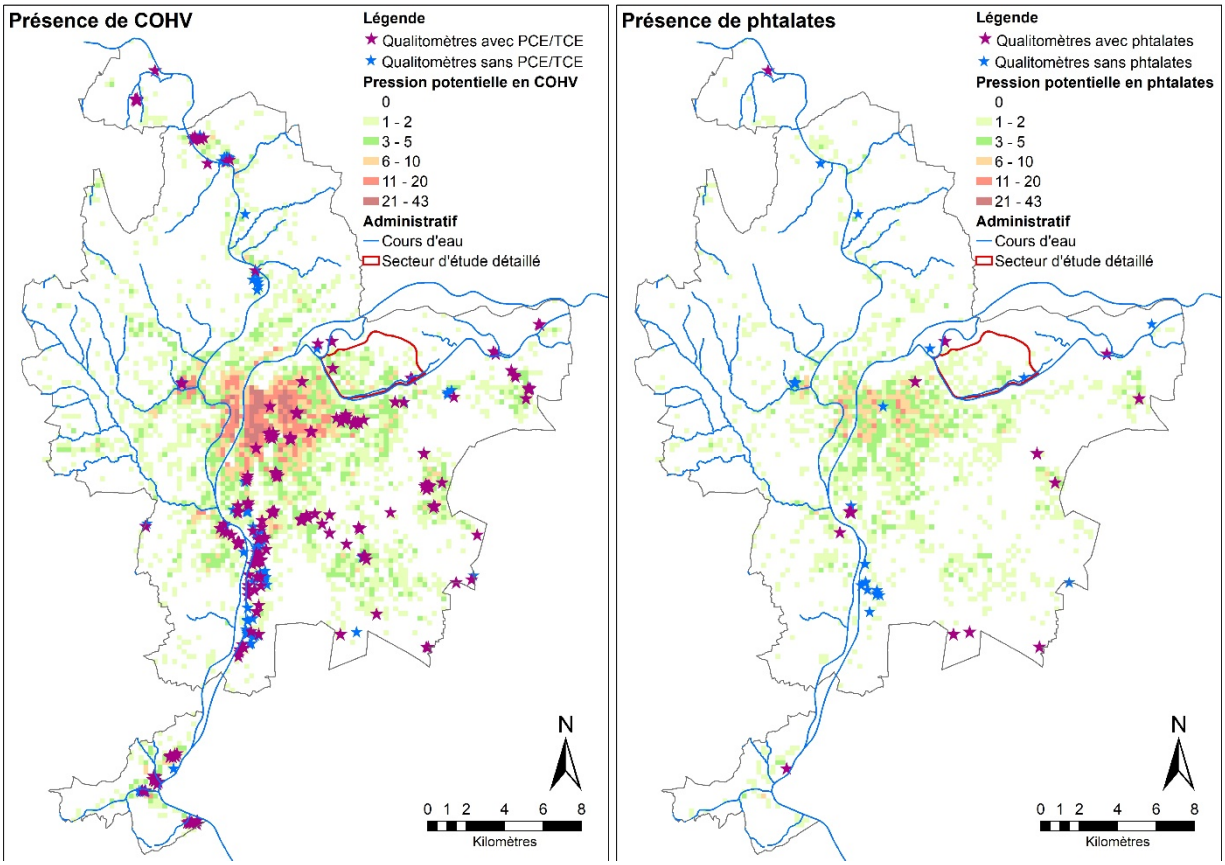


Figure 30 : Comparaison entre pression potentielle et qualitomètres présentant des concentrations en COHV (à gauche) et en phtalates (à droite) supérieures aux seuils de quantification.

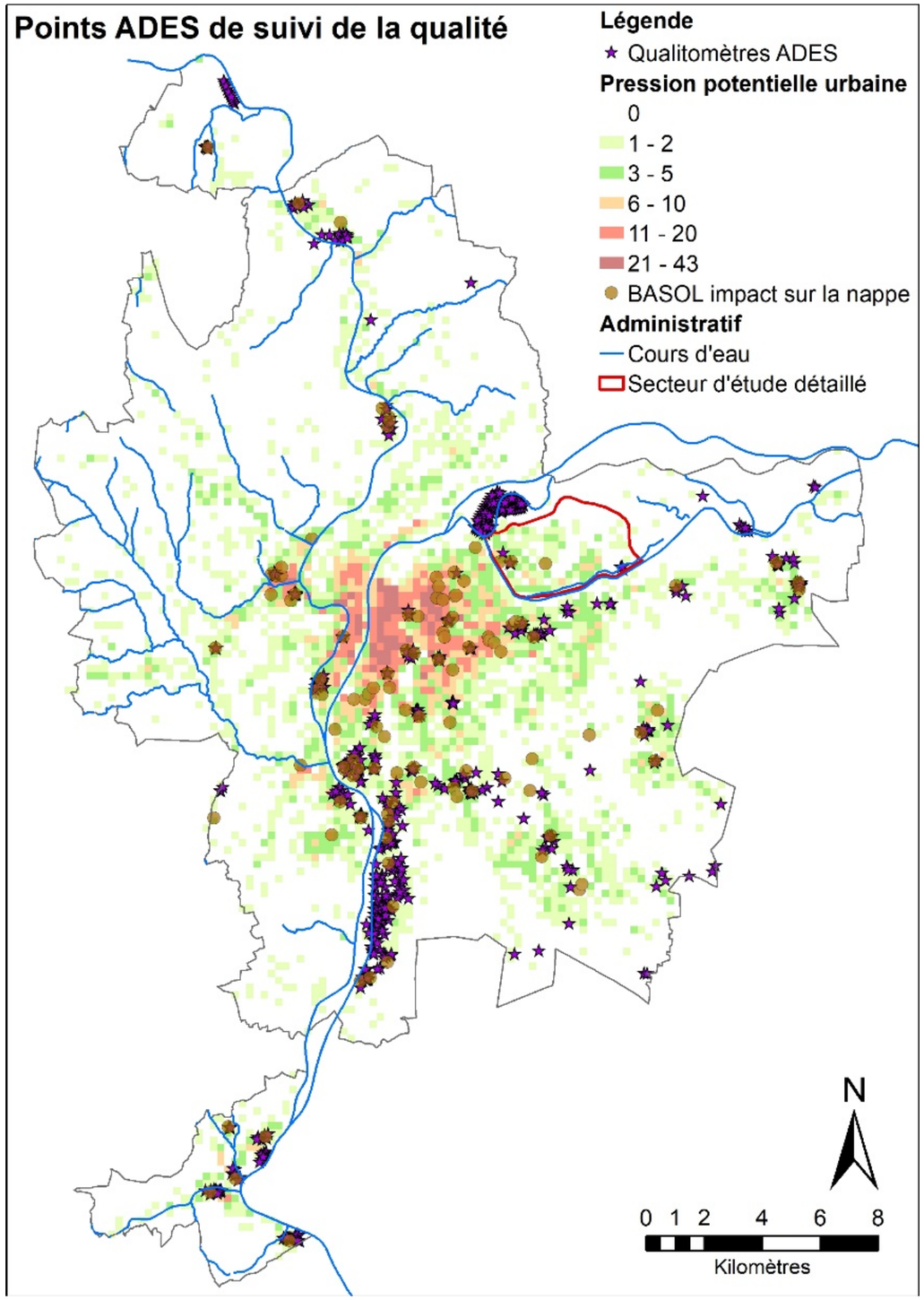


Figure 31 : Localisation des qualitomètres recensés dans les réseaux ADES, comparée à la pression potentielle urbaine représentée par la densité de sites industriels historiques et actuels (source : ades.eaufrance.fr, basol.developpement-durable.gouv.fr et www.georisques.gouv.fr).

8.4.2. Préconisations pour le programme de suivi

Les préconisations concernant le programme de suivi sont définies uniquement pour le secteur stratégique de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean.

Programme analytique

Sur le secteur stratégique de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean, la problématique principale étant la protection du champ captant de Crépieu-Charmy, le panel analytique doit inclure a minima les substances pour lesquelles il existe une valeur réglementaire relative à la qualité des eaux et des eaux brutes destinées à la consommation humaine (valeurs limites de l'annexe 1 et de l'annexe 2 de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine).

Cependant, compte-tenu de la diversité des activités en amont du champ captant, les paramètres complémentaires à suivre sont nombreux. A noter que le tétrachloroéthylène et le trichloréthylène font partie des paramètres de l'annexe 1 de l'arrêté du 11 janvier 2007 alors que les phtalates, ponctuellement détectés en aval du secteur étudié, n'y sont pas mentionnés. Lors de la première campagne (et éventuellement, selon les résultats, lors des campagnes suivantes), de nombreux polluants minéraux ou organiques peuvent donc être intégrés : par exemple phtalates, toluène, xylènes, éthylbenzène, dichloréthylène, polychlorobiphényles (PCB), composés émergents comme les résidus de médicaments, perturbateurs endocriniens, polyfluoroalkylées PFAS…

Profondeur d'échantillonnage

Etant donné le grand nombre de substance de nature variée à analyser et parce que les captages d'eau potable captent les alluvions du Rhône sur toute leur épaisseur, il est important d'avoir une vision globale de la qualité des eaux souterraines sur toute la colonne d'eau. Pour cela, le prélèvement pourra se faire à l'aide d'une pompe immergée au milieu de la crépine. En cas de détection d'un paramètre en concentrations élevées, des échantillonnages à différentes profondeurs pourront être mis en œuvre sur les ouvrages concernés, afin de caractériser la pollution verticalement. Ces profondeurs d'échantillonnage seront définies en prenant en compte le comportement du polluant au sein de la zone saturée, la position du mur de l'aquifère et du niveau statique ainsi que les niveaux crépinés.

Fréquence et période des campagnes de mesures

D'après les coupes géologiques du secteur, le milieu aquifère est considéré comme un milieu poreux homogène. Les prélèvements peuvent alors être réalisés 2 fois par an en périodes de hautes et basses eaux de manière synchrone pour les différents ouvrages.

8.4.3. Préconisations pour les caractéristiques des points de suivi

Les préconisations concernant les caractéristiques des points de suivis sont définies uniquement pour le secteur stratégique de Vaulx-en-Velin et Villeurbanne-Saint-Jean.

Profondeur totale et niveaux crépinés

En principe, le futur réseau devrait être adapté à l'ensemble des polluants, dissous, flottants et coulants ainsi qu'aux enjeux à protéger et usages (captages d'eau potable et forages d'irrigation agricole et des pelouses accueillant du public). Les ouvrages devraient ainsi capter toute la zone non saturée de l'aquifère alluvial : le niveau haut de la crépine doit se situer au-dessus du niveau statique de la nappe, mesuré entre 2 et 5 m de profondeur, et le niveau bas doit atteindre les argiles morainiques, rencontrées entre 18 et 23 m de profondeur. Néanmoins, cette conception du réseau reste théorique au regard des implications techniques et économiques que ces aspects représentent. Cette remarque justifie de bien apprécier les objectifs du réseau, de bien connaître les caractéristiques des ouvrages existants et des problématiques à prendre en compte.

Nature du tubage

Les tubages en polychlorure de vinyle (PVC) sont soupçonnés d'altérer les échantillonnages, en relarguant des composés chlorés lors de leur dégradation notamment en présence de polluants agressifs dans les sols et les eaux souterraines. Les solvants en phase organique peuvent également dissoudre les joints d'étanchéité et tubage en PVC. Ces problématiques sont rencontrées par les gestionnaires de réseaux de suivi de la qualité au droit de l'agglomération lyonnaise. Le trichloroéthylène est fréquemment détecté dans les eaux souterraines et l'interprétation des résultats pourrait être remise en question pour certains prélèvements issus d'un ouvrage en PVC.

Une attention particulière doit donc être apportée sur la résistance du matériau du tubage et des joints aux agressions des polluants suspectés présents dans les sols et les eaux souterraines, tels que les solvants chlorés (trichloroéthylène).

Pérennité et accessibilité de l'ouvrage

Dans un premier temps, les acteurs de la Métropole de Lyon s'orientent vers la conception d'un réseau se basant sur des ouvrages existants. Les ouvrages les plus facilement accessibles se situent en domaine public, notamment dans les parcs et sur le trottoir, mais ce sont également les plus vulnérables aux accidents et vandalismes. En domaine privé, la pérennité est plus certaine mais l'accès n'est pas toujours garanti.

9. Phases 5 : Mise en œuvre du réseau de surveillance

Durant la phase 5, les résultats des phases précédentes (densité, localisation théorique et caractéristiques des points de surveillance) sont exploités pour sélectionner ou créer des ouvrages de suivi pertinents (Figure 32). Une campagne de terrain, si une première campagne élargie n'a pas été effectuée lors des phases précédentes, peut être indispensable afin de choisir les ouvrages existants appropriés. Les campagnes de mesures et de prélèvements ainsi que les analyses sont ensuite réalisées selon le programme de surveillance défini préalablement (phase 4). Le financement et la diffusion des données s'organisent selon les modalités définies durant la phase 1, qui s'est poursuivie durant l'ensemble de l'étude.

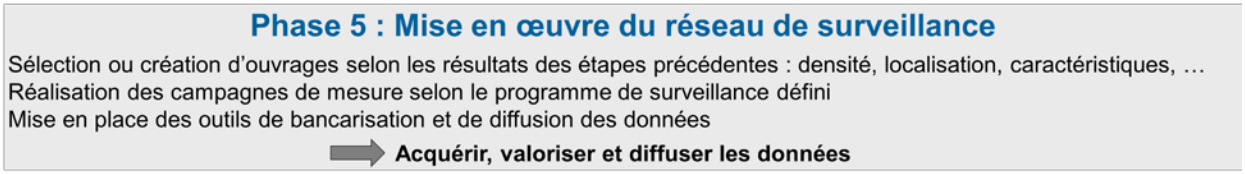


Figure 32 : Méthodologie de la phase 5 – mise en œuvre du réseau de surveillance.

L'ensemble des données à collecter est présenté en Annexe 5 et concerne les données sur les points d'eaux existants (4.1 Points d'eau - 4.2 Réseaux qualitatifs des eaux souterraines - 4.3 Réseaux quantitatif des eaux souterraines).

9.1. SELECTION ET CREATION DES OUVRAGES DE SURVEILLANCE

Lors de la conception du réseau de surveillance, deux stratégies peuvent être mises en œuvre et se compléter. La première stratégie consiste à sélectionner des ouvrages existants. Les avantages économiques sont alors évidents. Cependant, la localisation et les caractéristiques des points existants ne répondent pas toujours aux critères définis pour les objectifs du réseau de surveillance. De plus, l'accès et la pérennité des ouvrages privés posent fréquemment problème. La seconde stratégie est de réaliser l'ensemble ou une partie des ouvrages. Le réseau est alors adapté au plus près des problématiques et les ouvrages appartiennent au gestionnaire ou au financeur du réseau. Toutefois, les points sont alors le plus souvent implantés en domaine public, ce qui favorise leur accès mais les exposent à des actes de vandalisme.

Les principales questions à se poser pour sélectionner ou créer des ouvrages pertinents découlent des phases précédentes :

- Est-ce que la densité du réseau est suffisante sur le secteur (phase 2) ?
- Est-ce que l'ouvrage est bien implanté, par rapport au réseau théorique défini par le modèle sources / voies de transfert / enjeux à protéger (phase 3) ?
- Est-ce que la profondeur (totale et crépinée) de l'ouvrage est adaptée au suivi envisagé (phase 4) ?
- Est-ce que la nature du tubage est adaptée (phase 4) ?
- Est-ce que l'ouvrage est en bon état ?
- Est-ce que l'ouvrage est pérenne ?
- Est-ce que l'ouvrage est accessible ?
- Est-ce que l'ouvrage dispose de données historiques ?

9.1.1. Sélection d'ouvrages existants

L'étape préliminaire à la conception d'un réseau basé sur des ouvrages existants consiste à réunir le maximum d'informations sur les points d'eau de la zone d'étude : code d'identification (le code BSS est recommandé), coordonnées géographiques, existence actuelle (opérationnel, supposé existant ou détruit), nappe captée et niveaux crépinés (coupes géologiques et techniques), niveaux piézométriques avec altitude et nature du repère de mesure, coordonnées du propriétaire et conditions d'accès, usage de l'eau (prélèvements et suivi), conditions de mise en œuvre des échantillonnages (diamètre du tubage et équipement), protection vis-à-vis d'éventuelles pollutions de surface, pérennité…

Un recensement des ouvrages existants et opérationnels est réalisé dans les bases officielles et auprès des acteurs identifiés (Annexe 5 – 4.). La mise en cohérence des différentes bases n'est pas aisée du fait d'un nombre souvent très important de points d'eau, de l'absence de données communes (code d'identification) et de données parfois obsolètes. La mise en place prochaine d'un guichet unique de déclaration en ligne des ouvrages souterrains DUPLOS (déclaration unifiée pour les ouvrages souterrains) devrait permettre de simplifier le croisement entre les bases de données. Le code BSS sera alors le référentiel interministériel permettant d'identifier les ouvrages souterrains (puits, forages, sondages…). L'objet de DUPLOS est de simplifier les démarches administratives et techniques liées aux opérations de déclaration d'ouvrages souterrains et de fluidifier les échanges de données entre administrations dans un contexte réglementaire complexe (code minier, code de l'environnement, loi sur l'eau, géothermie…).

Une sélection théorique peut être réalisée sur l'ensemble des points recensés par une analyse multicritère. Les critères seront choisis et hiérarchisés afin de sélectionner les ouvrages les plus pertinents selon les objectifs de densité (phase 2), de localisation (phase 3) et du suivi (phase 4) et afin de ne pas écarter certains ouvrages potentiellement intéressants du fait de lacunes d'informations.

Les conditions réelles du terrain influencent la mise en œuvre d'une surveillance sur un ouvrage. Cette sélection théorique est donc à valider sur le terrain, lors d'une simple reconnaissance ou lors d'une campagne élargie si elle n'a pas été réalisée lors des phases précédentes. Cette visite sur site permet de valider les points d'eau opérationnels et de vérifier leurs caractéristiques. Elle peut être complétée par une mesure piézométrique, une vérification de la profondeur totale (absence de comblement), une inspection caméra (état des crépines, absence d'objet), un pompage (vérification de la productivité), des mesures in situ des paramètres physico-chimiques et des prélèvements pour analyses.

A l'issue de la sélection des ouvrages pertinents parmi les ouvrages existants, un manque d'ouvrages pourra apparaitre sur certains secteurs, conformément à la densité (phase 2) et à la localisation (phase 3) recommandées. La question de création de nouveaux ouvrages pourra alors se poser.

9.1.2. Création d'ouvrages

La création de nouveaux ouvrages est à réaliser selon la densité (phase 2) et la localisation (phase 3) recommandées et conformément aux préconisations techniques énoncées en phase 4 et dans les normes NF X10-999 d'août 2017 (réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages) et NF X31-614 de décembre 2017 (réalisation d'un forage de contrôle ou de suivi de la qualité de l'eau souterraine au droit et autour d'un site potentiellement pollué).

9.1.3. Convention d'accès avec les propriétaires des points de surveillance

Afin de garantir la pérennité du réseau et l'accessibilité au site, les points suivis doivent a minima faire l'objet d'un accord de principe de la part de leur propriétaire. Une convention peut être établie entre le propriétaire de la parcelle et/ou de l'ouvrage et le gestionnaire du réseau de surveillance. Elle permet de fixer les termes et conditions d'accès au point. La question du dédommagement peut également se poser.

9.2. MISE EN ŒUVRE DES CAMPAGNES DE MESURES

Une fois le réseau défini et mis en place, une première campagne de prélèvements et d'analyses est à mener. Elle permettra d'avoir une photographie de la qualité des eaux souterraines de la zone urbaine au début du suivi (état initial) et d'apprécier la variabilité des divers paramètres. Il est conseillé de réaliser une campagne de suivi élargie en termes d'ouvrages et d'analyses si elle n'a pas déjà été réalisée en phase 4 (8.1.1. Bilan sur la qualité des eaux souterraines). Les campagnes suivantes respecteront les préconisations définies en phase 4.

9.2.1. Campagnes de prélèvements

Les protocoles d'échantillonnage sont à adapter aux substances recherchées. Pour assurer au mieux la représentativité de l'échantillonnage, doivent être respectées les recommandations de la norme NF X31-615 de décembre 2017 relative au prélèvement et échantillonnage des eaux souterraines dans des forages de surveillance pour la détermination de la qualité des eaux souterraines. Les préconisations du guide sur la surveillance des eaux souterraines peuvent également être consultées : ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2019).

Pour l'ensemble des campagnes, en vue de réaliser un prélèvement représentatif et de pouvoir comparer entre elles les mesures réalisées à des époques différentes, il parait impératif de rédiger un protocole de prélèvement auquel devront se conformer les opérateurs. Ce protocole peut d'ailleurs être propre à chaque ouvrage, selon la nature de son tubage et selon son équipement en moyens de pompage. Dans le cadre d'une prestation par un organisme extérieur, un cahier des charges est à rédiger pour définir le cadre de la prestation : désignation des points de suivi, définition du panel analytique, des fréquences et des périodes de prélèvements, protocoles de prélèvements, format et contenu des produits livrés, définition des modalités d'acheminement des échantillons au laboratoire… De plus, le BRGM recommande de produire une « fiche de vie » par ouvrage, partagée par l'ensemble des intervenants sur site et des gestionnaires des points. Cette fiche permet d'assurer la traçabilité des informations relatives au nivellement et au repère associé, aux modalités d'accès ou d'entretien, au matériel en place, au suivi de la profondeur, etc.

A noter que la mesure du niveau statique est indispensable pour pouvoir interpréter les variations et évolutions spatiales de la qualité des eaux souterraines, en fonction des écoulements. Le repère de mesure doit être clairement identifié pour éviter toutes confusions lors des campagnes suivantes. Le nivellement du repère de mesure de chaque ouvrage doit être réalisé avec un GPS haute précision ou par un géomètre professionnel, afin de pouvoir définir l'altitude du niveau piézométrique, interpréter ces mesures et tracer des cartes piézométriques. Une grande fiabilité est nécessaire afin de caractériser l'amont et l'aval notamment en milieu alluvial. En cas d'incident sur la tête de l'ouvrage, le repère de mesure est à redéfinir, à matérialider et à niveler de nouveau.

9.2.2. Analyses

Un partenariat avec le laboratoire en charge des analyses est à formaliser sous forme d'un cahier des charges : substances à analyser, limites de quantification (LQ), normes et procédures utilisées… L'utilisation d'un laboratoire accrédité COFRAC pour les types d'analyses demandées est à privilégier. Afin d'assurer une certaine cohérence dans les protocoles d'analyses mis en œuvre, il est fortement recommandé de ne faire intervenir qu'un seul laboratoire.

L'attention doit être portée sur toutes les étapes de la chaine analytique, de la détermination des substances à analyser jusqu'au choix de la méthode d'analyse en laboratoire (Figure 33), en particulier :

- le renseignement de toutes les informations exigées dans la fiche de prélèvement ;
- le respect du protocole de prélèvement ;
- la maîtrise des étapes de conditionnement, stockage, transport, etc.

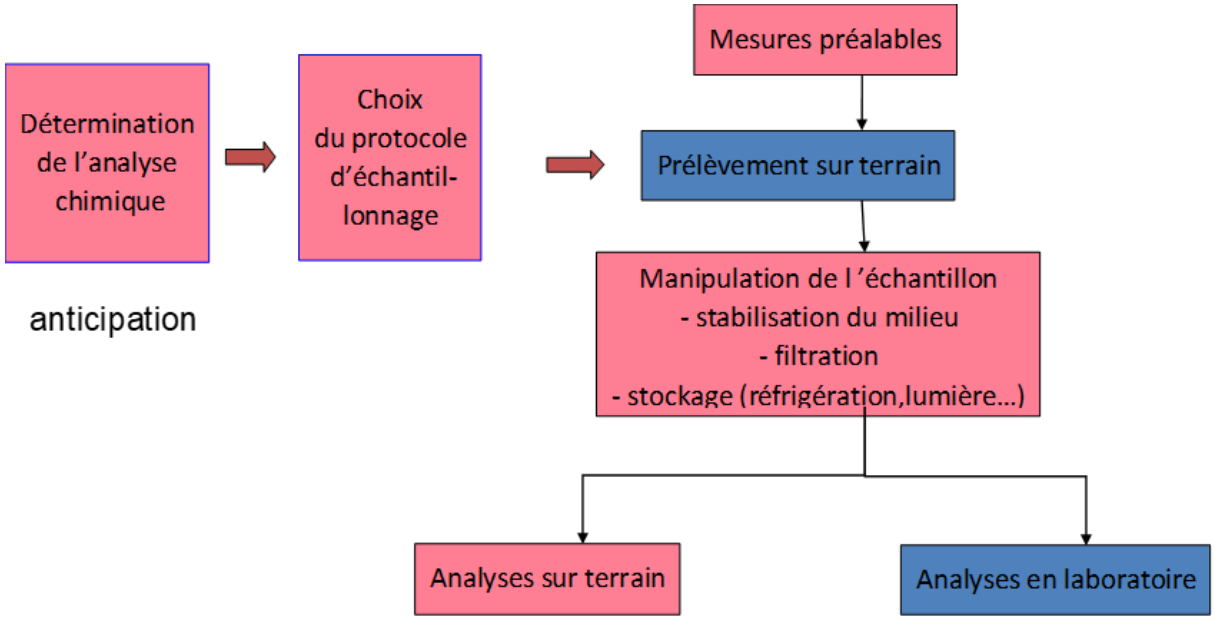


Figure 33 : Les différentes étapes de la chaine analytique

9.2.3. Convention de partage de données avec les gestionnaires de réseaux

Dans le cadre de mesures réalisées dans le cadre d'autres suivis, des conventions peuvent être signées avec les gestionnaires de points de mesures pour assurer le respect des protocoles d'échantillonnage et d'analyses. Ces conventions permettront également de fixer les règles de transmission régulière et les formats des données. Pour rappel, les conditions de mutualisation des données sont définies en phase 1 (5.1.3 - Mutualisation des données).

9.3. RAPPORT DE SUIVI ET INTERPRETATION DES DONNEES D'UNE CAMPAGNE

Le rapport de suivi relatif à une campagne de surveillance a pour objet de :

- résumer la campagne réalisée ;
- restituer les résultats acquis au cours de l'intervention ;
- mettre en évidence un éventuel impact ou une évolution non attendue d'une pollution préalablement identifiée et en cours de gestion depuis la précédente campagne.

Un modèle de rapport de suivi a été développé dans le cadre du guide sur la surveillance des eaux souterraines, disponible sur le lien : ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2019). Ce modèle permet d'apporter un cadre méthodologique en incluant des modèles d'illustrations. Bien que conçu dans le cadre de la surveillance à l'échelle d'un site, il présente de nombreuses et très utiles recommandations.

L'interprétation des données doivent se faire au regard de la nappe captée, de la profondeur d'échantillonnage, des sens d'écoulement (de l'amont vers l'aval), de la tendance observée et de valeurs réglementaires ou critères de gestion. Des recommandations relatives à l'interprétation des résultats sont données en chapitres 8.1.3 (Outils d'interprétation des résultats) et 8.1.2. (Comparaison avec des valeurs de référence et selon les usages actuels et futurs). Un évènement qui apparait en contradiction avec les prédictions ou évolutions attendues doit être expliqué soit par une incertitude sur la mesure et l'analyse, soit par des évènements anthropiques (pollutions accidentelles, mise en place ou arrêt d'un pompage…) ou naturels (précipitations élevées ou faibles, atténuation d'une pollution résiduelle…). Une étude spécifique peut être engagée de manière anticipée afin de rechercher l'origine d'une évolution « anormale » (dépassement de critère…). De manière générale, il n'est pas pertinent d'effectuer une analyse statistique après chaque nouvelle campagne de mesures. Selon la dynamique de l'aquifère et le nombre de données annuelles acquises, une analyse statistique peut être réalisée tous les 2 à 4 ans et ne concernera alors que la phase 6 d'optimisation du réseau.

Pour rappel, les données (analyses et niveaux), résultats d'interprétation et rapports sont à diffuser selon les modalités définies lors de la phase 1 (5.1.4 - Gestion et diffusion des données).

9.4. APPLICATION AU CAS CONCRET DE L'AGGLOMERATION DE LYON

9.4.1. Recensement des ouvrages existants

Dans un premier temps, les acteurs de la Métropole de Lyon s'orientent vers la conception d'un réseau se basant sur des points d'eau existants (Annexe 5 - 4.1 Points d'eau), en priorisant ceux faisant partie de réseaux qualitatifs (Annexe 5 - 4.2 Réseaux qualitatifs des eaux souterraines) et/ou quantitatifs (4.3 Réseaux quantitatif des eaux souterraines). Une base de données, développée pour le projet, est complétée avec l'ensemble des informations collectées sur les points d'eau existants. Les extractions de bases et documents suivants ont été exploités et compilés (Figure 34) :

- BSSeau (infoterre.brgm.fr) : 3394 points d'eau avec un code BSS ;
- ADES (www.ades.eaufrance.fr) : 617 qualitomètres et 19 piézomètres avec un code BSS dont :
- 23 qualitomètres et 19 piézomètres (dont 7 à la fois qualitomètres et piézomètres) des réseaux de la Métropole de Lyon, du BRGM, du SAGE de l'Est lyonnais et de l'Agence de l'eau ;
- 453 qualitomètres du réseau ICPE ;
- 141 qualitomètres du réseau SISE-EAUX, correspondant aux captages d'eau potable ;
- BNPE (bnpe.eaufrance.fr) : 474 points d'eau avec un code BNPE, avec un usage eau potable et domestique (41), industriel (281), irrigation (55), refroidissement (39), volume technique (6) et inconnu (47) ;
- base de la DDT69 : 103 points d'eau créés entre 2016 et 2018 pour 6 suivi ICPE et 97 suivi IOTA, avec un identifiant Cascade, et complétés par :
- des informations de la Métropole de Lyon ;

- l'inventaire de piézomètres réalisés par le SAGE Est lyonnais : 91 points d'eau avec un identifiant SAGE (principalement suivi IOTA et ICPE) ;
- points mesurés lors d'anciennes campagnes piézométriques exceptionnelles : 124 points d'eau avec code BSS :
- 110 points d'eau captant les nappes alluviales et fluvioglaciaires (1989, 2004 et 2008) ;
- 14 points d'eau captant la nappe de la molasse du Miocène (2009).

Les renseignements collectés ne permettent pas toujours d'établir un lien entre les ouvrages issus des différentes bases.

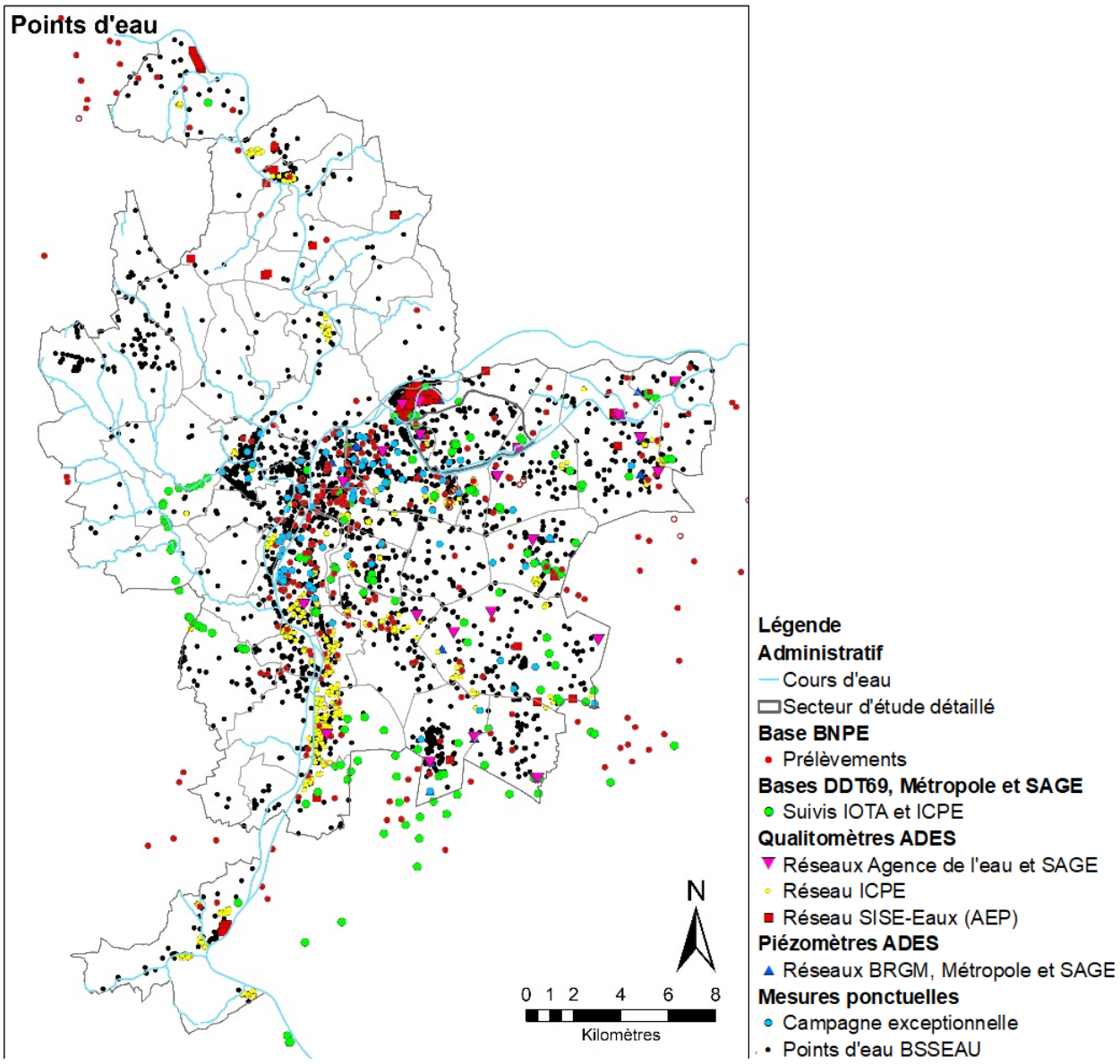


Figure 34 : Localisation des points d'eau recensés sur l'agglomération de Lyon

Les critères suivants ont été retenus pour le futur réseau de surveillance, en accord avec les acteurs de l'agglomération de Lyon, selon leur ordre de priorité (Tableau 4 et Figure 35) :

- existence avérée ;
- suivi historique existant (qualité et/ou quantité) ;

- niveaux crépinés sur la totalité de la zone saturée ;
- pérennité garantie et protection vis-à-vis d'éventuelles pollutions de surface ;
- pour le suivi qualité, diamètre et nature du tubage permettant les prélèvements pour échantillonnage.

Les bases de données tableaurecensent 122 ouvrages sur le secteur stratégique de Vaulx-en-Velin Villeurbanne-Saint-Jean. Le nombre et la localisation des points d'eau avant sélection semblent suffisants pour répondre aux préconisations en terme de densité du réseau de surveillance théorique (13 minimum au sud-ouest et 3 minimum au nord-est). Au droit du secteur stratégique, l'aquifère des alluvions est présent jusqu'à 16 à 18 m de profondeur. La sélection a concerné les ouvrages atteignant une profondeur supérieure à 16 m, crépinés sur la totalité de la zone non saturée et dont les parois ne sont pas nues ou en buses en béton. Après application des critères, le nombre de points d'eau recensés est fortement réduit (Tableau 4 et Figure 35). Ce constat s'explique notamment par la faible profondeur de certains ouvrages et surtout par l'absence d'information sur les profondeurs atteintes. Ainsi les informations renseignées dans la base BNPE ne fournissent pas d'indications sur le code BSS sur la profondeur (totale et crépinée) des ouvrages. Les points de prélèvements ont donc tous été éliminés, sur une base uniquement documentaire. Les points d'eau recensés sont en nombre tout juste suffisant pour remplir les objectifs de densité, avec une répartition globalement correcte.

Bases de données	Avant application des critères	Après application des critères
ADES qualitomètres Agence de l'eau et SAGE Est lyonnais	2	0
ADES qualitomètres ICPE	3	2
ADES qualitomètres AEP (eau potable)	2	0
ADES piézomètres	2	1
BNPE	5	0
Bases IOTA et ICPE	12	3
Anciennes campagnes exceptionnelles	2	0
BSSeau	94	13
TOTAL	**122**	**19**

Tableau 4 : Nombre de points d'eau, avant et après application de critères, sur le secteur d'étude

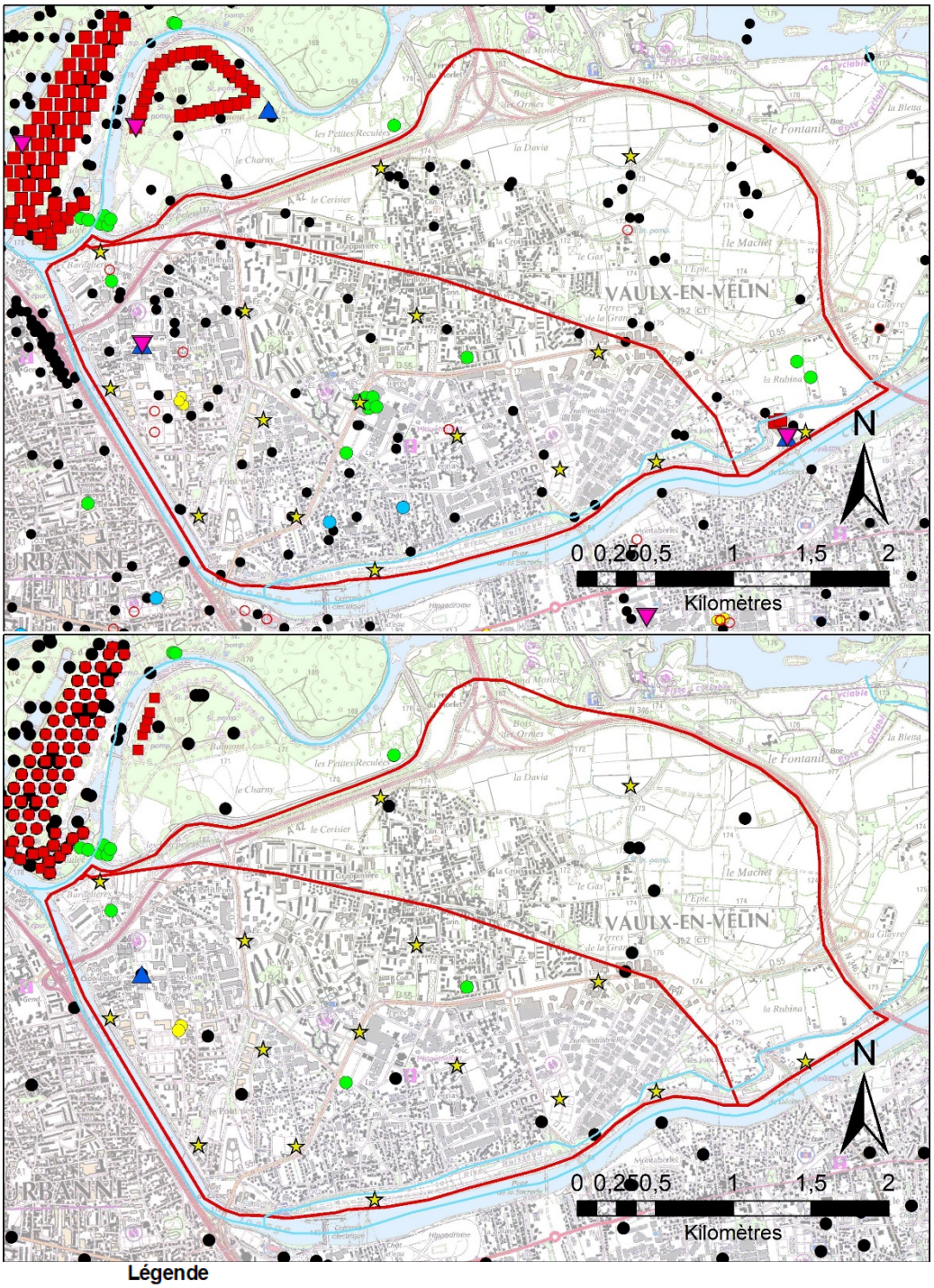


Figure 35 : Localisation des points d'eau recensés, avant (en haut) et après (en bas) application de critères

9.4.2. Visite de terrain

Pour la visite de terrain, le critère de profondeur a été supprimé. En effet, ce critère était trop restrictif, l'information sur la profondeur étant souvent absente. De plus, il a été jugé intéressant de vérifier sur le terrain si les profondeurs renseignées étaient correctes. L'ensemble des points faisant l'objet d'un suivi pérenne sont conservés (SAGE de l'Est lyonnais, Agence de l'eau, Métropole de Lyon et BRGM). Pour rappel, le réseau piézométrique de la Métropole de Lyon a permis de caler un modèle hydrogéologique intégrant l'influence des ouvrages souterrains et peut servir de base pour la conception du réseau.

La visite sur le terrain s'est déroulée le 6 décembre 2018 et a permis de rassembler des informations complémentaires sur 23 ouvrages recensés (Annexe 6). Les ouvrages accessibles ont fait l'objet de plusieurs actions : nivellement avec un GPS de précision 5 m, mesures des caractéristiques (nature et hauteur du repère, diamètre et nature du tubage, protection), information sur l'accessibilité, mesure piézométrique, photographies, passage caméra sur quelques points. Une recherche d'ouvrages non déclarés a également été menée et 2 points supplémentaires, non déclarés, ont été identifiés (Annexe 6).

Sur les 25 points d'eau visités, 13 ont été jugés pertinents pour intégrer le réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines et 7 pour servir uniquement pour les mesures piézométriques (Figure 36). Des points ont été écartés du suivi qualitatif du fait d'une profondeur insuffisante ou de matériel inadapté (buses en béton). Les 13 points qualitatifs pertinents correspondent globalement à 3 des points du réseau théorique (sur 16 minimum). En effet, de nombreux ouvrages sont implantés sur les mêmes parcelles, pour le suivi d'une ICPE ou d'un chantier en cours (exemple : ZAC Hôtel de ville).

En perspective, les 12 points jugés pertinents en BSSeau mais non visités pourraient également faire l'objet d'une visite de terrain. Les documents scannés en BSS pourraient être exploités pour compléter la base de données mais ce travail reste fastidieux. Pour rappel, les informations renseignées en BSS sont souvent anciennes et méritent d'être actualisées. Enfin, une enquête auprès des services communaux pourrait être menée afin d'identifier des forages non déclarés (irrigation et entretiens des voiries, des parcs et jardins, des stades et des cimetières, remplissage des piscines municipales). Enfin, sur les secteurs sans points de suivis identifiés, de nouveaux points d'eau pourraient être créés, en respectant les préconisations techniques (phase 4).

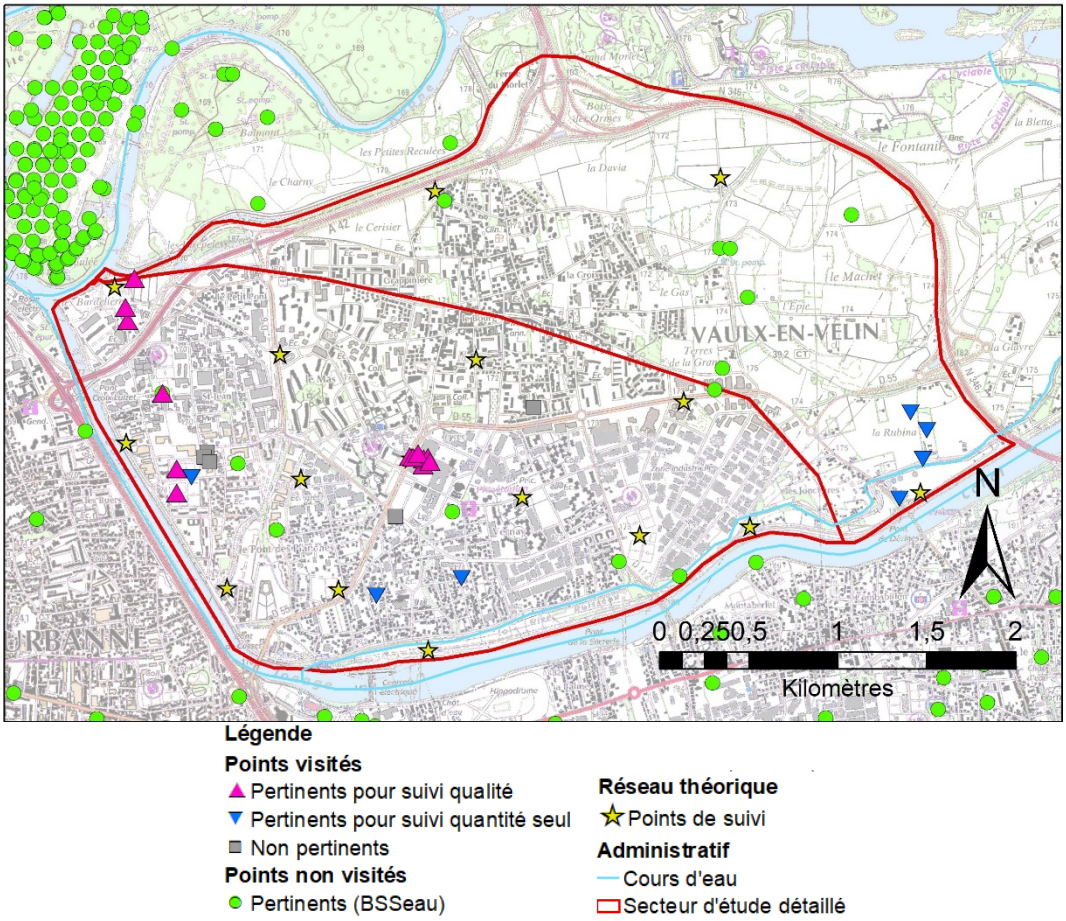


Figure 36 : Localisation des points pertinents pour un suivi de la qualité des eaux souterraines.

9.4.3. Retour d'expérience

Le retour d'expérience montre qu'une analyse multicritère pour la sélection d'ouvrages pertinents, aussi performante soit-elle, peut être remise en cause par la réalité du terrain du fait notamment de données lacunaires ou erronées. Ainsi, sur les 13 points visités pouvant être intégrés au réseau de suivi qualitatif, seuls 2 avaient été jugés pertinents lors de la sélection par critères et 2 n'étaient pas déclarés et ont été identifiés sur le terrain. De plus, le besoin de recenser les ouvrages selon un référentiel commun a été clairement identifié afin de permettre de croiser les différentes bases consultées et de compiler leurs informations. Ainsi, l'utilisation du code national de la Banque du Sous-Sol (BSS), attribué par le BRGM aux ouvrages souterrains, comme l'identifiant unique des points d'eau est fortement recommandé.

Certains ouvrages sont potentiellement intéressants tels que les forages d'irrigation, car pérennes, correctement entretenus, ponctuellement exploités et crépinés sur toute la zone saturée. Les forages communaux d'arrosage sont également facilement accessibles. Les piézomètres de suivis des ICPE sont souvent réalisés dans les règles de l'art et disposés en amont et aval d'un site potentiellement pollué mais leurs caractéristiques sont souvent fixées pour répondre à un suivi réglementaire lié aux activités du site. Enfin les points de suivis IOTA sont localisés au droit de secteurs souvent prioritaires (reconversion foncière) mais restent peu pérennes et parfois mal conçus et protégés (Figure 37).

Figure 37 : Photographies et passage caméra d'un point de suivi d'un site IOTA (point ACOMPL-84).

10. Phase 6 : Optimisation du réseau de suivi

La mise en œuvre du réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines doit s'accompagner de mesures permettant d'évaluer à moyen et long terme l'efficacité du réseau et du programme de mesures et, si besoin, de faire évoluer ceux-ci. La phase finale propose donc de réaliser régulièrement une campagne élargie en termes d'ouvrages et d'analyses ainsi qu'un retour d'expériences et un bilan de l'ensemble des résultats d'analyses (Figure 38). Ce bilan peut permettre d'envisager une adaptation du réseau, c'est-à-dire une optimisation des points suivis et des campagnes d'analyses ainsi que l'intégration de nouveaux secteurs stratégiques.

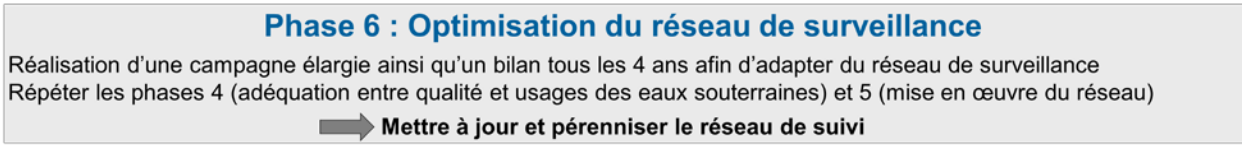


Figure 38 : Méthodologie de la phase 6 – optimisation du réseau de surveillance.

10.1. CAMPAGNE ELARGIE ET RAPPORT DE BILAN

10.1.1. Réalisation d'une campagne élargie

La réalisation d'une campagne élargie en termes d'ouvrages et d'analyses peut être menée régulièrement afin de détecter d'éventuelles anomalies susceptibles de faire évoluer le réseau (8.1.1. Bilan sur la qualité des eaux souterraines). A la manière de ce qui est fait dans le domaine des sites et sols pollués en France, il est recommandé de renouveler ce type de campagne tous les 4 ans. Ainsi, d'après la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (Ministère en charge de l'environnement, 2017) : « *lorsqu'une surveillance environnementale est en place, il est recommandé de procéder à des bilans des résultats de cette surveillance, par exemple, tous les quatre ans. Il ne s'agit en aucune manière de modifier les modalités de la surveillance déjà en place pour les ramener à une fréquence de prélèvement quadriennale, mais bien d'analyser et d'exploiter régulièrement les résultats de la surveillance environnementale lorsqu'elle est requise et en place, pour l'adapter aux évolutions constatées* ».

10.1.2. Rapport de bilan et de la campagne élargie

Le rapport de bilan fait suite à plusieurs années de suivi (bilan tous les 4 ans) et/ou à une campagne exceptionnelle élargie en terme de nombre de points et de paramètres analysés et doit permettre de :

- analyser les évolutions, de rechercher l'origine des tendances mises en évidence et de mettre en perspective les résultats acquis au cours des dernières années ;
- vérifier la pertinence du réseau au regard d'évolutions constatées : sur la piézométrie pompages ayant pu modifier l'écoulement, nouveaux aménagements du sous-sol, etc.), sur les concentrations (apparition ou évolution d'un panache), et sur le contexte (apparition/disparition de sources et d'enjeux à protéger) ;
- justifier les propositions d'évolution du réseau qui pourraient s'avérer nécessaires, concernant le nombre de points, la fréquence de suivi et/ou les substances et paramètres considérés.

Des recommandations relatives à l'interprétation des résultats sont données en chapitres 8.1.3 (Outils d'interprétation des résultats) et 8.1.2. (Comparaison avec des valeurs de référence et selon les usages actuels et futurs). Le rapport de bilan doit être plus conséquent et l'effort de réflexion plus poussé que dans le rapport de suivi relatif à une campagne de surveillance. L'argumentaire développé peut s'appuyer sur des outils statistiques, des outils de cartographie, de géostatistiques, voire sur un modèle hydrogéochimique si le nombre et la qualité des données le permettent. Un modèle de rapport de bilan a été développé dans le cadre du guide sur la surveillance des eaux souterraines, disponible sur le lien : ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2019). Ce modèle permet d'apporter un cadre méthodologique en incluant des modèles d'illustrations. Bien que conçu dans le cadre de la surveillance à l'échelle d'un site, il présente de nombreuses et très utiles recommandations.

Pour rappel, les données (analyses et niveaux), résultats d'interprétation et rapports seront diffusés selon les modalités définies lors de la phase 1 (5.1.3 - Mutualisation des données).

10.2. OPTIMISATION DU RESEAU DE SURVEILLANCE

Idéalement, un réseau de surveillance répondant à des objectifs bien précis doit être structuré de façon telle qu'il n'y ait pas de perte d'informations indispensables et d'acquisition d'informations redondantes induisant un surcoût de fonctionnement (bien qu'une certaine richesse d'information puisse être intéressante car elle permet de confronter les mesures faites et donc constitue un élément de validation). Sur la base des résultats d'interprétation, l'optimisation du réseau de surveillance peut consister à rejouer les phases 2 à 5, afin de prendre en compte d'éventuels nouveaux inventaires historiques et la modification du milieu urbain au cours du temps. Des outils d'optimisation existent également en bibliographie et sont listés ci-après, avec quelques exemples illustratifs.

10.2.1. Evaluation qualitative du suivi

L'évaluation qualitative repose sur une liste de questions qui conduit à argumenter la nécessité d'une évolution de la surveillance (conservation, suppression, création de nouveaux points, modification de la fréquence, paramètres suivis…). Cette méthode est décrite dans le guide sur la surveillance des eaux souterraines, disponible sur le lien : ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2019).

10.2.2. Evaluation quantitative du suivi

L'approche quantitative doit être menée pour réaliser un bilan du suivi et une optimisation du réseau par une méthode temporelle (statistique), probabiliste ou spatiale.

De nombreuses méthodes statistiques existent pour réaliser une évaluation temporelle : www.itrcweb.org/gsmc-1 et plus particulièrement www.itrcweb.org/gsmc-1/Content/GW%20Stats/Appendix%20D%20Software/D%200%20Introduction.htm. L'outil HYPE, développé par le BRGM, permet l'étude statistique des chroniques d'évolution de la qualité des eaux souterraines en intégrant les méthodes statistiques les plus puissantes et robustes dans ce domaine spécifique. L'analyse des tendances est une des méthodes les plus couramment utilisées. Elle a pour objectif de constater les variations globales sur des chroniques de concentrations et d'en prévoir les orientations (baisse, stagnation, hausse). Grâce à ces analyses prospectives, des actions de correction et d'optimisation peuvent être proposées sur la fréquence des campagnes et sur le nombre de points de suivi. Cependant, ces outils statistiques nécessitent

que les chroniques soient suffisamment longues, que les données soient correctes et que les ouvrages soient répartis de façon à être représentatifs de l'ensemble du milieu urbain étudié. Le cas contraire conduit à une surévaluation ou à une sous-évaluation de certaines données.

L'approche probabiliste a pour objectif de déterminer le nombre de mesures nécessaires pour atteindre une précision donnée. Elle permet donc d'estimer la fréquence de prélèvement suivant le paramètre à mesurer. Cependant, la fréquence théorique calculer peut se révéler excessive pour certains paramètres.

Enfin, l'évaluation quantitative de la redondance ou du manque de forages peut être effectuée à l'aide d'une évaluation spatiale : outils géostatistiques ou modèles hydrogéochimiques. A l'échelle d'un territoire urbain, la mise en œuvre d'un modèle hydrodynamique couplé avec les données chimiques permet de valider les principales caractéristiques du réseau de surveillance (ouvrages et paramètres) et de proposer des ajustements nécessaires, en comparant les données calculées et prévues avec les mesures réelles.

Exemple d'un outil statistique

Les méthodes ACP (analyse en composante principale) et CAH (classification ascendante hiérarchique) permettent d'identifier des points de mesure au comportement similaire dans un même secteur géographique et donc de réduire éventuellement le nombre de points de mesure du réseau.

Pour identifier les points porteurs d'une information hydrochimique à peu près équivalente, une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle peut être mise en œuvre. Cette méthode est applicable à des moyennes sur une certaine période (moyennes annuelles) de nombreuses variables chimiques ou à des chroniques d'évolution d'une variable (exemple : nitrates). Sur une carte, les points sont identifiés par zone géographique en fonction de leur appartenance à une classe statistique pour constituer alors des sous-ensembles de points statistiquement et géographiquement proches (groupe). Dans chaque groupe constitué, il sera possible de sélectionner le ou les points les plus intéressants à garder, considérés alors comme représentatifs du comportement de la nappe dans le secteur géographique correspondant. Cette sélection peut se faire sur la base de critères pratiques : accessibilité, ancienneté des mesures (longueur de la chronique), usage du point de mesure (eau potable, piézomètre), état du point de mesure...

Exemple d'un outil géostatistique

L'approche géostatistique utilise la variance de krigeage comme indicateur de précision. Il est mis à profit le fait que la variance de krigeage ne fait intervenir que la configuration géométrique des données disponibles (via un variogramme) sans faire intervenir les valeurs de la variable. L'objectif est d'intégrer un nouveau point, afin d'augmenter la valeur de la variance de krigeage sur ce secteur, ou d'enlever un point, sans conduire à la dégradation visible de la variance de krigeage sur ce secteur.

La méthode du point fictif est un exemple de méthode permettant de rechercher l'emplacement optimale d'un nouveau point de mesures d'une variable (la concentration en benzène par exemple) dans les zones à faible densité, caractérisées par des valeurs d'écarts types élevées. En effet, les fortes valeurs de la variance de krigeage permettent de localiser les zones sous échantillonnées.

Le principe utilisé est de trouver le point dont l'ajout au réseau conduira à la variance d'estimation la plus faible de la valeur moyenne de la variable sur le domaine d'étude. Un point supplémentaire

est introduit dans le système de krigeage pour en déduire la variance d'estimation relative à cette nouvelle configuration. Le gain en précision peut être défini par :

$$G(x) = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2(x)}{\sigma_0^2}$$ où σ^2_0 *est la variance d'estimation avec les n points du réseau initial et* $\sigma^2(x)$ *est la variance d'estimation avec les n+1 points de la configuration testée, x désignant les coordonnées du nouveau point.*

S'il existe un certain nombre de points existants candidats, le point fictif est implanté à la place de chacun et les gains en précision correspondants sont déterminés pour chacun de ces points. S'il n'y a pas de points candidats, on fait parcourir au point fictif une zone d'implantation potentielle et il est alors possible de tracer une carte d'iso-gains en précision sur l'estimation de la valeur moyenne (Figure 39).

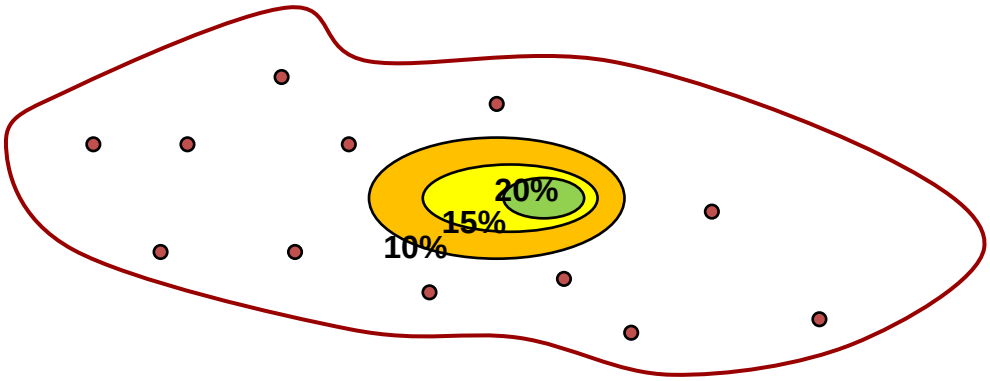


Figure 39 : Exemple de carte d'iso-gains en précision sur l'estimation de la valeur moyenne, obtenue grâce à la méthode du point fictif

10.3. EVOLUTION DU RESEAU DE SURVEILLANCE

Les analyses précédentes permettent de justifier les propositions d'évolution du réseau, que ce soit en terme de nombre de points, de fréquence de suivi et/ou de substances et paramètres considérés. La définition d'un coordinateur prendra alors tout son sens pour prendre ces décisions.

Un guide complet présente la démarche à adopter pour l'évolution et l'arrêt de la surveillance de la qualité des eaux souterraines, appliquée aux ICPE et sites polluées : ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues (Ministère en charge de l'environnement, 2020). Quelques préconisations très générales et relatives à l'évolution du réseau de surveillance en milieu urbain sont formulées ci-après.

10.3.1. Augmentation ou ajout du suivi d'un ouvrage ou d'un paramètre

Si une lacune de données est mise en évidence, si une anomalie apparaît ou si une tendance à la hausse est découverte pour un ou des ouvrages suivis (ou secteurs suivis) et pour un ou des paramètres analysés, la fréquence d'échantillonnage pourra être revue à la hausse et des ouvrages complémentaires pourront être intégrés au réseau de surveillance, afin de mieux préciser le phénomène. Des études spécifiques et des actions peuvent également être entreprises pour localiser, stopper ou réduire l'entrée en nappe, maîtriser l'impact et imposer des servitudes.

Le bilan sera également l'occasion d'intégrer de nouveaux secteurs stratégiques prioritaires, problématiques et objectifs de suivi. Les différentes phases de la méthodologie pourront alors être rejouées sur ces nouveaux secteurs stratégiques. A noter que, pour les ouvrages mis en place dans le cadre de suivis IOTA ou ICPE, la collectivité porteuse du réseau de suivi de l'agglomération pourrait manifester son intérêt pour le maintien d'un ou de plusieurs points dans son réseau de surveillance. Les services de l'Etat pourraient alors demander, si possible dès l'instruction du dossier, aux industriels et aménageurs de garantir la pérennité de ces points de surveillance et de suivre les préconisations concernant les caractéristiques du réseau de la ville. Ces demandes devront évidemment permettre de garantir les obligations des suivis réglementaires. Pour le suivi des chantiers IOTA, les ouvrages pourront être intégrés au futur projet d'aménagement et être implantés au droit d'un futur parc ou massif ou sur le trottoir puis être rétrocédés à la collectivité après la fin du chantier. Des moyens de protection sont à prévoir contre les engins de chantier.

10.3.2. Diminution ou arrêt du suivi d'un ouvrage ou d'un paramètre

Les conditions de diminution ou d'arrêt du nombre de campagne, de paramètres et/ou d'ouvrages suivis dépendent d'une diminution « suffisante » des concentrations, durant une certaine durée, et argumentée. Cette phase permettra également de diminuer ou d'arrêter le suivi de certains points au droit d'anciens secteurs prioritaires. En cas de l'arrêt du suivi, certains points de surveillance pourront quitter définitivement le réseau de surveillance

Pour les ouvrages défectueux ou ne remplissant plus de mission particulière, le rebouchage par coulis de bentonite ciment doit être envisagé lorsqu'ils peuvent constituer des voies de migration potentielle des polluants contenus dans les terrains traversés ou venant de la surface. Pour être efficace, le rebouchage, avec accord des propriétaires, peut devoir préalablement nécessiter l'enlèvement de l'équipement défectueux et le massif filtrant s'il existait, afin d'éviter toute possibilité de migration verticale de polluants par cette voie. Pour plus de détails, on se réfèrera à la norme NF X10-999 d'août 2014 relative à la réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages.

10.3.3. Entretien des ouvrages

Il convient de rappeler qu'au fil du temps un piézomètre se dégrade. En effet, différents phénomènes peuvent altérer le tubage, la crépine ou encore la protection de surface (capot ou margelle) : corrosion, colmatage des crépines par des fines ou par l'activité bactérienne, développement de racines, écrasement du tubage, vieillissement des matériaux… Pour garantir la bonne représentativité d'un point d'eau, il est recommandé d'effectuer des vérifications régulières sur des indices de dégradation comme la profondeur totale et le rabattement au cours de la purge (ceci nécessite de disposer d'un état initial du piézomètre comportant un essai de débit ou au moins d'avoir archivé le rabattement initial lors de la première purge de l'ouvrage). L'inspection à l'aide d'une caméra spécifique permet de vérifier de visu l'état de l'ouvrage. Une inspection ponctuelle est ainsi recommandée par le BRGM notamment en cas d'eaux « dures » ou « agressives » (faible et fort pH, activité bactérienne importante, fortes teneurs en Fe, Mn par exemple).

Plusieurs techniques de nettoyage et de développement de l'ouvrage, notamment en cas de baisse de productivité, peuvent être envisagées. Pour plus de détails, on pourra se référer à la norme NF X10-999 d'août 2014 relative à la réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages.

11. **Conclusion**

Le programme d'actions a consisté à rédiger un guide méthodologique, permettant de définir des lignes directrices et des recommandations pour la mise en place d'un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain. Ce programme s'est déroulé en trois étapes :

- retour d'expérience (REX) sur la situation en France et dans quelques pays à l'international ;
- méthodologie pour la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines, adapté au milieu urbain ;
- mise en œuvre de la méthodologie dans une étude de faisabilité sur l'agglomération de Lyon.

La bibliographie internationale ainsi que les entretiens avec des acteurs du sol et du sous-sol de plusieurs agglomérations françaises ont permis de tirer des enseignements sur la conception de ce type de réseau.

La méthodologie proposée a été élaborée afin d'être mise en œuvre de manière aisée par des experts hydrogéologues ou en gestion des sites et sols pollués. Elle se décompose en plusieurs phases menées soit en parallèle, soit successivement, permettant de concevoir un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines se définissant par :

- un ou plusieurs objectifs de suivi ;
- un ensemble de points de surveillance optimisés en terme de densité, de localisation et de caractéristiques techniques (niveaux crépinés) :
- un programme de surveillance (fréquences de prélèvements, paramètres à analyser…) ;
- une bancarisation, une mise à disposition et la valorisation des données acquises.

La concertation des acteurs du sol et du sous-sol est une première phase indispensable, afin de mener à terme le projet. Pour être pérenne, le réseau doit fédérer les acteurs et donc répondre aux multiples problématiques des eaux souterraines en milieu urbain concernant, d'une part, les impacts sur la qualité (suivi de panaches de pollution, fond hydrogéochimique urbain, migration de biseau salé, protection de captages…) et, d'autre part, les impacts sur les écoulements (risque d'inondation par remontée de nappe, subsidence et sécheresse liées à la surexploitation des nappes, dégradation du bâti suite à la dissolution du gypse…)

La mise en place d'un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain nécessite d'avoir au préalable caractérisé le sol et le sous-sol urbain. Les informations à acquérir nécessitent de collecter des données à partir des études préalables, de documents cartographiques ou spatialisés, de banque de données et, si nécessaire, à partir de reconnaissances de terrain et d'organisation de campagnes de mesures et d'analyses. Le réseau de surveillance doit être défini à partir des connaissances sur la qualité des sols et des eaux souterraines (sources potentielles et avérées, historiques et actuelles), sur l'hydrogéologie (transfert) et sur l'occupation des sols (enjeux à protéger). L'ensemble des données spatialisées sont traitées par analyses multicritères « sources / voies de transfert / enjeux à protéger » afin d'obtenir des cartes synthétiques permettant de définir la densité des ouvrages par secteurs, la localisation et caractéristiques de ces ouvrages et le programme de surveillance. Les analyses proposées dans ce guide sont basées sur des méthodes existantes et adaptées au milieu urbain, impliquant une nécessaire simplification de la réalité. La méthodologie pourra évoluer sur la base de retours d'expérience et du développement de nouvelles méthodes appliquées au milieu urbain et à ses spécificités.

La mise en œuvre de la méthodologie sur un cas concret, l'agglomération lyonnaise, a permis de tester les différentes phases de la méthodologie et de les ajuster lorsque cela s'est avéré nécessaire. Chaque agglomération étant unique, les lignes directrices et recommandations proposées dans ce guide sont à adapter au cas par cas. Ainsi, selon la taille de l'agglomération, la précision et l'historique des données, les analyses multicritères pourront être faites à des résolutions et à l'aide de méthodes différentes.

L'étude du cas concret a montré que la méthodologie semblait convenir au contexte de l'agglomération lyonnaise mais qu'elle ne pouvait être mise en œuvre qu'à partir d'un ensemble de données fiables et adaptées à l'échelle de travail. Quelques retours d'expérience peuvent être tirés de l'application de ce cas concret.

La mise en œuvre des différentes phases de la méthodologie a démontré que l'implication des acteurs est primordiale pour définir les fondements du réseau de surveillance, garantir la pérennité des suivis et identifier l'ensemble des données à collecter. D'une part, la mutualisation des données semble indispensable, afin d'optimiser les différents suivis et leurs coûts, de combler les lacunes de connaissances, notamment sur les secteurs potentiellement pollués, et d'anticiper le suivi au droit des futurs secteurs stratégiques (reconversion foncière, futur champ captant…). Un enjeu particulier consiste à construire une connaissance commune et partagée entre les services décisionnaires de l'Etat, les bureaux d'études, les industriels et les aménageurs. D'autre part, afin de garantir la pérennité à long terme du réseau de surveillance, il semble indispensable que celui-ci réponde aux multiples problématiques rencontrés par les acteurs sur le milieu urbain mais également évolue en cours du temps pour s'adapter à l'émergence de nouvelles problématiques. Dans ce cadre, il apparait indispensable d'identifier un coordinateur, chargé du pilotage et de la gestion de tous les aspects de la mise en œuvre du réseau de surveillance.

Le retour d'expérience montre qu'une analyse multicritère, aussi performante soit-elle, peut être remise en cause par la réalité du terrain du fait notamment de données lacunaires ou erronées. Les bases de données réglementaires officielles sont souvent parcellaires et ne permettent pas de renseigner toutes les informations nécessaires aux différentes phases (délimitation de panaches de pollution, points d'eau non déclarés…). Tout d'abord, des recherches documentaires doivent être entreprises auprès des acteurs et experts du sol, du sous-sol et des eaux souterraines de l'agglomération. Concernant les bases inventoriant les points d'eau, le code national de la Banque du Sous-Sol (BSS), attribué par le BRGM aux ouvrages souterrains, devrait être l'identifiant unique des points d'eau. Le renseignement systématique de cet identifiant commun devrait permettre de croiser les différentes bases consultées et de compiler facilement leurs informations. Ensuite, l'étude du cas concret a montré qu'à partir des informations collectées, il est indispensable de réaliser une enquête de terrain afin d'identifier les ouvrages opérationnels et pertinents à inclure au réseau de suivi. L'organisation d'une première campagne élargie, en terme de nombre d'ouvrages et de paramètres analysés, semble également nécessaire pour établir un état des lieux détaillé sur les sens d'écoulement, la qualité des eaux souterraines ainsi que sur les éventuelles influences naturelles et anthropiques.

Enfin, quelques recommandations peuvent être formulées, afin de garantir la pérennité du réseau. En premier lieu, les points de surveillance pourraient faire partie intégrante des documents d'urbanisme (exemple : plan local d'urbanisme). Ensuite, dans le cadre d'ouvrages mis en place pour un suivi de type IOTA et ICPE, les services de l'Etat pourraient demander, dès l'instruction du dossier, aux industriels et aménageurs de garantir la pérennité des points de surveillance et de suivre les préconisations concernant les caractéristiques des points de surveillance de la ville. Ces demandes devront évidemment permettre de garantir les obligations de suivis réglementaires. Pour le suivi des chantiers IOTA, les ouvrages pourraient être intégrés au futur projet d'aménagement et être implantés au droit d'un futur parc ou massif ou sur le trottoir. Des moyens de protection devront être mis en œuvre contre les engins de chantier.

12. **Bibliographie**

Eléments de contexte

Attard Guillaume, **Winiarski Thierry**, **Rossier Yvan and Eisenlohr Laurent** (2016) - Impact of underground structures on the flow of urban groundwater. Hydrogeology Journal, p 5-19.

Berthier E. (1999) - Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain. Élaboration du modèle et première évaluation. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 196 p.

Bhaduri B., Minner M., Tatalovich S., Harbor J. (2001) - Long-term hydrologic impact of urbanization : a tale of two models. Journal of Water Resources Planning and Management 127(1), p. 13-19.

Bonomi T. and Ellis B. (1999) – Groundwater level evolution in the Milan area: natural and human issues. Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality. Birmingham, United Kingdom, International Association of Hydrological Sciences. 8 p.

Carsignol J., Calovi L. (2004) - La pollution des sols et des végétaux à proximité des routes. Note d'information SETRA (Service d'études techniques des routes et autoroutes), 12 p.

Castellazzi p. and al. (2016) - Land subsidence in major cities of Central Mexico : Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data .10 p.

Cerema (2018a) – Impact des aménagements sur l'eau souterraine urbaine. Fiche n°1 : Revue introductive des impacts des aménagements sur les écoulements, la qualité et la température de l'eau souterraine urbaine. 6 p.

Cerema (2018b) – Impact des aménagements sur l'eau souterraine urbaine. Fiche n°3 : Impacts des ouvrages souterrains sur les mélanges entre masses d'eau superposées. 5 p.

Chen Eileen, McMahon Patti and Shorno Anton (2017) - Groundwater Monitoring Report. Water Resources Department Groundwater Resources Division. 81p.

Chen Eileen, Shorno Anton and Bautista Jeremy (2020) - Groundwater Monitoring Report. Water Resources Department Groundwater Resources Division. 84p.

Cheverry C. et Gascuel C. (2009) - Sous les pavés la terre. Collection Écrin, Omniscience, 208 p.

Conway T.M. (2007) - Impervious surface as an indicator of pH and specific conductance in the urbanizing coastal zone of New Jersey, USA. Journal of Environmental Management 85(2), p. 308-316.

FISRWG (1998) - Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG) (15 Federal agencies of the US gov't). GPO Item No. 0120-A ; SuDocs No. A 57.6/2: EN 3/PT.653.

Foster S. and Variavamoorthy K. (2013) - Urban Groundwater. Policies and institutions for integrated management. GWP Perspectives Paper. Global Water Partnership (Stockholm).

Foster S., Tyson G., Howard K., Hirata R., Shivakoti B.-R., Warner K., Gogu R. and Nkhuwa D. (2015) – Resilient Cities & Groundwater. IAH Strategic Overview Series. 6 p.

Gaffield S.J., Goo R.L., Richards L.A., Jackson R.J. (2003) - Public health effects of inadequately managed stormwater runoff. American Journal of Public Health 93(9), p. 1527-1533.

Gilli E., Mangan C., Mudry J. (2004) - Hydrogéologie : objets, méthodes, applications. Dunod, 303 p.

Göbel P., Dierkes C., Coldewey W.G. (2007) - Storm water runoff concentration matrix for urban areas. Journal of Contaminant Hydrology 91 (1-2), p. 26-42.

Hope D., Naegeli M.W., Chan A.H., Grimm N.B. (2004) - Nutrients on asphalt parking surfaces in an urban environment. Water, Air, & Soil Pollution: Focus 4(2-3), p. 371-390.

Lerner David N., Issar Arie S. and Simmers Ian (1990) - Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. IAH Volume 8. 345 p.

Lamé A. (2013) - Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 214 p.

Le Guern C., Béchet B., Gujisaite V., Lotram Y., Bouzit M., Guérin V., Saiyouri N., Khalil T., avec la collaboration de Béranger S., Parmentier M., Boissard G., Picot G., Croizet N., Guyonnet D. (2012) - OPUSS - Modélisation du transport de polluants dans les sols et sous-sol en milieu urbain - Etat de l'art et usages en France. Rapport final — BRGM/RP-60997-FR, 153 p., 37 ill., 12 ann.

Lerner D.N. and Barrett M.H. (1996) – Urban groundwater issues in the United Kingdom. Journal n°4, p 80-89.

Lemière B., Seguin J.-J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph. Saada A., avec la collaboration de **Darmendrail D., Conil P., Bodénan F. Fauconnier D., Hubé D., Colombano S.** (2008) - Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte de gestion des impacts sur les eaux souterraines. Document du BRGM 300. Nouvelle édition 2008. Editions BRGM. 155 p. ssp-infoterre.brgm.fr/guide-comportement-polluants

Li X., Lee S.L., Wong S.C., Shi W., Thornton I. (2004) - The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach. Environmental Pollution 129(1), p. 113-124.

Markiewicz-Patkowska J., Hursthouse A., Przybyla-Kij H. (2005) - The interaction of heavy metals with urban soils : sorption behaviour of Cd, Cu, Cr, Pb and Zn with a typical mixed brownfield deposit. Environment Intemational 31 (4), p. 513-521.

Mavroulidou M. and Woods R.I. (1997) – Modelling falling and rising groundwater levels in cities. Groundwater in the Urban Environment: Problems, Preocesses and Management. Rotterdam, Balkema

Meg Rudolph (2001) - Urban hazards : Sinking of a titanic city. www.geotimes.org

Minnig Morgane, Moeck Christian, Radny Dirk, Schirmer Mario (2017) - Impact of urbanization on groundwater recharge rates in Dübendorf, Switzerland. Journal of Hydrology. Volume 563, August 2018, pages 1135-1146. 10.1016/j.jhydrol.2017.09.058.

Morena F. (2004) - Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé. Représentation des processus de production et développement du modèle URBS. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 243 p.

Nicolas J., Bault V. Lafare A., Ollagnier S., Braibant G., Gallois J. (2019) – Mise en place d'un réseau de surveillance de la température en lien avec le réseau piézométrique national DCE. Rapport final. BRGM/RP-69121-FR, 45 p., 8 fig., 3 tabl.

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, 158 p., 29 ill., 14 ann.

Ondel C. (2007) - Grandes infrastructures souterraines en site urbain : impact sur les écoulements de nappe. Les nappes d'eau souterraines en contexte urbain. XIVe journées technique du Comité français d'hydrogéologie, colloque Lyon 2007, 8-10 novembre, le Grand Lyon, p. 33-44.

Parriaux A., Blunier p., Maire p., Dekkil G., Tacher L. (2010) - Projet Deep City. Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains. Rapport de recherche PNR 54, Fonds national suisse FNS/ vdf ETHZ.

Pujades E, Lopez A., Carrera J. Vazquez-Suné E. and Jurado A. (2012) – Barrier effect of underground structures on aquifers. Engineering geology n°145. p 41-49.

Rosenbaum M.S., McMillan A.A., Powell J.H., Cooper A.H., Culshaw M.G., Northmore K.D. (2003) - Classification of artificial (man-made) ground. Engineering Geology 69(3-4), p. 399-409.

Scalenghe R., Ajmone Marsan F. (2009) - The anthropogenic sealing of soifs in urban areas. Landscape and Urban Planning 90(1-2), p. 1-10.

Trauth R., Xanthopoulos C. (1997) - Non-point pollution of groundwater in urban areas. Water Research 31(11), p. 2711-2718.

Vazquez-Sune E., Sanchez-Vila X. and Carrera J. (2005) – Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch oh hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. Hydrogelogy Journal n°13, p 522-533.

Vazquez-Sune E., Sanchez-Vila X., Carrera J. and Marrizza M. (1997) – Rising groundwater levels in Barcelona: Evolution and effects on urban structures. Groundwater in the Urban Environment: Problems, Preocesses and Management. Rotterdam, Balkema

Wolf Leif, Morris Brian and Burn Stewart (2006) - Urban Water Resources Toolbox – Integrating Groundwater into Urban Water Management. IWA Publishing. Volume 5

Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter and Bayer Peter (2010) – The geothermal potential of urban heat islands. 6 p.

Retour d'expérience en France et à l'international

Alley W.M. (1993) – Regional ground-water quality : NewYork, Van Nostrand Reinhold. 634 p.

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, 74 p., 21 fig., 10 tabl., 4 ann.

AnteaGroup (2013) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2012. Rapports de synthèse.

AnteaGroup (2014) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2013. Rapports de synthèse.

AnteaGroup (2015 et 2016) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2015. Rapports de synthèse

Asconit Consultants (2017) – Exploitation du réseau « SAGE » de suivi qualitatif et quantitatif des eaux de l'est Lyonnais. Eaux souterraines. Période 2015-2016. Rapport final. 106 p. 7 tab. 5 cartes, 2 fig. 7 ann.

Attard Guillaume, **Winiarski Thierry**, **Rossier Yvan and Eisenlohr Laurent** (2016) - Impact of underground structures on the flow of urban groundwater. Hydrogeology Journal, p 5-19.

Auterives C., Gourcy L, et Nicolas J. (2013) – Proposition méthodologique d'évaluation de la représentativité des réseaux DCE de surveillance des eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-63055-FR, 261 p., 152 fig., 46 tabl.

Barlow Jeannie R.B., Kingsbury James A. and Coupe Richard H. (2012) - Changes in shallow groundwater quality beneath recently urbanized areas in the Memphis, Tennessee area. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 48, pp336-354.

Bonomi T. and Ellis B. (1999) – Groundwater level evolution in the Milan area: natural and human issues. Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality. Birmingham, United Kingdom, International Association of Hydrological Sciences. 8 p.

Bonsor H.C., Bricker S.H., Dochartaigh B.E.O. and Lawrie K.I.G. (2010) - Project progress report 2010-11. Groundwater monitoring in urban areas: a pilot study in Glasgow, UK. British Geological Survey. 59 p.

Bonsor H.C., Dahlqvist P., Moosmann L., Classen N., Eptng J., Huggenberger P., Alejandro Garcia-Gil, Janźa M., Laursen G., Stuurman R. and Gogu C.R. (2015) - Groundwater, Geothermal modelling and monitoring at city-scales. Identifying good practice, and effective knowledge exchange, COST Subsurface Action. Working Group 2, Britsh Geological Survey Open Report. 67 p.

Boukhemacha Mohamed Amine, Radu Gogu Constantin, Serpescu Irina, Gaitanaru Dragos and Bica Ioan (2015) - A hydrogeological conceptual approach to study urban groundwater flow in Bucharest city, Romania. Hydrogeology Journal, 2015, vol 23, n°3, pp437--450.

Bouroullec Isabelle, Bouteloup Eric, Chardavoine Sabine, Gandolfi Jean-Marie, Roubichou Philippe (2009) - Gestion des données géologiques en milieu urbain. Géosciences n°10 : Villes et géologie urbaine, ed. BRGM, pp.72-79.

Burgeap (2011) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2010. Rapports de synthèse.

Burgeap (2012) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2011. Rapports de synthèse.

Chen Eileen, Shorno Anton and Bautista Jeremy (2020) - Groundwater Monitoring Report. Water Resources Department Groundwater Resources Division. 84p.

Coelho Victor Hugo R., Bertrand Guillaume F., Montenegro Suzana M.G.L., Paiva Anderson L.R., Almeida Cristiano N., Galvão Carlos O., Barbosa Luís Romero, Batista Larissa F.D.R., Ferreira Eduardo L.G.A. (2018) - Piezometric level and electrical conductivity spatiotemporal monitoring as an instrument to design further managed aquifer recharge strategies in a complex estuarial system under anthropogenic pressure. Journal of Environmental Management, Volume 209, pp426-439.

Colombo L., Gattinoni P. and Scesi L. (2017) – Influence of underground structures and infrastructures ont the groundwater level in the urban area of Milan, Italy. Int. J. Sus. Dev. Plann. Vol. 12, No. 1. pp176–184

Das Gupta A., Jayakrishnan R., Onta P. R. and Ramnarong V. (1995) - Assessment of groundwater quality for the Bangkok aquifer system. Models for Assessing and Monitoring Groundwater Quality (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995). IAHS Publ n°227. 8p.

Environment Agency (2018) – Management of the London Basin Chalk Aquifer. Status Report 2018. 32p.

European Commission (2007). Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance Document n°15. Guidance on Groundwater Monitoring. 52 p.

Ferral Anabella, Sarmiento Tagle Martin, Alaniz Eugenia, Ferral Alberto (2014) – Assessment, monitoring and protection of groundwater pollution in urban areas, Córdoba city, Argentina. European Scientific Journal February 2014. Special edition. vol.3. 9 p.

Foster S. and Variavamoorthy K. (2013) - Urban Groundwater. Policies and institutions for integrated management. GWP Perspectives Paper. Global Water Partnership (Stockholm).

Foster S., Tyson G., Howard K., Hirata R., Shivakoti B.-R., Warner K., Gogu R. and Nkhuwa D. (2015) – Resilient Cities & Groundwater. IAH Strategic Overview Series. 6 p.

Gaitanaru Dragos, Gogu Constantin Radu, Boukhemacha Mohamed Amine, Serpescu Irina, Litescu Livio, Zaharia Valentin, Moldovan Alexandru and Mihailovici Madalin J. (2017) – Urban hydrogeology studies in Bucharest City, Romania. Urban Subsurface Planning and Management Week, SUB-URBAN 2017, 13-16 March 2017. 8 p.

Gandolfi J.M., Bouroullec L. avec la collaboration de Marty F., Porquet M. (2008) – BISMUTH. Banque d'Information sur le sous-Sol en Mulieu Urbain de Toulouse. Phase 2. BRGM/RP-56505-FR. Rapport final. 240 p., 49 ill., 14 ann.

García-Gil Alejandro, Epting Jannis, Garrido Eduardo, Vázquez-Suñé Enric, Lázaro Jesús Mateo, Sánchez Navarro José Ángel, Huggenberger p., Marazuela Calvo Miguel Ángel (2016) - A city scale study on the effects of intensive groundwater heat pump systems on heavy metal contents in groundwater. 12 p.

Gilbert Richard O. (1987) - Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. 320 p.

Government of Western Australia, Department of Water (2012). Water monitoring guidelines for better urban water management strategies and plans. Looking after all our water needs. 64 p. 2 fig. 5 tabl.

Howard K.W.F. and Gelo K.K. (2002) - Intensive groundwater use in urban areas : the case of megacities - University of Toronto at Scarborough, Ontario, Canada. 35 p.

Janza Mitja (2015) - A decision support system for emergency response to groundwater resource pollution in an urban area (Ljubljana, Slovenia). Geological survey of Slovenia. Environmental Earth Sciences, 2015, vol. 73, n°7, pp3763--3774

Jin-Yong Lee, Mi-Jung Choi, Yoon-Young Kim and Kang-Kun Lee (2005) - Evaluation of hydrologic data obtained from a local groundwater monitoring network in a metropolitan city, Korea. 13 p.

Jurado Anna (2013) – Occurrence and fate of emerging contaminants un urban groundwater. A case study : Barcelona. PhD Thesis. 166 p.

Kuroda Keisuke and Fukushi Tetsuo (2008) – Groundwater contamination in urban areas – Departement of urban engineering, the University of Tokyo. 13 p.

Laffer Elliott (2014) - Wood pilings groundwater and the Boston groundwater trust. A Model of Cooperative Problem Solving.

Lamé A. (2013) - Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 214 p.

Ljungdahl Johanna (2005) - Analysis of groundwater level changes and land susbidence in Gothenburg, SW Sweden. 78 p.

Massone Hectore E., Martínez Daniel E., Cionchi Jose L., Bocanegra Emilia (1998) - Suburban Areas in Developing Countries and Their Relationship to Groundwater Pollution: A Case Study of Mar del Plata, Argentina. Environmental Management vol 22, n°2, pp.245–254.

Martínez Daniel E., Moschione Eleonora, Bocanegra Emilia, Glok Galli Melisa, Aravena Ramón (2014) - Distribution and origin of nitrate in groundwater in an urban and suburban aquifer in Mar del Plata, Argentina. Environmental Earth Sciences, vol 72, n°6, pp877-1886.

Ministère en charge de l'environnement (2019) - Surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués. Version 2. 71 p. ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues

Ministère en charge de l'environnement (2020) – Evolution et arrêt de la surveillance des eaux souterraines. Version 1. 51 p. ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues

NGWMN (2013) - A National Framework for Ground-Water Monitoring in the United States. Subcommittee on Groung Water of the Advisory Committee of Water Information. First Release: June 2009. Revised: July 2013. 168 p.

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, 158 p., 29 ill., 14 ann.

Nicolas J., Bault V. Lafare A., Ollagnier S., Braibant G., Gallois J. (2019) – Mise en place d'un réseau de surveillance de la température en lien avec le réseau piézométrique national DCE. Rapport final. BRGM/RP-69121-FR, 45 p., 8 fig., 3 tabl.

Oladeji Olayinka Simeon (2011) - Quantitative risk assessment of groundwater quality utilizing GIS technology and coupled groundwater models - Aston University. 243 p.

Rueedi J., Cronin A.A. and Morris B.L. (2008) - Estimation of sewer leakage to urban groundwater using depth-specific hydrochemistry. Water and Environment Journal, 23, pp134-144.

SAGE Est Lyonnais (2005) – Rapport état des lieux et diagnostic. 184 p.

Schulz Ingrid, Weitzel Ingrid, Pelzer Guido, Riedel Thomas (2018) -Landeshauptstadt Hannover. Das Grundmessnetz Hannover. Kommunales Grundwassermonitoring. Schriftenreihe kommunaler Umweltschutz Heft 55. 40p

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, 119 p., 29 fig., 15 tab., 5 ann.

Seguin J.-J. (2008) - Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise - Phase 4 – Modélisation hydrodynamique en régime transitoire au pas de temps journalier et simulation de l'impact sur la nappe de 3 scénarios de crue du Rhône et de la Saône. BRGM/RP-56676-FR, 113 p., 45 fig., 14 tab., 4 ann.

Taylor Charles J. and Alley William M. (2001) - Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data – Rapport U.S. Geological Survey. 74 p.

Thomas Brian F. and Vogel Richard M. (2012) - Impact of Storm Water Recharge Practices on Boston Groundwater Elevations. Journal of hydrologic engineering.

Vazquez-Suné E., Carrera J., Tubau I., Sanchez-Vila X. and Soler A. (2010) - An approach to identify urban groundwater recharge. Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, pp2085-2097.

Vrba Jaroslav and Adams Brian (2008) – Groundwater early warning monitoring strategy. A methodological Guide. - International Hydrological Programme (IHP), UNESCO. 105 p.

Vrba J. and Sobisek P (1988) - Groundwater Monitoring. - Water Management and the Geoenvironment : an international manuel in three volumes. Volume I (Kozlovsky E.A., editor in chief). UNESCO and UN Environment Programme. p. 54–76.

Wiesner Sarah, Grongroft,Alexander, Ament Felix and Eschenbach Annette (2016) - Spatial and temporal variability of urban soil water dynamics observed by a soil monitoring network. Journal of Soils and Sediments, vol 16, n°11. p. 2523--2537.

http://www.acwd.org/227/Niles-Cone-Groundwater-Basin-Monitoring (2019)

www.aprona.net et carto.aprona.net/ems

www.bostongroundwater.org

www.groundwateruk.org/Rising_Groundwater_in_Central_London.aspx

www.hamburg.de/grundwasser/ et geoportal-hamburg.de/geo-online/

www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Umwelt-Nachhaltigkeit/Wasser-Abwasser/Grundwasser/Grundwassermonitoring

www.life-income.si

www.stadt-koeln.de/leben-in-koeln/umwelt-tiere/wasser-boden-altlasten/die-grundwasserueberwachung

Méthodologie

Aubert N., Koch-Mathian J.-Y. avec la collaboration de **Baraton A.** (2014) – Elaboration d'une base de données corrélant activités et polluants potentiels. Rapport final. BRGM/RP-64125-FR. 110 p., 3 ill., 21 tabl., 8 ann.

Bessière H. (2016) – Guide méthodologique pour l'analyse Pressions-Impact dans le cas de pollutions industrielle dans les départements d'Outre-Mer – Rapport final, BRGM/RP-65558-FR, 76 p., 19 fig., 30 tab., 3 ann.

Callier L., Clozel B., Nowak C. (2002) – Méthode de recherche de l'origine de pollution(s) dans les sols ou dans les eaux souterraines – BRGM/RP-51260-FR, 133 p., 4 tabl., 4 ann.

Callier L. avec la collaboration de Ben Slimane F., Mongereau N., Paquot A., Pazdej R., Raimboux J., Terreyre J.L., Viso A.C. (2004) – Réflexion du groupe de travail "protection des eaux souterraines" : guide méthodologique pour la recherche de l'origine de pollution(s) dans les eaux souterraines – BRGM/RP-52538-FR, 61 p., 5fig., 3 tabl., 5 ann.

Colombo L., Gattinoni P. and Scesi L. (2017) – Influence of underground structures and infrastructures ont the groundwater level in the urban area of Milan, Italy. Int. J. Sus. Dev. Plann. Vol. 12, No. 1. pp176–184

Comte J.P., David A., Landreau A. (1997) - Méthode de détermination par système aquifère des niveaux de surveillance de la piézométrie et de la qualité des eaux souterraine. Rapport BRGM/RR-38856-FR. 27p.

Ferral Anabella, Sarmiento Tagle Martin, Alaniz Eugenia, Ferral Alberto (2014) – Assessment, monitoring and protection of groundwater pollution in urban areas, Córdoba city, Argentina. European Scientific Journal February 2014. Special edition. vol.3. 9 p.

Global Water Partnership (2013) - Urban Groundwater – Policies and Institutions for Integrated Management. Perspective paper. www.gwptoolbox.org

Guérin Valérie et Hubé Daniel avec la collaboration de Colombano Stephan, Bellenfant Gilles et Rouvreau Laurent (2008) – Suivi des eaux souterraines au droit des installations de stockage de déchets : éléments pour une prise de décision. Rapport final. BRGM/RP-57132-FR. 207 p. 58 fig. 41 tabl. 6 ann.

IFEN (2018) – L'état des eaux souterraines en France. Aspects quantitatifs et qualitatifs. Etudes et travaux n°43. 36 p., 20 fig., 3 tabl., 3 ann.

INERIS (2020) - Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 30 juin 2020. Rapport INERIS-DRC-17-164559-10404A. 115 p. 32 tabl. 3 ann.

Lemière B., Seguin J.-J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph. Saada A., avec la collaboration de **Darmendrail D., Conil P., Bodénan F. Fauconnier D., Hubé D., Colombano S.** (2008) - Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte de gestion des impacts sur les eaux souterraines. Document du BRGM 300. Nouvelle édition 2008. Editions BRGM. 155 p. ssp-infoterre.brgm.fr/guide-comportement-polluants

Mardhel Vincent et Gravier Annabel (2005) – Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Rapport final. BRGM/RP-54148-FR. 92 p., 53 ill., 3 ann.

Ministère en charge de l'environnement (2007a) – Diagnostics de site. Version 0. 272 p. ssp-infoterre.brgm.fr/diagnostic-site

Ministère en charge de l'environnement (2007b) – Schéma conceptuel et modèle de fonctionnement. Version 0. 32 p. ssp-infoterre.brgm.fr/schema-conceptuel

Ministère en charge de l'environnement (2009) - Maîtrise et Gestion des Impacts des polluants sur la qualité des Eaux Souterraines (ESO). Version 0.1. 213 p. ssp-infoterre.brgm.fr/maitrise-gestion-des-impacts-sur-qualite-eaux-souterraines

Ministère en charge de l'environnement (2017) -Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. 128 p. ssp-infoterre.brgm.fr/methodologie-nationale-gestion-sites-sols-pollues

Ministère en charge de l'environnement (2019) - Surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués. Version 0.1. 71 p. ssp-infoterre.brgm.fr/surveillance-qualite-eaux-souterraines-appliquee-aux-icpe-sites-pollues

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Seguin J.J., DörfligerN. (2007) – Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM/RP-55332-FR, 128 p., 125 ill., 8 ann.

Vrba J. and Zaporozec A. (1994) - Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. IAH International Association of Hydrogeologists. International contributions to hydrogeology v.16, 156 p.

adour-garonne.eaufrance.fr

aida.ineris.fr

baignades.sante.gouv.fr

basol.developpement-durable.gouv.fr

bdlisa.eaufrance.fr

bnpe.eaufrance.fr

donnees.eaureunion.fr

geoportal-hamburg.de/geo-online

hubeau.eaufrance.fr

hydro.eaufrance.fr

infoterre.brgm.fr

ssp-infoterre.brgm.fr

rhin-meuse.eaufrance.fr

www.ades.eaufrance.fr

www.aria.developpement-durable.gouv.fr

www.artois-picardie.eaufrance.fr

www.cartograph.eaufrance.fr

www.corse.eaufrance.fr

www.data.gouv.fr

www.geoportail.gouv.fr

www.georisques.gouv.fr

www.gesteau.fr

www.guadeloupe.eaufrance.fr

www.guyane.eaufrance.fr

www.itrcweb.org/gsmc-1

www.loire-bretagne.eaufrance.fr

www.mayotte.eaufrance.fr

www.martinique.eaufrance.fr

www.naiades.eaufrance.fr

www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr

www.seine-normandie.eaufrance.fr

Méthodologie - Normes et textes réglementaires

Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. NOR SANP0720201A. www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000465574

Arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines. NOR DEVO0829047A www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000020040637

Circulaire du 23 octobre 2012 relative à l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines. NOR DEVL1227826C. www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0026250/met_20120021_0100_0034.pdf

Note technique du 19/12/19 abrogeant la circulaire du 23/10/2012 relative à l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines. NOR TREL1935920N. www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0031126/TREL1935920N.pdf

Norme NF X10-999 Août 2014 (2014) - Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages. https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-x10-999/forage-d-eau-et-de-geothermie-realisation-suivi-et-abandon-d-ouvrage-de-captage-ou-de-surveillance-des-eaux-souterraines-realise/article/815796/fa178152#a_bloc_info_exigences

Norme NF X31-614 Décembre 2017 (2017) - Qualité du sol - Méthode de détection et de caractérisation des pollutions - Réalisation d'un forage de contrôle ou de suivi de la qualité de l'eau souterraine au droit et autour d'un site potentiellement pollué. https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-x31-614/qualite-du-sol-methode-de-detection-et-de-caracterisation-des-pollutions-realisation-d-un-forage-de-controle-ou-de-suivi-de-la-q/article/874063/fa187011

Norme NF X31-615 Décembre 2017 (2017) - Qualité des sols - Méthodes de détection, de caractérisation et de surveillance des pollutions en nappe dans le cadre des sites pollués ou potentiellement pollués - Prélèvement et échantillonnage des eaux souterraines dans des forages de surveillance pour la détermination de la qualité des eaux souterraines. https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-x31-615/qualite-des-sols-methodes-de-detection-de-caracterisation-et-de-surveillance-des-pollutions-en-nappe-dans-le-cadre-des-sites-pol/article/871085/fa187005

Norme NF X31-620-2 Décembre 2018 (2018) - Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués - Partie 2 : exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle. https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-x31-620-2/qualite-du-sol-prestations-de-services-relatives-aux-sites-et-sols-pollues-partie-2-exigences-dans-le-domaine-des-prestations-d-/article/906749/fa190944

Méthodologie appliquée à la métropole de Lyon

ANTEA (2005) – Connaissance de la molasse miocène dans l'Est lyonnais – Rapport N° 35539/B, 81 p., 8 ann

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, 74 p., 21 fig., 10 tabl., 4 ann.

Asconit Consultants (2017) – Exploitation du réseau « SAGE » de suivi qualitatif et quantitatif des eaux de l'est Lyonnais. Eaux souterraines. Période 2015-2016. Rapport final. 106 p. 7 tab. 5 cartes, 2 fig. 7 ann.

Bernard-Valette N. (2000) –Simulation des impacts sur les eaux souterraines, de l'infiltration des eaux pluviales en milieu urbanisé. Application au cas de l'aquifère de l'Est lyonnais, 262 p, 4 ann.

Blum A., Brenot A., Chery L., Sonney R. (2006) – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône, Méditerranée, Corse – Rapport phase 2, caractérisation des secteurs à risque, rapport BRGM/RP-54530-FR, 137 p., 5 fig., 16 tab., 3 ann.

Brenot A., Blum A., Chery L. (2006) – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du basin Rhône Méditerranée et Corse – Rapport de phase 3, définition d'un programme d'acquisition de données – Rapport BRGM/RP-54663-FR, 45 p., 3 ann.

Busse J.F. (1980) – La pollution dans la nappe des formations quaternaires de l'Est de Lyon (France) – Thèse, 421 p.

Clozel Leloup B., Mamder J., Petit A.C. (2018) - Inventaire Historique de sites industriels et activités de service du nouveau Rhône (IHR) et de la Métropole de Lyon (IHU). Rapport final BRGM/RP-68027-FR, 65 p., 18 ill, 8 ann.

Mongereau Noël (2003) – Géologie du Grand Lyon – Communauté urbaine Grand Lyon, 159 p., 33 fig., 43 phot.

Mongereau Noël (2008) – Connaissance du sous-sol et de l'hydrogéologie : Apports à l'aménagement durable du territoire - Communauté urbaine Grand Lyon, 151 p., 38 fig., 1 tab., 9 phot.

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, 158 p., 29 ill., 14 ann.

SAGE Est-lyonnais (2015) – Tableau de bord SAGE 2015. Rapport annuel, 83 p.

Seguin J.-J. et 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, 119 p., 29 fig., 15 tab., 5 ann.

Seguin J.-J. (2008) - Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise - Phase 4 – Modélisation hydrodynamique en régime transitoire au pas de temps journalier et simulation de l'impact sur la nappe de 3 scénarios de crue du Rhône et de la Saône. BRGM/RP-56676-FR, 113 p., 45 fig., 14 tab., 4 ann.

Sonney R., Blum A., Chery L. (2005) – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône, Méditerranée, Corse – Rapport phase 1, recueil des données et des informations, rapport BRGM/RP-54031-FR, 135 p., 27 fig., 16 tab.

Tribouillard N. (2013) – Plan de gestion de la nappe de l'Est lyonnais, GESLY4, actualisation du modèle NAPELY – Rapport REAUCE00662-02 BURGEAP, 38 p.

ades.eaufrance.fr

basol.developpement-durable.gouv.fr

bdlisa.eaufrance.fr

bnpe.eaufrance.fr

data.grandlyon.com

infoterre.brgm.fr

ssp-infoterre.brgm.fr

www.ades.eaufrance.fr

www.data.gouv.fr

www.georisques.gouv.fr

Annexe 1

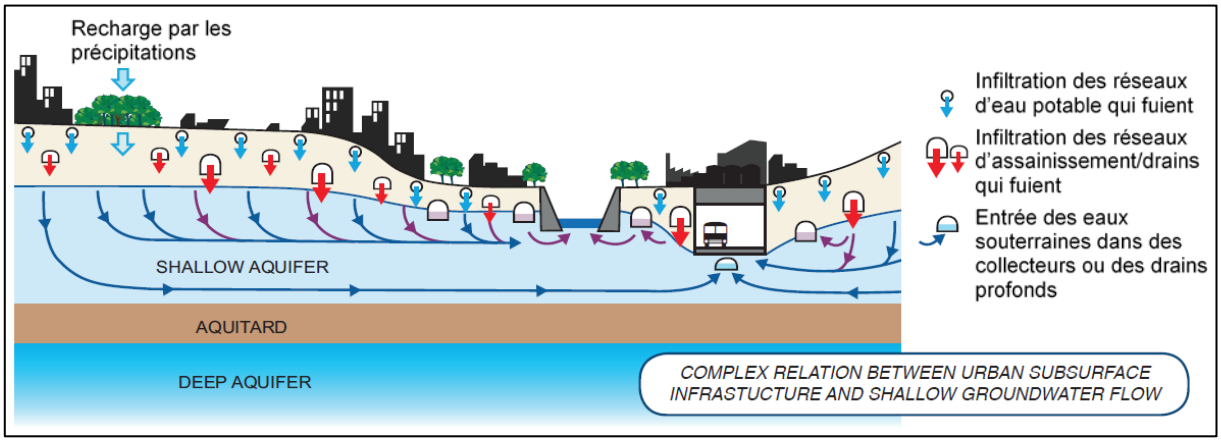
Modifications détaillées du cycle de l’eau et des régimes d’écoulement en milieu urbain

1. Modification du cycle de l'eau

Les aménagements successifs du territoire urbain perturbent les caractéristiques intrinsèques du sol. L'urbanisation modifie fortement le cycle de l'eau :

- les mécanismes de recharge sont bouleversés suite à l'imperméabilisation et l'anthropisation des sols, limitant souvent l'infiltration naturelle des eaux de pluie. Dans certains cas, ce déficit est largement compensé par les fuites des réseaux d'eau potable et d'eau usée, l'arrosage des parcs et jardins (Parriaux et al., 2010 ; Foster S. et al., 2013) ;
- les exutoires naturels, constitués par les cours d'eau, sont étanchéifiés et les prélèvements et collecteurs (drains) constituent de nouvelles sorties.

La recharge des nappes est un paramètre à prendre en compte pour comprendre l'infiltration des pollutions en profondeur et donc pour définir la vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis d'un polluant.



Relation entre les infrastructures urbaines et la nappe superficielle (traduit de Foster S. et Tyson G., 2015)

1.1. Recharge de la nappe

Les nappes souterraines sont naturellement alimentées par la fraction de l'eau de pluie qui n'est pas évapotranspirée, qui ne ruisselle pas et qui s'infiltre alors en profondeur, ainsi que, sous certaines conditions, par eaux superficielles.

- **Aménagements et imperméabilisation des sols**

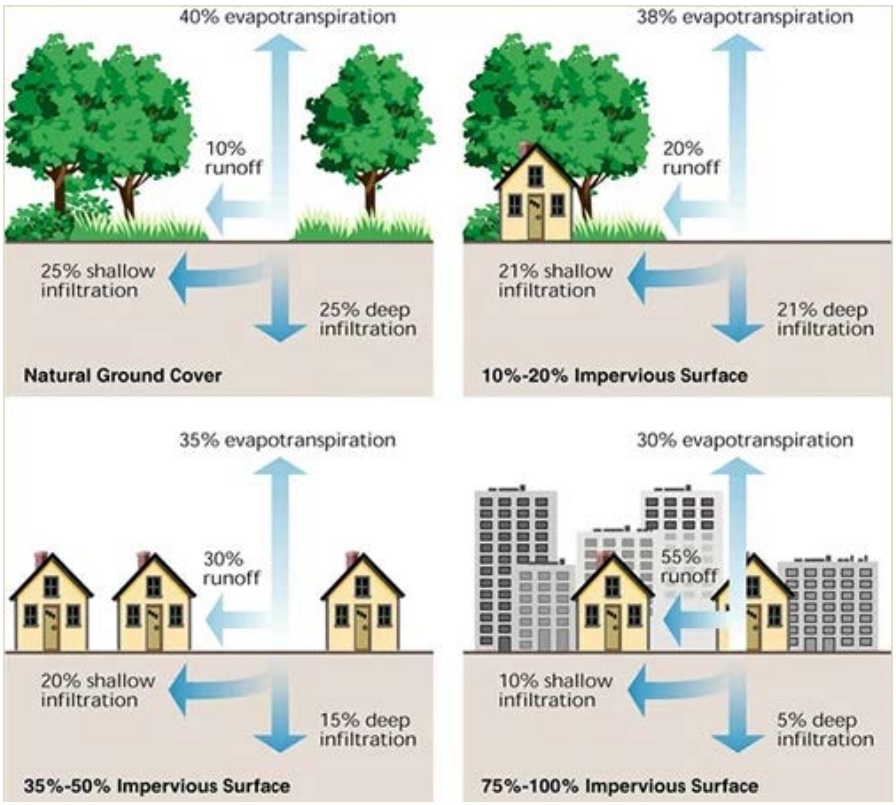
Les aménagements urbains affectent le rôle et l'importance des principaux processus que sont le ruissellement, l'évapotranspiration et l'infiltration. L'urbanisation contribue à la suppression de végétaux (forêts, prairies, champs), ces derniers étant les principaux contributeurs à l'évapotranspiration. Les surfaces fortement imperméabilisées et bâties limitent alors l'évapotranspiration (Morena, 2004 ; FISRWG ,1998 ; Minnig M et al., 2017) et entraîne une augmentation du ruissellement.

Les aménagements et constructions du territoire urbain s'accompagnent d'un apport de matériaux de sources différentes, comme des sables et graviers, des remblais ou des déchets de déconstruction, qui modifient la perméabilité des sols naturels.

Certains de ces matériaux sont plus perméables que les sols en place, favorisant alors le drainage de l'eau du sol environnant et de l'eau qui s'infiltre à travers les voiries (Cheverry et Gascuel, 2009). Ainsi, les nombreuses tranchées de pose des différents réseaux enterrés (eau, assainissement, gaz, électricité, téléphonie…), constituées d'un lit perméable de sable et de gravier, peuvent devenir des linéaires d'infiltration préférentielle. L'exploitation de géomatériaux, dans des carrières à ciel ouvert ou souterraines, peut conduire à la réduction de la zone non saturée ou de la couche géologique protectrice d'un aquifère. Ces zones facilitent alors l'infiltration des eaux vers la nappe. D'autres matériaux peuvent être moins perméables que les sols en place et limiter l'infiltration des eaux vers la nappe (bâtiments, chaussées…).

De nombreuses études récentes admettent que la forte imperméabilisation des surfaces urbaines entraîne une diminution de l'infiltration directe de l'eau dans le sol et réduit de ce fait les apports d'eau en profondeur. Le renouvellement des eaux souterraines est alors diminué, ce qui induit une baisse du volume stocké dans les aquifères peu profonds et donc des niveaux des eaux souterraines (Cheverry et Gascuel, 2009). Plus la part de revêtements imperméables est élevée, moins la quantité d'eau disponible pour l'infiltration est importante (FISRWG ,1998) :

- 10-20% de surface imperméabilisée : réduction de 4% de l'infiltration vers la nappe par rapport à l'état naturel (0% de surface imperméabilisée) ;
- 35-50% de surface imperméabilisée : réduction de 10% de l'infiltration vers la nappe par rapport à l'état naturel ;
- 75-100% de surface imperméabilisée : réduction de 20% de l'infiltration vers la nappe par rapport à l'état naturel.

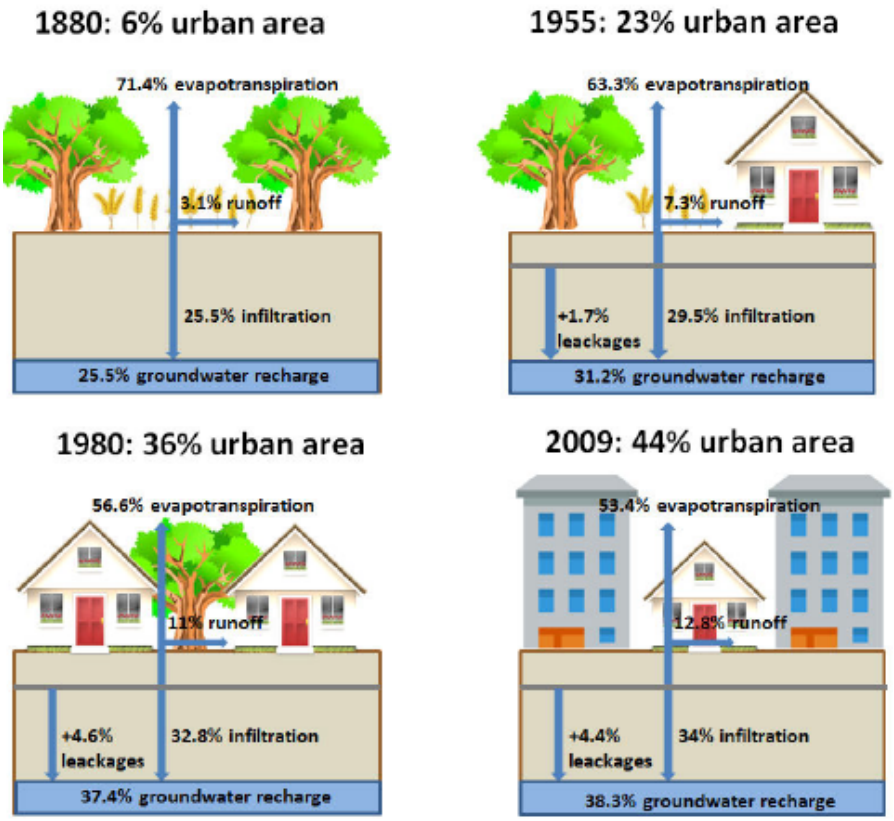


Répartition des flux d'eau associés à l'évapotranspiration, au ruissellement et à l'infiltration, en fonction du taux d'imperméabilisation (Source : FISRWG ,1998)

Cependant, d'autres études contredisent ces conclusions. Ainsi, à Dübendorf, dans le canton de Zurich en Suisse, l'imperméabilisation des sols engendre une augmentation de la recharge des

nappes de +50%, de 242 mm en 1880 à 363 mm entre 1880 et 2009, du fait notamment de l'augmentation de la part d'eau infiltrée (Minnig M et al., 2017) :

- 23% de surface imperméabilisée en 1955 : augmentation de 4% de l'infiltration vers la nappe par rapport à l'état initial de 1880 (6% de surface imperméabilisée) ;
- 36% de surface imperméabilisée en 1980 : augmentation de 7,3% de l'infiltration vers la nappe par rapport à l'état initial de 1880 ;
- 44% de surface imperméabilisée en 2009 : augmentation de 8,5% de l'infiltration vers la nappe par rapport à l'état initial de 1880.



Evolution des flux d'eau associés à l'évapotranspiration, au ruissellement, à l'infiltration et aux fuites de réseaux en 1880, 1955, 1980 et 2009 à Dübendorf (Source : Minnig M et al., 2017)

A titre indicatif, le taux d'imperméabilisation de Paris, c'est-à-dire le rapport entre la surface participant au ruissellement et la surface totale de la ville, est évalué à 70% en considérant les bois de Boulogne et de Vincennes, et à 77% en les excluant (Lamé A., 2013). Ces taux reflètent le caractère particulier d'une grande métropole très fortement urbanisée en surface.

- **Fuites des réseaux et arrosage**

Les réseaux d'eau potable, des eaux usées et pluviales, les bassins de collecte peuvent être fuyards ou déborder. Les réseaux d'adduction et de collecte des eaux peuvent se situer dans la zone non saturée et les fuites permettent alors d'alimenter la nappe par gravité. S'ils sont situés en zone saturé, seuls les réseaux sous pression (eau potable) peuvent générer des fuites et alimenter la nappe. La sur-irrigation des parcs et jardins urbains ainsi que l'assainissement individuel s'infiltre directement en profondeur. L'ensemble de ces apports constituent une recharge non naturelle de la nappe, qui se traduit par une remontée des niveaux des eaux souterraines plus ou moins importante, selon les volumes infiltrés et les caractéristiques de l'aquifère, et localisée au droit de ces secteurs ponctuels ou linéaires.

D'après le guide de l'IAH (Lerner David N., Issar Arie S. et Simmers Ian, 1990), l'impact de l'urbanisation sur la recharge ne concerne réellement que les zones à climats secs. En effet, dans des zones tempérées voire humides, la diminution de la recharge naturelle du fait de l'imperméabilisation de la surface urbaine est compensée par la recharge due à l'importation des eaux consommées depuis des aquifères situés en extérieur de la ville et aux pertes des réseaux de distribution et d'assainissement (estimées entre 15 et 25% du volume d'eau transité). En zone semi-aride à aride, les pertes au niveau des réseaux constitueront toujours un apport supplémentaire d'eau pour les nappes. Cependant, les efforts réalisés ces dernières années par certaines villes pour la réduction des fuites des réseaux peuvent rendre ces conclusions obsolètes. Les volumes et la localisation des fuites ainsi que les impacts sur les niveaux des eaux souterraines sont difficiles à appréhender.

A Paris, les fuites ont été évaluées à environ 10% du volume transitant dans le réseau d'assainissement et à environ 5% du volume transitant dans le réseau d'eau non potable lorsqu'il est implanté dans le sous-sol (Lamé A., 2013). Ces fuites correspondent à un volume annuel compris entre 33 et 36 millions de m^3. Par ailleurs, le volume total de la pluviométrie qui recharge les nappes est estimé à 7,8 millions de m^3/an ; les contributions majeures provenant des infiltrations d'eau météorique dans les cours d'immeubles, voies ferrées, chemins, terrains de tennis… et des pluies efficaces dans les bois de Boulogne et Vincennes. Les fuites sont donc comparables à l'équivalent de plus de quatre années de « recharge naturelle ».

1.2. Exutoires de la nappe

Les exutoires naturels des eaux souterraines, lieux de déversement des nappes, sont représentés par les sources, par les cours d'eau pour les nappes libres superficielles et par les mers et océans.

- **Cours d'eau**

Les cours d'eau drainent fréquemment les nappes libres et constituent leurs exutoires naturels. En milieu urbain, les fleuves et rivières sont canalisés, afin de maîtriser leurs cours et d'éviter les inondations. L'étanchéification et le colmatage des berges réduisent voire interdisent toutes relations entre les eaux superficielles et souterraines. L'aménagement des cours d'eau peut alors conduire, à proximité des berges, à la remontée des niveaux de la nappe superficielle.

- **Prélèvements en nappe**

Les usages de l'eau souterraine sont multiples en milieu urbain et permettent de répondre aux différents besoins de la ville :

- Prélèvements pour l'alimentation en eau potable, les besoins industriels, l'arrosage et l'irrigation, les usages récréatifs (piscine…) ;
- Prélèvements et rejets pour les installations géothermiques ;
- Pompages liés à la protection d'ouvrages souterrains, permettant d'éviter l'infiltration d'eau et l'ennoiement de ces ouvrages (tunnels et trémies des routes, métros et trains, parkings, centres commerciaux, bâtiments…) ;
- Pompages pour rabattement de la nappe liés à des chantiers de construction.

Ces prélèvements constituent de nouvelles sorties pour la nappe et contribuent à diminuer les stocks d'eau souterraine. Ils peuvent entièrement ou en partie être consommés et « perdus » pour le milieu naturel (process industriel, irrigation…), retourner à la nappe (géothermie, fuites des réseaux d'adduction…) ou être rejetés dans le milieu naturel (pompages de chantiers, stations d'épuration, sur-irrigation…). L'impact sur les niveaux des eaux souterraines sont

difficilement quantifiables : la localisation et les volumes des prélèvements et des rejets sont parfois non déclarés ou mal connus.

A titre d'exemple, en 2009, 11,1 millions de m^3 prélevés dans les nappes affleurantes à Paris furent déclarés à la SAP, Section de l'Assainissement de Paris (Lamé A., 2013). Ce volume correspond à 6,3 millions de m^3 pour la RATP, en prenant en compte les volumes rejetés directement dans la Seine, et 4,8 millions de m^3 pour les particuliers. Il est à noter que de nombreuses lacunes de données sur les déclarations existent, car la SAP estime que le volume réel d'eau d'exhaure est vraisemblablement plutôt proche de 30 millions de m^3 par an.

- **Collecteurs : drains et réseau d'assainissement**

La ligne d'eau des collecteurs d'assainissement peut se trouver en-dessous du niveau piézométrique, c'est-à-dire dans la zone saturée. Dans ce cas, les collecteurs des eaux usées, qui ne sont pas sous pression, peuvent faire office de drains et être alimentés par la nappe. Ces apports produiraient des eaux parasites en aval et dilueraient les eaux chargées à l'arrivée aux stations d'épuration.

Le drainage de la nappe peut s'effectuer par la mise en place de drains liés à la protection d'ouvrages souterrains et permettant d'éviter l'infiltration d'eau et l'ennoiement de ces infrastructures, telles que les tunnels et trémies routiers, des métros et trains, les parkings, les bâtiments… (Wolf et al., 2006).

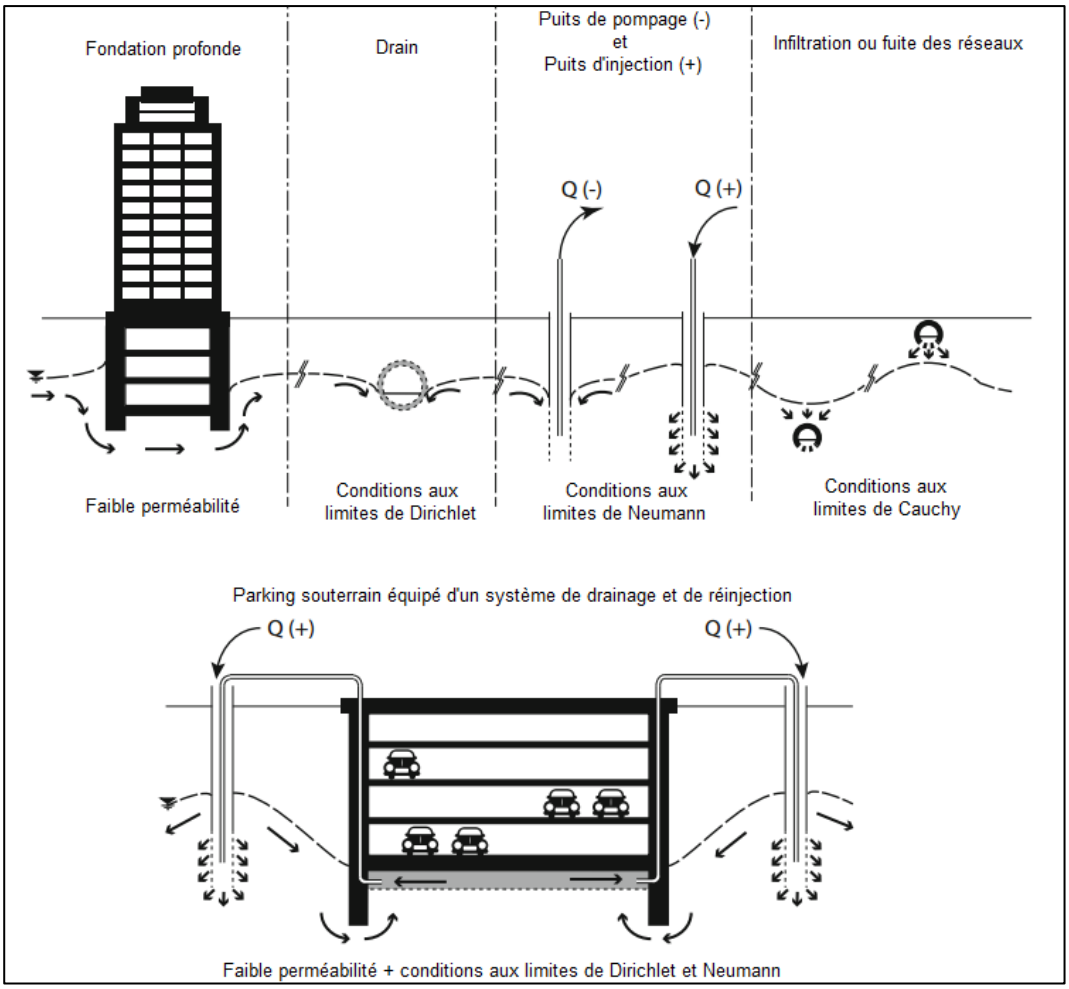
Des galeries drainantes sont également mis en place au droit de certains quartiers, afin de rabattre le niveau des eaux souterraines et de limiter les risques d'inondation. A titre d'exemple, le Rhône a été aménagé avec la mise en place en 1966 du barrage de Pierre-Bénite en aval de Lyon. Afin d'éviter une remontée de la nappe en amont du barrage, des drains ont également été mis en place par la Compagnie Nationale du Rhône. En rive gauche du Rhône, la galerie du drain est longue de près de 6,4 km, sur une section de 1,8 m à 2,5 m de large et 1,3 m de hauteur en amont et de 3,0 m de large et 3,3 à 4,9 m de hauteur maximum en aval. Ces drains représentent des exutoires importants de la nappe avec un débit moyen de 400 l/s en rive droite du Rhône et de 1000 l/s en rive gauche (Nicolas et al., 2004).

2. Modification des régimes d'écoulement des eaux souterraines

Les eaux souterraines s'écoulent naturellement depuis les secteurs de recharge de la nappe (infiltration des eaux de pluie pour une nappe libre ou des eaux de la nappe sus-jacente pour une nappe captive) vers les exutoires (sources, cours d'eau et océans). Les écoulements sont naturellement influencés par le drainage des cours d'eau pour les nappes libres, par un changement des caractéristiques intrinsèques de la roche aquifère (perméabilité), par la présence d'accidents géologiques (failles)… Les écoulements naturels des eaux souterraines peuvent être fortement modifiés par les aménagements du sol et du sous-sol urbain de deux manières (Attard G. et al., 2016) :

- la première en perturbant l'équilibre de masse du système d'écoulement régi par des conditions aux limites (Dirichlet, Neumann, Cauchy) ;
- la seconde en constituant un obstacle à l'écoulement naturel affectant les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

Les impacts des aménagements observés sur les écoulements des eaux souterraines sont d'une part individuels et ponctuels et d'autre part cumulatifs dans le cas, par exemple, d'un parking souterrain équipé d'un système de pompage.



Les structures urbaines et leurs impacts sur les niveaux piézométriques et les écoulements (traduit de Attard G. et al., 2016)

2.1. Modification de l'équilibre de la nappe

Les modifications du cycle de l'eau, et notamment des conditions de recharge (imperméabilisation des sols, fuites de réseau, rejets en nappe…) et des exutoires (colmatage et étanchéification des berges des cours d'eau, prélèvements en nappe, drains…) bouleversent les écoulements souterrains naturels. Des perturbations peuvent alors se former au droit de secteurs ponctuels ou linéaires :

- dépressions (drainage) à proximité des forages de pompage, des galeries de drainage et des collecteurs situés en zone saturée ;
- dômes piézométriques (recharge) à proximité des forages et drains de rejet, des fuites de réseaux, des berges des cours d'eau colmatées ou étanches.

Une des deux techniques couramment utilisée pour la construction d'ouvrages souterrains consiste à drainer les eaux souterraines, afin de réduire la pression hydrostatique de l'eau sur l'ouvrage (Cerema, 2018a). Les eaux souterraines sont drainées ou pompées sous l'ouvrage puis réinjectées en aval de l'ouvrage directement en nappe. Ce principe de prélèvement en amont

puis de rejet en aval est également utilisé pour la géothermie sur nappe. Du fait de l'apparition d'une dépression en amont et d'un dôme en aval, les sens d'écoulement des eaux souterraines peuvent se retrouver localement inversés. Cette influence sur les écoulements se ressent, selon les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, à proximité immédiate de l'ouvrage et jusqu'à plusieurs centaines de mètres à l'amont et à l'aval de l'ouvrage (Cerem, 2018b).

2.2. Modifications des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère

L'aménagement du sous-sol conduit à la destruction de sa matrice, remplacée par une autre structure (construction), par des géomatériaux (remblais) ou par du vide (carrière souterraine), ayant une perméabilité différente de la formation géologique initialement en place. Le sous-sol urbain fortement anthropisé apparaît alors comme discontinu horizontalement et verticalement, créant de nombreuses ruptures pour les écoulements des eaux souterraines.

L'exploitation et l'emploi de géomatériaux peuvent constituer des drains ou des barrages, ponctuels ou linéaires, lorsqu'ils recoupent les niveaux piézométriques. L'exploitation des géomatériaux, par des carrières souterraines ou à ciel ouvert, conduit à la destruction de la matrice de l'aquifère et modifie les écoulements des eaux souterraines en créant des zones de fort drainage. L'emploi de géomatériaux, afin de combler des tranchées et des excavations, peut conduire à des effets de barrages si les éléments de remblais ont des conductivités hydrauliques plus faibles que l'encaissant ou à des effets de drains si les conductivités hydrauliques des remblais sont plus élevées.

La seconde technique courante pour la construction d'infrastructures souterraines propose de lester l'ouvrage afin qu'il résiste à la pression de l'eau (Cerema, 2018a). Les différents ouvrages souterrains existants dans une grande agglomération sont alors autant d'obstacles potentiels à l'écoulement des nappes, lorsque qu'ils se retrouvent, de par leur profondeur, sous le niveau piézométrique : tunnels de transport (route, voie ferrée, métro), trémies, sous-sols et parkings souterrains, fondations de bâtiments importants, canalisations de grand diamètre (Berthier, 1999 ; Ondel, 2007). Ces infrastructures peuvent perturber le régime d'écoulement de la nappe, en constituant des barrages ou des rétrécissements de la section de l'aquifère (Gilli et al., 2004). L'impact de ces barrières étanches se traduit par une remontée piézométrique en amont et une baisse en aval, par une variation des directions d'écoulement de la nappe ainsi que par une augmentation du gradient hydraulique entre les ouvrages et à leurs extrémités. Ces perturbations sont plus ou moins durables et plus ou moins étendues, selon les paramètres hydrodynamiques et les fluctuations de la nappe et selon la section de l'ouvrage. Ainsi, un ouvrage remplira pleinement son rôle de barrière étanche lorsqu'il est encastré dans une section représentative, en profondeur et en longueur, de la zone saturée (Gilli et al., 2004). Ce cas est fréquemment rencontré dans les zones urbaines car les agglomérations sont fréquemment implantées en vallée où la nappe est peu profonde et car l'utilisation du sous-sol tend à s'intensifier pour y établir des niveaux enterrés (parkings en sous-sol) et des tracés souterrains (métros). Les perturbations sont particulièrement significatives lorsque les infrastructures souterraines sont disposées transversalement à la direction d'écoulement de la nappe (Gilli et al., 2004). Cependant, certaines études démontrent que l'impact de ces barrières étanches sur les écoulements d'une nappe libre serait négligeable pour un gradient hydraulique inférieur à 0,5% (Attard G. et al., 2016). Dans le cas d'une nappe captive, la présence d'une barrière étanche pourrait générer une élévation de niveaux de l'ordre de plusieurs mètres (Pujades E. et al., 2012).

2.3. Modification des régimes d'écoulement des eaux souterraines et impacts sur la qualité des eaux souterraines

La perturbation des écoulements peut avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines, en mélangeant et déplaçant les masses d'eaux au sein d'une même nappe. Des composés flottants ou coulants peuvent être remis en suspension et des panaches de pollution ou un biseau salé peuvent être déplacés. L'impact des prélèvements et des ouvrages souterrains sur les écoulements et les mélanges des eaux souterraines restent difficilement quantifiables et dépend des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère ainsi que de la profondeur et des volumes prélevés et injectés ou de la section de la zone saturée de l'aquifère concernée par l'occupation de l'ouvrage (profondeur et largeur).

Certaines villes côtières ont dû faire face à la migration accélérée du biseau salé liée à une surexploitation de la nappe : Séoul (Corée du Sud), Bangkok (Thaïlande) et Fremont (Etats-Unis). Entre 1954 et 1990 la ville de Bangkok (Thaïlande) est passée d'un prélèvement de 8 000 m^3/jour à 1,4 Mm^3/jour abaissant localement le niveau de la nappe de 60 mètres. Cette surexploitation a conduit à une intrusion saline et l'arrêt des pompages publics dans certaines zones (Howard K.W.F. et Gelo K.K., 2002). La salinisation des eaux souterraines a été observé dès 1920 sur la commune de Fremont (Etats-Unis) engendrant une contamination de l'aquifère superficiel mais également des aquifères plus profond. En 1962, le comté d'Alameda a financé un projet permettant d'augmenter la recharge locale par un approvisionnement extérieur et d'ainsi remonter le niveau piézométrique. A partir de 1972, le niveau de la nappe est repassé au-dessus du niveau de la mer et a permis de retrouver un gradient hydraulique naturel (Chen Eileen et al., 2020).

Annexe 2

Fiches descriptives des études bibliographiques

France – Lyon (48 km^2 et 0,52 millions d'habitants en 2017)

- **Objectif et synthèse des résultats**

La ville de Lyon est exposée à des risques d'inondation, non seulement par débordement du Rhône et de la Saône, mais aussi par remontée des nappes peu profondes (nappes alluviales et des couloirs fluvioglaciaires). Les risques sont complexes car ils résultent de la combinaison d'une vulnérabilité forte, générée par une zone urbaine particulièrement développée, et d'un aléa hydraulique lié aux débordements possibles des cours d'eau, au ruissellement pluvial urbain et aux remontées de nappes connectées hydrauliquement aux cours d'eau.

Afin d'envisager des actions de prévention et de protection, Lyon Métropole (ex Communauté Urbaine de Lyon) a demandé au BRGM d'améliorer la connaissance des écoulements souterrains. Pour cela, le BRGM a mené une étude visant d'une part à mettre en place un réseau de suivi piézométrique et d'autre part à réaliser une modélisation hydrodynamique des nappes des alluvions, des alluvions fluvioglaciaires et de la molasse du Miocène.

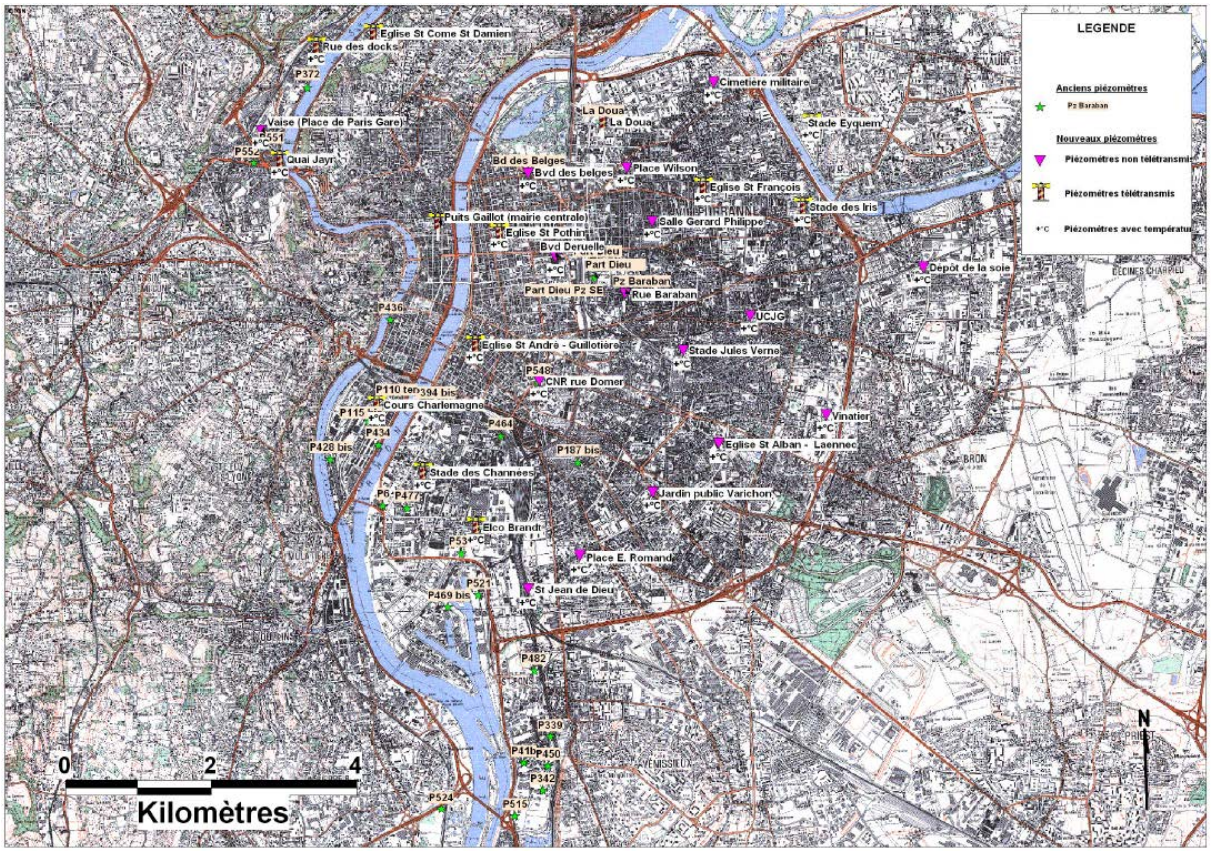
Deux cartes piézométriques de hautes et de basses eaux 2004 ont été réalisées sur la base de 78 mesures. Le calage du modèle hydrodynamique a été réalisé en régime permanent et en régime transitoire sur un état piézométrique moyen (moyenne des mesures faites en mai et novembre 2004). Le modèle permet de visualiser les écoulements souterrains incluant les barrières hydrauliques, les drains, les prélèvements et rejets dans les eaux souterraines ainsi que de réaliser des simulations de remontées de nappe à partir de trois scénarios de crues sur le Rhône et la Saône. Le réseau piézométrique, comprenant 29 ouvrages, a été mis en service début octobre 2006. Les données acquises ont été utilisées afin de valider le calage du modèle hydrodynamique sur 2000-2004. Puis les résultats du modèle ont validé le réseau piézométrique, en proposant des rectifications jugées nécessaires pour que le réseau soit représentatif des écoulements des nappes.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau de surveillance a été bâti à partir des points inventoriés en privilégiant les ouvrages existants, pour des raisons évidentes d'économie, avec des possibilités d'accès, de protection et d'équipement. L'existence de chroniques piézométriques historiques a également constitué un atout supplémentaire dans le choix d'un ouvrage. Les 29 ouvrages sont répartis sur l'ensemble de la zone d'étude : les secteurs les plus sensibles aux inondations, mais aussi les bordures. Ce sont ces dernières qui permettent l'évaluation des apports par les limites ainsi que par les cours d'eau, et donc de caractériser les transferts entre la nappe et les eaux de surface. La comparaison des niveaux calculés par le modèle hydrodynamique aux niveaux mesurés sur les 29 piézomètres du réseau montre une bonne adéquation entre mesures et calculs (écarts moyens généralement inférieurs à 50 cm et fluctuations des niveaux bien reproduites). Ces étapes ont permis de conclure que le réseau de surveillance quantitatif de l'agglomération lyonnaise représentatif des écoulements des différentes nappes.

Afin de garantir la pérennité du réseau, des convention d'accès ont été signées avec les propriétaires des 12 ouvrages existants. Afin de compléter les secteurs les moins densément couverts, le réseau a été complété par 17 piézomètres forés dans le cadre de l'étude. Les ouvrages ont été équipés de capteurs et enregistreurs télétransmis. Le réseau est déclaré, en état provisoire, sous ADES : 0600000232 - RAESOUPGL - Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du Grand Lyon. Il ne concerne que les 11 points appartenant également au réseau quantité du SAGE de l'Est Lyonnais (ADES : 0600000224). Les données sont actualisées fréquemment et sont accessibles librement et gratuitement, via le réseau du SAGE de l'Est

Lyonnais. Concernant les données des piézomètres non déclarés dans ADES, elles sont consultables sur demande auprès de la Métropole de Lyon.



Localisation des piézomètres du réseau de l'agglomération lyonnaise (source : Seguin J.-J., 2008)

Références :

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, 158 p., 29 ill., 14 ann.

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, 74 p., 21 fig., 10 tabl., 4 ann.

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, 119 p., 29 fig., 15 tab., 5 ann.

Seguin J.-J. (2008) - Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise - Phase 4 – Modélisation hydrodynamique en régime transitoire au pas de temps journalier et simulation de l'impact sur la nappe de 3 scénarios de crue du Rhône et de la Saône. BRGM/RP-56676-FR, 113 p., 45 fig., 14 tab., 4 ann.

France – Est-Lyonnais (400 km^2 et 0,30 millions d'habitants en 2016)

- **Objectif et synthèse des résultats**

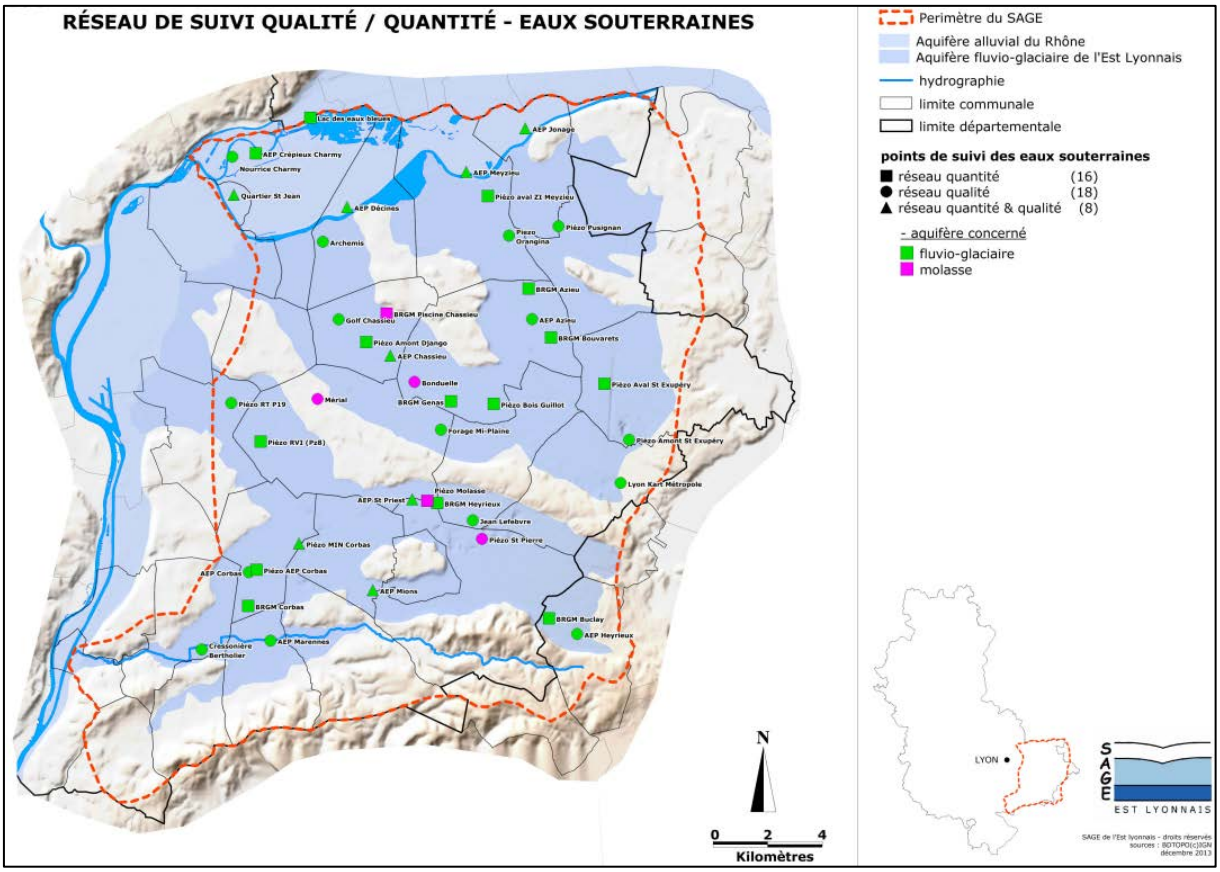
Le SAGE de l'Est Lyonnais regroupe 31 communes, sur environ 400 km^2. Son territoire a connu une forte urbanisation depuis le début du 20^{ième} siècle, suite au développement des villes et de l'industrialisation. Des teneurs importantes en solvants chlorés et, dans une moindre mesure, en hydrocarbures, ont été mises en évidences dans les nappes superficielles (alluvions récentes et fluvioglaciaires). Les pressions agricoles sont également fortes et les eaux souterraines sont impactées par une pollution chronique aux nitrates et composés azotés. Les objectifs du SAGE de l'Est Lyonnais sont notamment la reconquête de la qualité des eaux souterraines, la gestion durable de la ressource en eau souterraine, des milieux superficiels et des inondations.

Afin de réaliser un état des lieux initial du SAGE de l'Est Lyonnais, deux réseaux de suivi qualitatif et quantitatif ont été mis en place entre 2000 et 2004. Le réseau qualité est opérationnel depuis 2005 et permet de réaliser 4 campagnes annuelles (mars, juin, septembre et décembre) sur les aquifères des alluvions du Rhône, des couloirs fluvioglaciaires de Meyzieu, Décines et Heyrieux ainsi que de la molasse profonde du Miocène. Ponctuellement, un bilan qualitatif et quantitatif permet de suivre les évolutions et de dresser l'état des lieux du SAGE. Les données piézométriques permettent également la mise à jour d'un modèle hydrodynamique des nappes (NAPELY), définissant les volumes prélevables.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le bureau d'études BURGEAP a mené un inventaire des ouvrages ayant fait l'objet d'un suivi piézométrique plus ou moins régulier depuis 1995 : piézomètres du Grand'Lyon (Lyon Métropole), DIREN (DREAL), BRGM, UNICEM, captages SDEI et Générale des Eaux. Les chroniques piézométriques ont été analysées et une carte piézométrique a été actualisée avec 45 mesures prises en mai 2004, sur le territoire du SAGE de l'Est Lyonnais. L'évolution de la qualité des eaux souterraines a été étudiée sur l'ensemble du territoire du SAGE, à partir des analyses disponibles et réalisées entre 1995 et 2003. Une campagne d'analyses a été effectuée sur 27 points durant le printemps et l'été 2004 pour la bactériologie réduite, la physico-chimie complète, les métaux, les micropolluants organiques. Les résultats des réseaux de suivi qualitatif et quantitatif ont été comparés aux connaissances acquises, renforcés et optimisés afin d'être représentatif des écoulements souterrains, des pressions et des secteurs pollués connus. Ainsi, des points de suivi ont été disposés en amont et aval des principales zones de pollution potentielle. Les réseaux ont été pérennisés et adaptés avec les résultats des études hydrogéologiques et des analyses des années suivantes.

En 2018, le réseau de suivi du SAGE de l'Est Lyonnais se compose de 26 points pour le suivi qualitatif et de 25 point pour le suivi quantitatif. Deux réseaux sont déclarés sous ADES : 0600000224 - RAESOUQESLY - Réseau de suivi quantitatif de la nappe de l'est lyonnais (69) et 0600000225 - RAESOUPESLY - Réseau de suivi qualitatif de la nappe de l'est lyonnais (69). En 2018, les 25 points du réseau quantité appartiennent à 4 réseaux différents sous maîtrises d'ouvrage différentes : 10 points sont gérés par le Conseil Général du Rhône, représenté par le SAGE de l'Est Lyonnais (ADES : 0600000231), 9 points par la Métropole de Lyon (ADES : 0600000232) et 6 points par le BRGM (0600000215). Le réseau qualité compte 26 actifs sous maîtrise d'ouvrage du Conseil Général du Rhône, représenté par le SAGE de l'Est Lyonnais (ADES : 0600000225), de l'Agence de l'eau (ADES : 0600000005), de l'ARS pour les captages d'eau potable (ADES : 0000000028) et d'industriels (ADES : 0600000137). Les données sont actualisées fréquemment et sont accessibles librement et gratuitement. Les rapports de bilan sont disponibles sur le site du SAGE de l'Est Lyonnais.



Réseau de suivi qualitatif et quantitatif des eaux du SAGE de l'Est Lyonnais (source : SAGE Est Lyonnais, 2013)

Références :

Asconit Consultants (2017) – Exploitation du réseau « SAGE » de suivi qualitatif et quantitatif des eaux de l'est Lyonnais. Eaux souterraines. Période 2015-2016. Rapport final. 106 p. 7 tab. 5 cartes, 2 fig. 7 ann.

SAGE Est Lyonnais (2005) – Rapport état des lieux et diagnostic. 184 p.

France – Paris (105 km² et 2,19 millions d'habitants en 2017)

- **Objectif et synthèse des résultats**

Une modélisation géologique et hydrogéologique du sous-sol de Paris a été réalisée de manière à rendre compte des impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains. Le modèle hydrogéologique multicouche concerne 6 couches aquifères aux caractéristiques variées et 5 couches semi-perméables à imperméables. La construction du modèle a nécessité une discrétisation par un maillage de 50 m de côté et l'exploitation des données de 17 772 sondages et des niveaux d'eau de 669 piézomètres. Plus de 20 000 parkings et constructions souterrains, 143 km de tunnels de métro et du réseaux ferrés et les prélèvements représentant un volume d'eau de 12 millions de mètres cubes ont été intégrés.

Ce modèle hydrodynamique maillé permet d'identifier les secteurs comportant des dépressions piézométriques, de quantifier les prélèvements, de rendre compte de l'impact des réseaux d'eau sur la recharge des aquifères et de composer un SIG tridimensionnel du sous-sol de la capitale en rassemblant un ensemble de donnée issue de différentes entités. Il a également donné lieu à différentes simulations exploratoires.

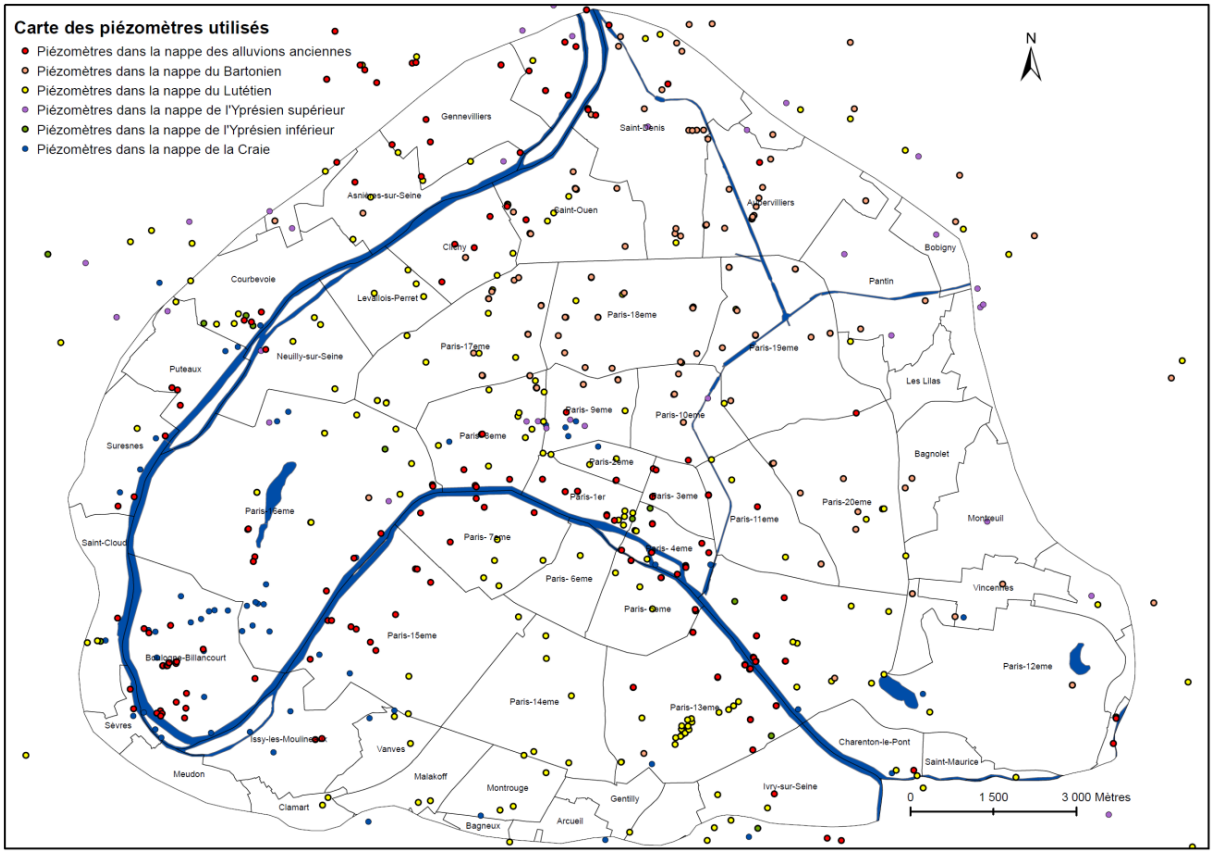
- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Différents organismes gèrent des réseaux piézométriques et récupèrent des niveaux d'eau, sous forme de mesures ponctuelles ou régulières (mesures journalières à trimestrielles) : RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens), CG93 (Conseil Général de Seine-Saint-Denis), BRGM et IGC (Inspection Générale des Carrières). Pour cette modélisation, les données de 2010 des différents réseaux de piézomètres existants ont été regroupées afin de pouvoir tenir compte des 6 nappes présentes au droit de la ville de Paris. C'est donc près de 669 piézomètres qui ont servis à la réalisation de cartes piézométriques.

Sachant que la superficie totale prise en compte dans le modèle est de 206,59 km², la densité de points de mesures toutes nappes confondues est de 3,24 piézomètres par km². La répartition des densités est différente selon la nappe considérée. La densité est plus importante pour les nappes superficielles, le nombre de forages et puits existant étant élevé et ces nappes présentent un risque pour le milieu urbain : inondations par remontée des nappes des alluvions et du Bartonien et effondrements des carrières dans les calcaires du Lutétien.

Nappes	piézomètres IGC	piézomètres RATP	piézomètres CG 93	piézomètres BRGM	piézomètres total	Superficie (km²)	Densité (pts/km²)
Alluvions anciennes	64	38	1	55	**158**	106,56	**1,48**
Bartonien	38	44	5	34	**121**	104,04	**1,16**
Lutétien	94	74	1	78	**247**	173,37	**1,42**
Yprésien supérieur	23	4	0	24	**51**	130,01	**0,39**
Yprésien inférieur	5	2	0	8	**15**	166,83	**0,09**
Yprésien (sup et inf)	28	6	0	32	**66**	130,01	**0,51**
Campanien	13	5	0	59	**77**	206,59	**0,37**
total	237	167	7	258	**669**	206,59	**3,24**

Origine et densité des piézomètres en fonction de la nappe (source : modifié de Lamé A., 2013)



Localisation des piézomètres selon la nappe considérée (source : Lamé A., 2013)

Références :

Lamé A. (2013) - Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 214 p.

France – Eurométropole de Strasbourg (338 km² et 0,49 millions d'habitants en 2016)

- **Objectif et synthèse des résultats**

En 1991 et 1992, des panaches de pollution de COHV (Composés OrganoHalogénés Volatils) ont été détectés en aval de sites industriels et en amont d'un captage d'eau potable. En 1993, l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) a mis en place un observatoire appelé Observatoire de la Nappe Alluviale (ONAP). Ce groupe de travail, présidé par l'Eurométropole de Strasbourg, regroupe l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Alsace, les services de l'Etat (DDT, DREAL et ARS), le BRGM, l'APRONA et les représentants des industriels. Il a pour objectif de définir les actions pour le suivi de la qualité de la nappe et le contrôle de l'impact des activités humaine sur la qualité des ressources en eau. Une réunion annuelle permet de diffuser les résultats, d'orienter les programmes d'actions selon les problématiques remontées par les partenaires.

De 1992 à 2006, les travaux ont permis de cartographier les panaches de pollution en solvants chlorés et d'engager des actions pour la reconquête de la qualité des eaux souterraines : recensement des prélèvements en eau et établissement de cartes des écoulements des eaux souterraines, détermination de la vulnérabilité de la nappe vis-à-vis des activités humaines, extension des panaches et recherche des sources de pollution, action de dépollution des eaux souterraines et des sols… Le réseau de surveillance spécifique mis en œuvre permet de modéliser, grâce à un suivi annuel, l'évolution des panaches de pollution aux solvants chlorés.

A partir de 2006, de nouvelles problématiques ont émergées :
- impact des installations géothermiques sur la température des eaux souterraines ;
- risque d'inondation par remontée de nappe ;
- risque de pollution des eaux souterraines, notamment en produits phytosanitaires, résidus de médicaments et perturbateurs endocriniens
- risque de pollution en aval de l'ensemble des sites industriels et protection des captages d'eau potable ;
- impact de l'infiltration des eaux pluviales sur la qualité de la nappe.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

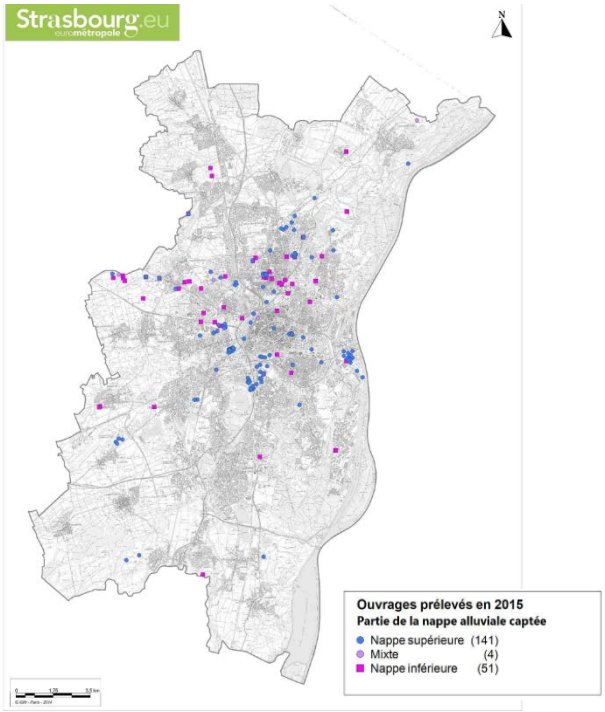
Le réseau ONAP, défini pour le suivi des panaches de COHV, a été étendu et renforcé sur l'ensemble du territoire de l'Eurométropole pour répondre aux nouveaux objectifs. En 2015, le réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines comportait 196 ouvrages : 150 points gérés par l'Eurométropole et répartis sur son territoire, renforcés par 46 points suivis par d'autres organismes. Cependant les problèmes de transmission de données entre les organismes et l'Eurométropole ont fait que 22 des 46 points n'ont pu être exploités. Parmi les ouvrages de l'Eurométropole, 81 points sont spécifiquement prélevés dans le cadre de la surveillance spécifique de résorption des panaches de pollution aux COHV et 31 ouvrages pour l'analyse de 120 molécules phytosanitaires.

Les travaux menés sur la géothermie ont permis de créer en 2015 un réseau pour le suivi de la température des eaux souterraines. Il compte 75 points sélectionnés à partir de réseaux existants (qualité ONAP et APRONA) et de forages déclarés en BSS (Banque de données du Sous-Sol).

Le réseau qualité est déclaré, en état provisoire, sous ADES : 0200000027 - RRESOUQONAPCUS - Réseau de suivi qualité de l'observatoire des eaux souterraines de la Communauté Urbaine de Strasbourg. Il répertorie l'ensemble de points de suivi présents sur le territoire de la métropole, soit 236 points dont 160 points gérés par l'Eurométropole et 76 appartiennant aux réseaux qualité de l'Agence de l'eau (ADES : 0200000003), de l'APRONA

(ADES : 0200000015), de l'ARS pour les captages d'eau potable (ADES : 0000000028) et d'industriels (ADES : 0200000036). Les données du réseau de l'Eurométropole de Strasbourg sont accessibles et téléchargeables uniquement sur le site ADES producteur, nécessitant un identifiant. De plus, elles ne sont plus mises à jour depuis 2009 dans ADES. Les cartes des études de 2015, les fiches descriptives des points et les données de qualité sont diffusées par l'APRONA (www.aprona.net), notamment sur la partie cartographie dédiée à l'Eurométropole de Strasbourg (carto.aprona.net/ems).

Le réseau s'est arrêté en 2016, faute de financements et de cohésion entre les membres de l'observatoire pour définir de nouveaux objectifs. Certaines actions ont été reprises par l'APRONA, sur l'ensemble de la nappe alluviale de la plaine d'Alsace.



Localisation des points de suveillance des panaches de pollution (source : ANTEA, 2015)

Références :

AnteaGroup (2013) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2012. Rapports de synthèse.

AnteaGroup (2014) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2013. Rapports de synthèse.

AnteaGroup (2015 et 2016) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2015. Rapports de synthèse.

Burgeap (2011) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2010. Rapports de synthèse.

Burgeap (2012) – Communauté urbaine de Strasbourg. Observatoire de la nappe. Programme 2011. Rapports de synthèse.

www.aprona.net et carto.aprona.net/ems

France – Toulouse (118 km^2 et 0,48 millions d'habitants en 2017)

- **Objectif et synthèse des résultats**

Dans le cadre d'une convention passée entre le BRGM et la ville de Toulouse, le projet BISMUTH (Banque d'Information sur le sous-Sol en Milieu Urbain de Toulouse géologique et Hydrogéologique) a été mené entre 2007 et 2008, avec pour objectifs :

- la création d'une base de données géologiques et hydrogéologiques et des travaux du sol et du sous-sol ;
- la conception et la mise en place de réseaux d'observation de la nappe alluviale ;
- l'analyse des potentialités géothermiques très basse énergie ;
- la réalisation d'une modélisation géologique du sous-sol.

La banque de données BISMUTH permet l'accès des services techniques de la ville de Toulouse aux informations géologiques et hydrogéologiques. Le modèle en 3D permet de visualiser le sous-sol urbain, afin de prévoir les aménagements et de gérer l'impact des travaux de surface ou souterrain. Ce projet est une première étape dans la politique cohérente et durable de l'aménagement de l'espace urbain toulousain.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

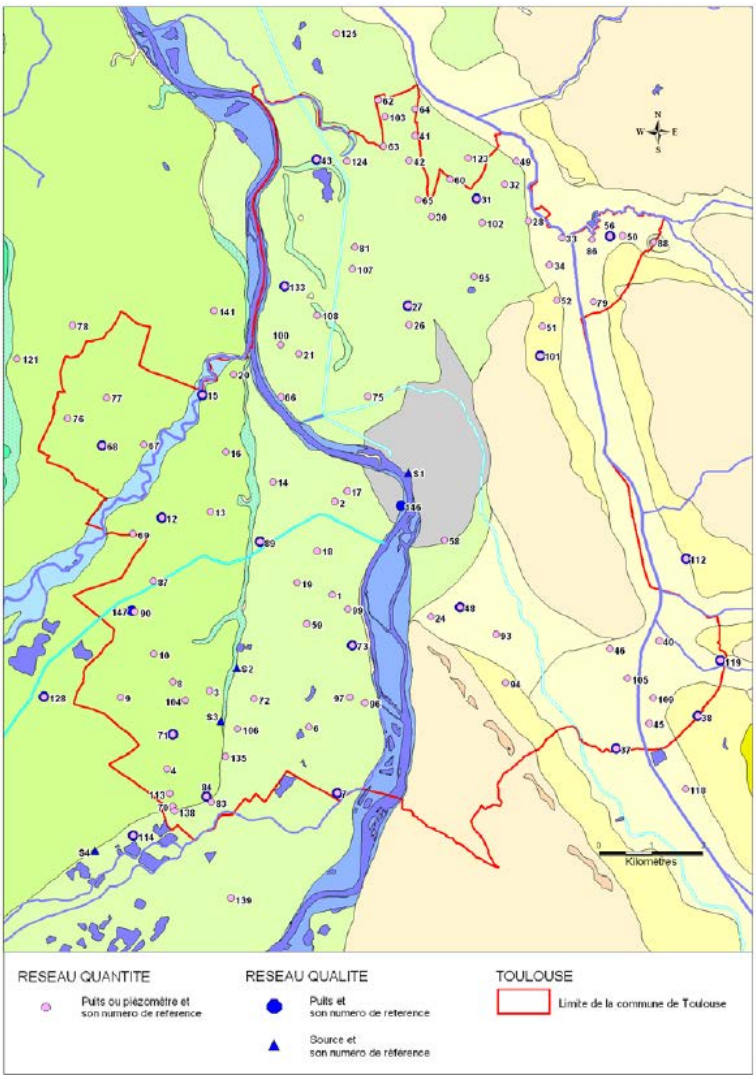
Le modèle géologique a été décliné en modèle hydrogéologique. Ce dernier a été utilisé pour définir l'implantation optimisée des réseaux quantitatif et qualitatif des eaux souterraines.

5 campagnes piézométriques ont été conduites entre 2007 et 2008 grâce à 101 points. Ces points ont été sectionnés à partir de la modélisation hydrogéologique et selon une répartition homogène. Les cartes piézométriques ont permis d'optimiser le réseau, afin de rendre compte au mieux des écoulements de la nappe alluviale. Le réseau quantité optimisé compte 55 points, dont une quinzaine pourrait être équipé de capteurs télétransmis.

Le réseau qualité a été élaboré à partir du modèle hydrogéologique. Les 29 points du réseau ont permis de réaliser deux campagnes de prélèvements en 2007 puis 2008. Ce réseau permet d'obtenir un état de la qualité des eaux souterraines, d'apprécier et d'anticiper l'impact des pressions anthropiques.

La gestion de ces 2 réseaux se fait à partir de la base de données BISMUTH. Cette base intègre les descriptifs des points, les résultats des mesures piézométriques et des analyses. Tous les résultats sont également basculés dans la base ADES : 0500000030 - RLESOUPTLS - Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines de l'agglomération toulousaine et 0500000031 - RLESOUQTLS - Réseau de suivi qualitatif des eaux souterraines de l'agglomération toulousaine. Les données sont accessibles librement et gratuitement.

A la fin du projet, en 2008, la gestion des réseaux de surveillance a été transmise à la ville de Toulouse. Les suivis réguliers n'ont cependant pas été poursuivis.



Carte des réseaux quantité et qualité en juin 2008 (source : Gandolfi J.M. et Bouroullec L., 2008)

Références :

Gandolfi J.M., Bouroullec L. avec la collaboration de Marty F., Porquet M. (2008) – BISMUTH. Banque d'Information sur le sous-Sol en Mulieu Urbain de Toulouse. Phase 2. BRGM/RP-56505-FR. Rapport final. 240 p., 49 ill., 14 ann.

Bouroullec Isabelle, Bouteloup Eric, Chardavoine Sabine, Gandolfi Jean-Marie, Roubichou Philippe (2009) - Gestion des données géologiques en milieu urbain. Géosciences n°10 : Villes et géologie urbaine, ed. BRGM, pp.72-79.

Allemagne - Berlin (892 km^2 et 3,75 millions d'habitants en 2019)

La gestion des eaux souterraines en Allemagne est décentralisée au sein des 16 lands. Chaque land dispose de son propre réseau de surveillance, permettant de répondre aux exigences des directives nationales et de la Directive Cadre sur l'Eau européenne (DCE). Le land coordonne les actions régionales de surveillance, gère et exploite les données afin de les remonter à l'Etat fédéral et diffuse les informations au public. Cependant, la gestion du réseau ainsi que les mesures et analyses sont très fréquemment délégués à des bureaux locaux. Ces bureaux peuvent être représentés par des villes et les réseaux sont alors modelés pour répondre aux problématiques locales.

- **Objectif et synthèse des résultats**

Les problématiques de la ville de Berlin sont multiples : inondation par remontée de nappes, panaches de pollutions industrielles, multiplication des installations géothermiques, salinité des nappes profondes (présence de formations gypseuses)... L'eau potable de la ville est en totalité prélevée dans la nappe au droit de la zone urbaine. En tant que land, la ville de Berlin a mis en place des réseaux de surveillance des eaux souterraines.

Le réseau qualité a été installé à partir de 1995 et comprend 250 points, analysés deux fois par an. Son objectif est de sécuriser l'eau potable, de protéger les écosystèmes tributaires des eaux souterraines et de gérer les ressources en eau afin d'éviter des conflits d'usage.

Le réseau quantité comporte 1020 points de mesure, équipés de capteurs enregistreurs. 29 ouvrages sont suivis depuis 1870. En 1937, plus de 2 000 points étaient suivis mais le réseau a été optimisé. Ces points captent les 5 niveaux aquifères mais la plupart d'entre eux (750) sont situés dans la nappe principale superficielle. Il permet notamment de réaliser des cartes piézométriques annuelles depuis 1953 et de déterminer les niveaux d'eau actuels et les plus élevés afin d'orienter les aménagements urbains.

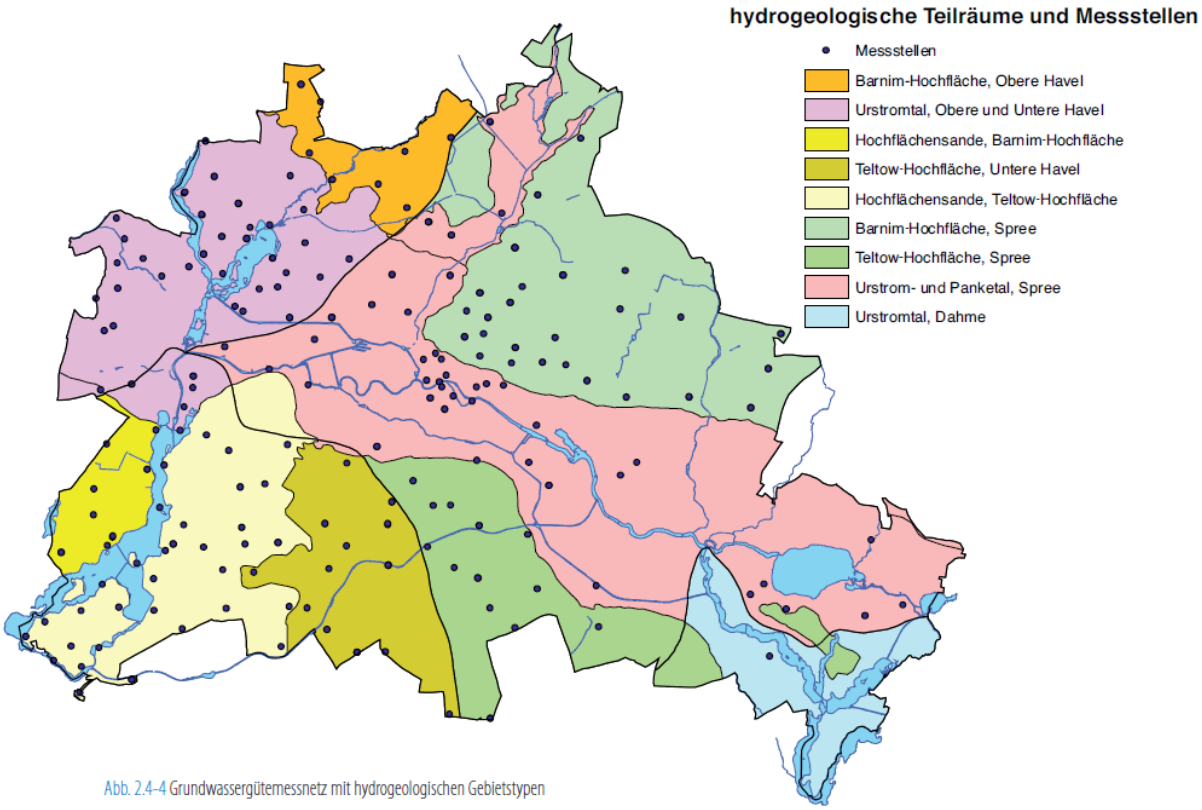
- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

La répartition des points de mesure est adaptée aux conditions hydrogéologiques et aux pressions anthropiques. Des critères d'impact sur les eaux souterraines ont été définis : protection des eaux souterraines, utilisation des sols… Les critères pertinents ont été combinés avec les bassins versants souterrains et regroupés en neuf « types de secteurs hydrogéologiques ». Les points de mesure représentatifs d'un secteur hydrogéologique ont ensuite été sélectionnés. A noter qu'en centre-ville, où les risques sont plus élevés et les aménagements plus nombreux, le réseau de mesure est plus dense que dans les zones périphériques. Les résultats de cette étude n'ont malheureusement pas été publiés.

Des campagnes de prélèvements sont organisées tous les 6 mois sur l'ensemble des points pour analyse des principaux paramètres. Pour les autres substances, des analyses sont effectuées uniquement sur certains points et tous les 2 ans sur l'ensemble du réseau. Enfin, concernant les substances à l'état de traces ou certains polluants, un cycle différent de prélèvements a été mis en place afin de réduire les coûts d'analyse tout en garantissant une bonne représentativité de la qualité de la nappe et de ses évolutions.

Le réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines a été successivement adapté depuis 1995. Régulièrement, une évaluation est réalisée sur les points et les paramètres suivis, afin de les adapter aux évolutions récentes.

L'ensemble des données et des cartes sur les eaux souterraines sont mises en ligne sur le site internet de la ville de Berlin sous forme de rapports, d'atlas environnemental et dans un espace cartographique (www.berlin.de). Certaines informations sont cependant payantes.



Réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines de Berlin, selon le secteur hydrogéologique (source : www.berlin.de, 2019)

Piézomètre de la ville de Berlin (source : www.berlin.de, 2019)

Références :

www.berlin.de/senuvk/umwelt/wasser/hydrogeo/index.shtml

Allemagne - Cologne (405 km² et 1,09 millions d'habitants en 2019)

La gestion des eaux souterraines en Allemagne est décentralisée au sein des 16 lands. Chaque land dispose de son propre réseau de surveillance, permettant de répondre aux exigences des directives nationales et de la Directive Cadre sur l'Eau européenne (DCE). Le land coordonne les actions régionales de surveillance, gère et exploite les données afin de les remonter à l'Etat fédéral et diffuse les informations au public. Cependant, la gestion du réseau ainsi que les mesures et analyses sont très fréquemment délégués à des bureaux locaux. Ces bureaux peuvent être représentés par des villes et les réseaux sont alors modelés pour répondre aux problématiques locales.

- **Objectif et synthèse des résultats**

La zone urbaine de Cologne, couvrant 405 km², représente la troisième plus grande ville d'Allemagne en termes de superficie. Elle est située dans le land Rhénanie du Nord Westphalie. La ville s'est construite principalement sur les terrasses alluviales du Rhin, datant du Tertiaire et du Quaternaire.

L'objectif principal du suivi des eaux souterraines mis en œuvre est de protéger la ressource en eau et, dans la mesure du possible, de détecter et d'éliminer les sources de pollutions. Les mesures régulières servent à déterminer la qualité, la profondeur et les directions d'écoulement des eaux souterraines et à déterminer les impacts des activités humaines.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Les différents services de l'Etat et acteurs de l'eau gèrent environ 3 500 points de mesure sur les eaux souterraines à l'échelle de la ville. Parmi ces ouvrages, environ 650 ouvrages appartiennent à la municipalité et font l'objet de relevés piézométriques dont 270 sont prélevés régulièrement pour des analyses physico-chimiques.

Piézomètre de la ville de Cologne (© Stadt Köln - source : www.stadt-koeln.de, 2019)

Références :

www.stadt-koeln.de/leben-in-koeln/umwelt-tiere/wasser-boden-altlasten/die-grundwasserueberwachung

Allemagne - Hambourg (755 km² et 1,84 millions d'habitants en 2018)

La gestion des eaux souterraines en Allemagne est décentralisée au sein des 16 lands. Chaque land dispose de son propre réseau de surveillance, permettant de répondre aux exigences des directives nationales et de la Directive Cadre sur l'Eau européenne (DCE). Le land coordonne les actions régionales de surveillance, gère et exploite les données afin de les remonter à l'Etat fédéral et diffuse les informations au public. Cependant, la gestion du réseau ainsi que les mesures et analyses sont très fréquemment délégués à des bureaux locaux. Ces bureaux peuvent être représentés par des villes et les réseaux sont alors modelés pour répondre aux problématiques locales.

- **Objectif et synthèse des résultats**

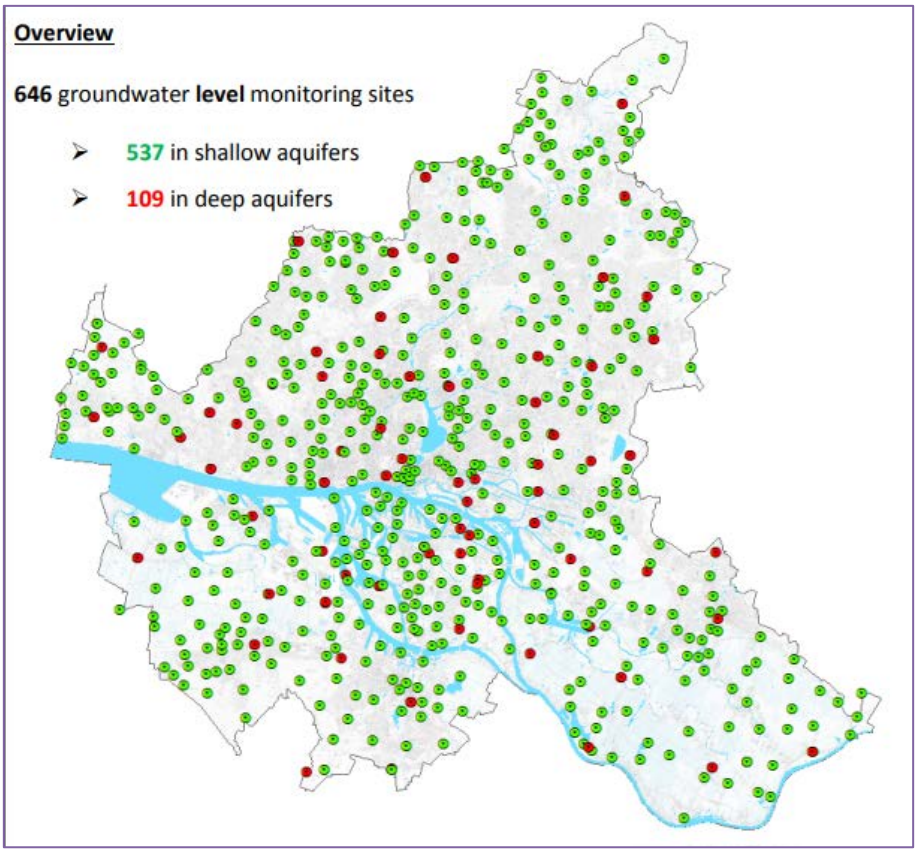
La ville de Hambourg, formant un land 755 km², est la deuxième plus grande de l'Allemagne. La ressource en eau potable de la ville d'Hambourg est en totalité issue des eaux souterraines. Cependant cette ressource est soumise à de nombreux risques de pollution : nitrates et pesticides (agriculture), sols contaminés, d'infiltrations d'eaux usées… particulièrement dans l'aquifère quaternaire superficiel. Des risques liés aux modifications de flux peuvent amener à une intrusion saline, du fait de la présence de formations géologiques salines profondes (gypse), et à des remontées de nappe. Les risques sur l'aquifère profond du Tertiaire sont plus limités.

La ville de Hambourg est considérée comme l'une des villes pionnière en matière de développement d'un réseau de surveillance. Un modèle géologique 3D ainsi qu'un modèle hydrogéologique ont été développés en intégrant les données des points d'observations et des eaux de surfaces ainsi que l'extension des formations salines (gypse) et des eaux souterraines salées. Le modèle hydrogéologique permet de réaliser des bilans de la qualité des eaux souterraines et de définir les niveaux et les écoulements mais également de répondre à de nombreuses problématiques de la ville : prévision des niveaux selon différents scénarios climatiques, évaluation de l'impact des nouveaux prélèvements, détermination de zones à protéger, alerte sur les intrusions salines, meilleure connaissance de la recharge et définition du potentiel d'infiltration, suivi des échanges entre la nappe et les eaux de surface…

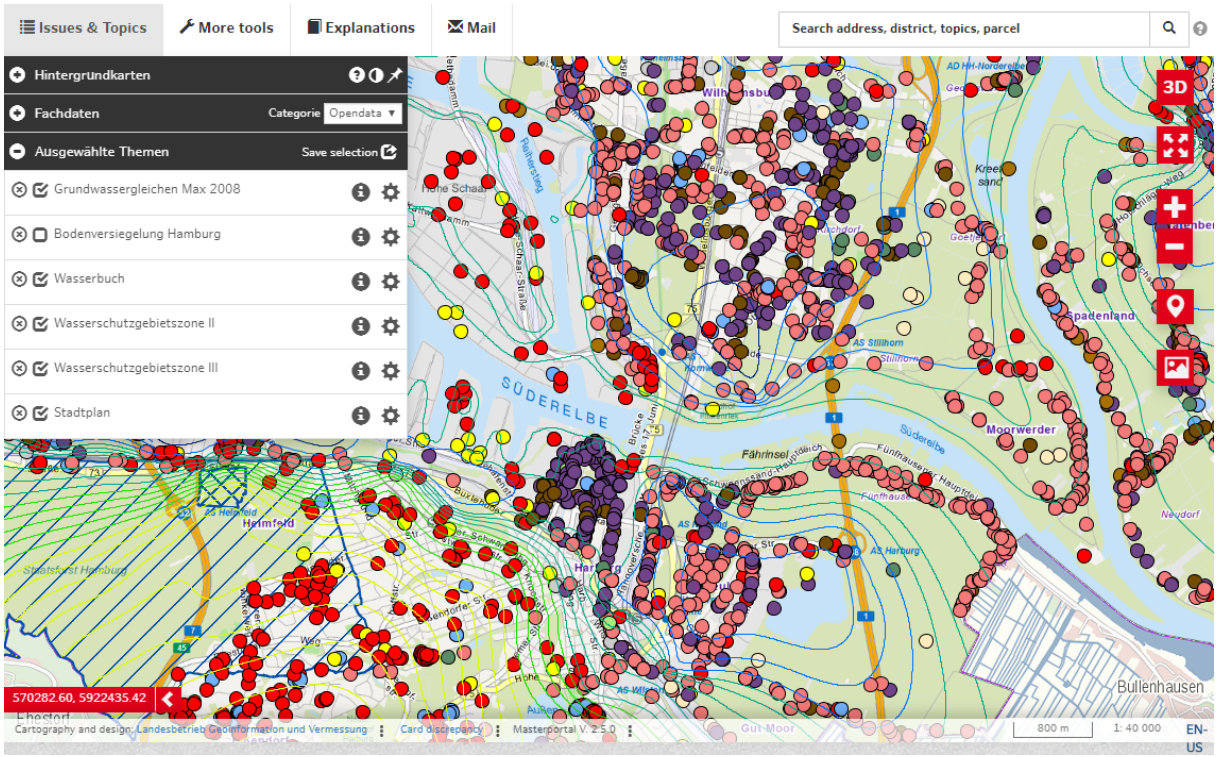
- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

La ville de Hambourg a construit son réseau en sélectionnant des points parmi un recensement de plus de 4 000 ouvrages faisant l'objet de suivis réguliers ou ponctuels. Ont été éliminés les ouvrages captant des formations imperméables, pour lesquels les coupes techniques et géologiques ne sont pas connues, dont les analyses ne sont pas de bonne qualité (donnée aberrante). La densité d'ouvrages doit garantir une distance de 500 m entre les ouvrages, afin d'obtenir un niveau de détail suffisant pour tracer des cartes piézométriques précises. Lors de la construction du réseau, plusieurs contraintes se sont présentées : un grand nombre d'opérateur, la qualité non connue des données… La construction de ce réseau a impliqué un travail long pour rencontrer et convaincre les propriétaires des ouvrages, signer des conventions d'accès et de partage des données puis entretenir de bonnes relations sur le long terme avec l'ensemble des propriétaires. Après cette optimisation, le réseau s'est retrouvé en 2013 composé de 646 piézomètres (543 dans l'aquifère superficiel et 112 dans l'aquifère profond) et 167 qualitomètres (99 dans l'aquifère superficiel et 68 dans l'aquifère profond).

Le site de la ville intègre un espace cartographique permettant de croiser les informations sur la géologie, les niveaux et les écoulements des nappes (cartes piézométriques), la qualité eaux, les eaux de surface, les secteurs sensibles et protégés (zone humide, captage d'eau potable et périmètre de protection…), l'occupation des sols… (geoportal-hamburg.de/geo-online/)



Réseau de suivi des eaux souterraines de Hambourg (source : Bonsor H.C. et al, 2015)



Site internet de diffusion des données de Hambourg (source : geoportal-hamburg.de/geo-online, 2019)

Références :

Bonsor H.C., Dahlqvist P., Moosmann L., Classen N., Eptng J., Huggenberger P., Alejandro Garcia-Gil, Janźa M., Laursen G., Stuurman R. and Gogu C.R. (2015) - Groundwater, Geothermal modelling and monitoring at city-scales. Identifying good practice, and effective knowledge exchange, COST Subsurface Action. Working Group 2, Britsh Geological Survey Open Report. 67 p.

Wiesner Sarah, Grongroft,Alexander, Ament Felix and Eschenbach Annette (2016) - Spatial and temporal variability of urban soil water dynamics observed by a soil monitoring network. Journal of Soils and Sediments, vol 16, n°11. p. 2523--2537.

www.hamburg.de/grundwasser

geoportal-hamburg.de/geo-online

Allemagne - Hanovre (204 km^2 et 0,53 millions d'habitants en 2016)

- **Objectif et synthèse des résultats**

Les problématiques de la ville de Hanovre se concentrent autour de la protection de l'eau potable, assurée à plus de 90 % par les eaux souterraines, de la présence d'eaux salées (gypse)…

Depuis 2003, Hanovre dispose de 73 ouvrages, répartis dans toute la ville. Des prélèvements sont effectués en hautes et en basses eaux, afin de caractériser le fond géochimique, de détecter des pollutions et de mettre en œuvre une gestion des eaux contaminées. Tous les puits analysés montrent des intrants diffus provenant du transport, de l'agriculture et des fuites des réseaux d'assainissement, mais aussi des anciennes décharges ou de pollutions accidentelles. A noter que le réseau DCE (Directive Cadre sur l'Eau européenne) recense seulement 14 points sur la ville.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau a été installé afin de couvrir l'ensemble du territoire. Les points existants ont été privilégiés même si quelques piézomètres ont dû être forés. Les prélèvements, en hautes et en basses eaux chaque année, permettent d'effectuer des analyses sur les métaux, solvants, agents de surface, pesticides, médicaments, perturbateurs endocriniens… Certaines substances ne sont analysées que ponctuellement. Il est prévu d'optimiser le réseau, et notamment les paramètres à suivre, selon les chroniques à long terme. Les informations de ce réseau sont disponibles sur demandes, gratuitement oralement mais payantes sous format numérique.

La surveillance physico-chimique est complétée par une surveillance biologique. Cette surveillance de la faune représente un système d'alerte précoce permettant de détecter des changements environnementaux liés aux eaux souterraines. Afin d'obtenir un aperçu de la faune des eaux souterraines de Hanovre, un bilan initial a été établi en 2017 au droit de 49 ouvrages. Dans la partie nord de la ville, les teneurs en oxygène sont souvent trop faibles pour permettre un développement des animaux : la population est peu nombreuse et composée de très petits animaux, typiques de la plaine d'Allemagne du nord. Au sud de la ville, la faune des eaux souterraines est considérée comme très riche en espèces et en individus. Certains de ces animaux, comme l'écrevisse, ne se retrouvent habituellement qu'au sud de l'Allemagne.

L'objectif à long terme de ces investigations est de concevoir un réseau de mesure pour la surveillance biologique des eaux souterraines et, si possible, de le compléter par une surveillance chimique. Les organismes vivant dans les eaux souterraines sont exposés aux substances dissoutes dans l'eau et leurs réactions fournissent des informations sur la qualité de l'eau. En fonction des changements du nombre d'espèces et/ou du nombre d'individus, il peut être déterminé si la qualité des eaux souterraines se modifie. En revanche, seules certaines substances peuvent être testées par des analyses chimiques.

Références :

Schulz Ingrid, Weitzel Ingrid, Pelzer Guido, Riedel Thomas (2018) -Landeshauptstadt Hannover. Das Grundmessnetz Hannover. Kommunales Grundwassermonitoring. Schriftenreihe kommunaler Umweltschutz Heft 55. 40p

www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Umwelt-Nachhaltigkeit/Wasser-Abwasser/Grundwasser/Grundwassermonitoring

Espagne – Barcelone (100 km^2 et 1,64 millions d'habitants en 2019)

- **Objectif et synthèse des résultats**

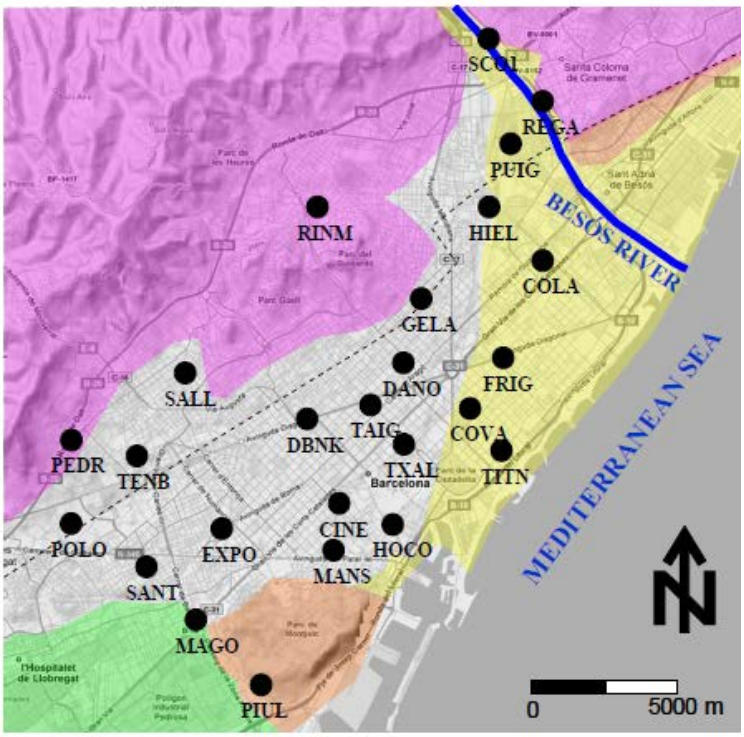
Depuis le milieu du XIXème siècle, les pompages se sont intensifiés dans les nappes littorales de Barcelone, provoquant des rabattements importants et une migration du biseau salé. Depuis les années 1970, la relocalisation de nombreuses industries hors de la ville a provoqué une réduction des pompages et une remontée des niveaux. Ce phénomène de rebond phréatique présente un risque d'inondation par remontée de nappe mais également des problèmes d'infiltration dans plusieurs ouvrages souterrains engendrant un coût économique important. Enfin, depuis 2008, la région a connu plusieurs épisodes de sécheresse, amenant la ville à établir un plan de gestion des ressources en eau.

L'objectif premier du réseau de surveillance est de prévenir les remontées de nappes et de gérer les eaux souterraines. Tous les 5 ans, un bilan est réalisé sur l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines, afin d'optimiser les usages de l'eau dans la ville (quantité, qualité et répartition spatiale des prélèvements). Dans ce cadre, un modèle géologique et hydrogéologique a été construit, intégrant les aménagements souterrains et l'ensemble des données géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Les points de mesures ont également servi lors d'études ponctuelles à cartographier l'évolution du biseau salé, à déterminer les zones de recharge des nappes quaternaires et à réaliser des bilans sur la qualité des eaux souterraines et notamment sur les molécules émergeantes, les produits pharmaceutiques, les drogues et leurs métabolites.

Concernant l'étude sur la recharge des nappes superficielles, l'analyse de traceurs (strontium, deutérium et oxygène 18) et autres substances (notamment halogène) suggère que les principaux contributeurs à la recharge totale sont les pertes dans le réseau d'approvisionnement en eau (22%), les pertes dans le réseau d'eaux usées (30%), les précipitations au droit des zones non urbanisées, les infiltrations des eaux de ruissellement (20%) et de la rivière Bes`os (11%). Une des limites rencontrées dans l'étude a été l'incapacité à évaluer les volumes d'eau provenant du réseau d'assainissement, représentant une part non négligeable de la recharge en milieu urbain. En effet, le réseau de mesure n'est pas suffisamment dense pour pouvoir localiser précisement ces fuites.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau d'observation comporte 30 points de mesure, répartis dans toute la ville. Ils sont principalement implantés dans les aquifères quaternaires, en zone urbaine dense et proche du littoral. Ils font l'objet de mesures piézométriques et de prélèvements d'échantillons d'eau pour une analyse périodique de la qualité.



	Holocene	Quaternary	Sands, gravels, silt, clays	Llobregat Delta
	Holocene		Sands, gravels, silt, clays	Besós Delta
	Pleistocene		Carbonated clays	Barcelona Plain
	Tertiary		Marls, sands, sandstones	Barcelona Plain
	Paleozoic		Shale and granites	Collserola Range

Piézomètres utilisés pour déterminer la recharge des nappes (les pointillés représentent les limites entre les formations paléozoïques et tertiaires et les points de mesure sont en noir) (source : Vazquez-Suné E. et al., 2010)

Références :

Jurado Anna (2013) – Occurrence and fate of emerging contaminants un urban groundwater. A case study : Barcelona. PhD Thesis. 166 p.

Vazquez-Suné E., Carrera J., Tubau I., Sanchez-Vila X. and Soler A. (2010) - An approach to identify urban groundwater recharge. Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, pp2085-2097.

Espagne – Saragosse (974 km² et 0,67 millions d'habitants en 2019)

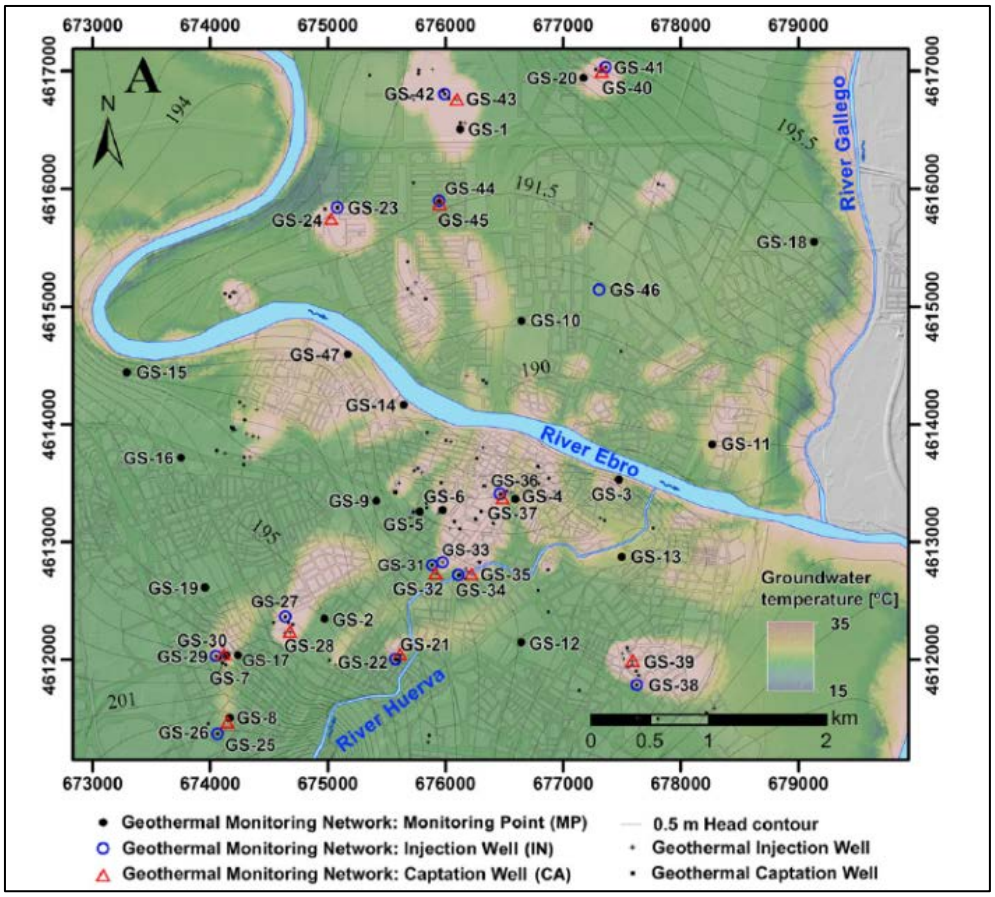
- **Objectif et synthèse des résultats**

Le réseau de surveillance a été mise en place lors d'une étude ponctuelle pour étudier l'impact des forages géothermiques sur la qualité de la nappe alluviale de Saragosse, notamment sur les métaux lourds et les éléments traces associés. L'étude ne concerne que le centre de Saragosse, soit environ 35 km² et l'aquifère alluvial, dont la profondeur est estimée entre 5 à 60 m.

La relation entre la température et les concentrations en métaux lourds a été établie par une approche statistique de mesures réalisées durant plusieurs campagnes de mesures. Les résultats ont montré que la température n'était pas corrélée aux concentrations d'éléments traces. De ce fait, la variation de la température ne serait pas un facteur participant aux variations de teneurs en métaux lourds. En revanche, les modifications des paramètres pH, potentiel redox, conductivité électrique, oxygène dissous et alcalinité seraient susceptibles d'impacter les teneurs en métaux lourds. Ces travaux mettent en avant la nécessité de garantir un espace annulaire étroit dans les forages exploités, afin de préserver les paramètres physico-chimiques naturels des eaux souterraines et de limiter les contaminations.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

47 forages géothermiques de prélèvement ou d'injection ont été sélectionnés. De mars 2011 à mars 2013, 12 campagnes ont permis de prélever 382 échantillons, avec des analyses tous les deux mois sur les cations et anions majeurs et tous les 4 mois sur les éléments traces.



Carte des points de mesures (source : García-Gil Alejandro et al, 2016)

Références :

García-Gil Alejandro, Epting Jannis, Garrido Eduardo, Vázquez-Suñé Enric, Lázaro Jesús Mateo, Sánchez Navarro José Ángel, Huggenberger P., Marazuela Calvo Miguel Ángel (2016) - A city scale study on the effects of intensive groundwater heat pump systems on heavy metal contents in groundwater. 12p.

Hongrie – Szeged (281 km² et 0,16 millions d'habitants en 2019)

- **Objectif et synthèse des résultats**

Szeged, troisième plus grande ville de Hongrie, est située dans le sud-est du pays. Les dépôts fluviatiles du Pléistocène et de l'Holocène sont présents sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Suite à une inondation de grande ampleur en 1879, le sol de la ville a été surélevée (6 m en centre-ville). Ces apports anthropiques et les activités humaines ont été modifiés les propriétés des sols et influencés la qualité de la nappe superficielle.

Depuis 2000, les niveaux des eaux souterraines sont suivis au droit de la ville de Szeged et 16 points ont été équipés d'enregistreurs en 2012. Dans le cadre d'une étude complexe, 28 points ont permis l'analyse, entre 2010 et 2012, de 12 composants inorganiques et d'autres paramètres physico-chimiques. Les objectifs du suivi sont d'étudier les relations entre les rivières et les eaux souterraines, d'étudier le fond géochimique, de dresser un bilan de la qualité des eaux souterraines et rechercher les sources potentielles de contamination, de classer les puits d'échantillonnage en fonction de leur qualité et d'évaluer les relations entre la qualité et les niveaux des eaux souterraines en fonction de l'hydrogéologie et des activités humaines.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau de surveillance de la nappe quaternaire a été mis en place entre 1975 et 1984. Aucune information n'a été retrouvée sur le nombre total de points suivis et les objectifs du réseau. Depuis 2000, 30 points permettent le suivi des niveaux de la nappe superficielle et 16 d'entre eux ont été équipés d'enregistreurs en 2012. Durant l'étude de 2010 à 2012, 28 points captant la nappe superficielle ont été prélevés pour des analyses.

Réseau de surveillance en 2012 (source : Farsang Andrea et al., 2017)

Références :

Farsang Andrea, Fejes Ildikó and Tóth Tivadar M. (2017) - Integrated evaluation of urban groundwater hydrogeochemistry in context of fractal behaviour of groundwater level fluctuations. Hydrological Sciences Journal, 62:8. pp1216-1229.

Italie – Milan (182 km^2 et 1,37 millions d'habitants en 2016)

- **Objectif et synthèse des résultats**

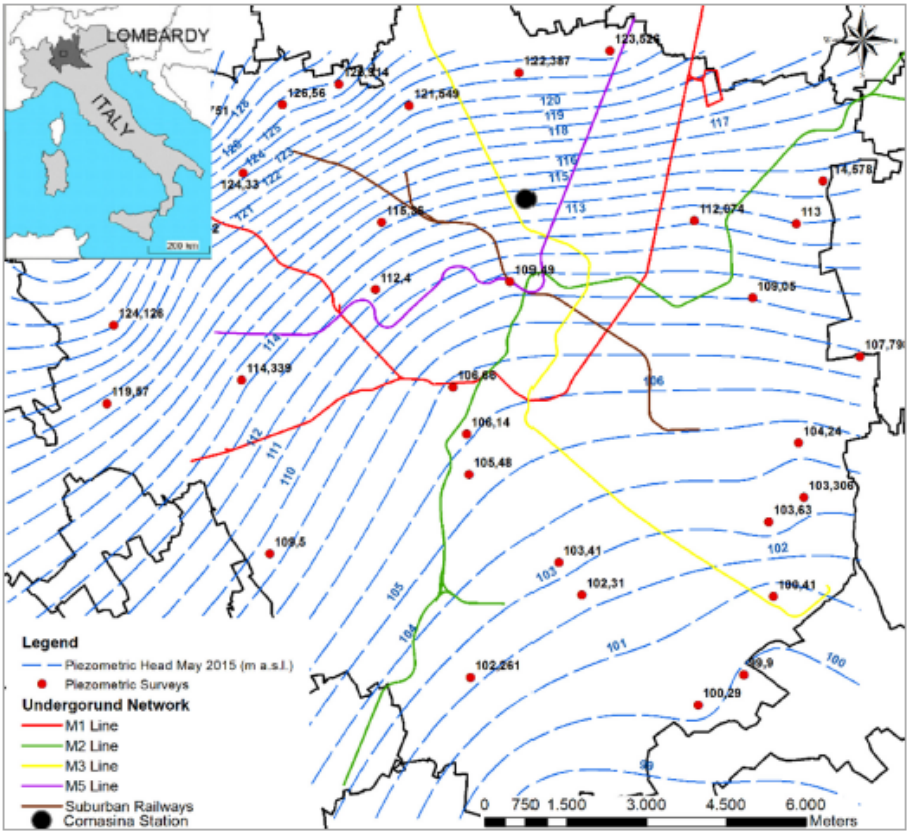
Sur la plaine du Pô, les niveaux de la nappe superficielle sont passés de 1 m de profondeur en 1915 à un record de 40 m de profondeur en 1970 mettant en cause une surexploitation des eaux souterraines. Depuis les années 1980, les volumes prélevés ont diminué, notamment pour l'irrigation. L'occupation des sols de la ville de Milan est fortement modifiée par l'urbanisation (parking, infrastructures…). Les industriels ont été délocalisés en périphérie de la ville et 48% des puits privés ont été fermés en l'espace de 5 ans. Depuis 1993, le niveau a augmenté causant de nombreuses inondations, du fait d'un phénomène de rebond phréatique.

L'objectif du réseau de surveillance, mis en place dès 1975, est de suivre les variations piézométriques et d'anticiper les inondations par remontée de nappe.

Un modèle géologique et hydrogéologique a été construit sur la province de Milan (1 989 km² et 189 communes), où 71% de l'occupation des sols est agricole, et affiné sur la ville de Milan. Le modèle affiné intègre les infrastructures souterraines (tunnels et stations de métro, fondations profondes…) qui affectent localement le niveau des eaux souterraines. Les résultats de la modélisation ont mis en évidence une augmentation locale du niveau des eaux souterraines d'environ 10-15 cm sur de larges zones situées à proximité des intersections des tunnels. Cet effet se surimpose à la remontée régionale des niveaux de la nappe superficielle. Par conséquent, ces faibles remontées peuvent avoir un effet négatif sur les structures et les bâtiments souterrains.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau de suivi est composé de 32 points dont les niveaux piézométriques sont relevés mensuellement depuis 1975. A partir de 2016, 15 points ont été équipés d'enregistreurs, prenant une mesure du niveau d'eau toutes les 15 minutes. Des mesures de la température sont également effectuées tous les mois sur ces points. Les piézomètres équipés ont été choisis en fonction de leur localisation, de leur profondeur, de leur protection et de l'état de leur équipement (tubage et crépine).



Localisation des points de surveillance et carte piézométrique (source: Colombo L. et al., 2017)

Références :

Bonomi T. and Ellis B. (1999) – Groundwater level evolution in the Milan area: natural and human issues. Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality. Birmingham, United Kingdom, International Association of Hydrological Sciences. 8 p.

Colombo L., Gattinoni P. and Scesi L. (2017) – Influence of underground structures and infrastructures ont the groundwater level in the urban area of Milan, Italy. Int. J. Sus. Dev. Plann. Vol. 12, No. 1. pp176–184

Roumanie – Bucarest (228 km² et 1,88 millions d'habitants en 2011)

- **Objectifs et synthèse des résultats**

La ville de Bucarest est confrontée à deux problématiques principales liées à l'impact des aménagements urbains sur l'écoulement des eaux souterraines. Tout d'abord, la rivière canalisée Dambovita crée une barrière hydraulique engendrant une remontée des niveaux piézométriques. Ensuite, l'infiltration des eaux souterraines dans les collecteurs des eaux usées augmente les débits des eaux à traiter. Cependant, la remise en état des réseaux entraine une augmentation des niveaux piézométriques. Grâce aux 140 points de surveillance, un modèle hydrogéologique a été développé à partir de 2010 et a permis d'étudier les phénomènes de recharge spécifique au milieu urbain, l'impact des infrastructures et les phénomènes de barrière hydraulique et les écoulements préférentiels.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau de surveillance (BGMS, Bucharest Groundwater Monitoring System) est constitué de 140 piézomètres captant l'aquifère Colentina (4 à 25 m de profondeur) et l'aquifère Mostistea (20 à 50 m de profondeur). La nappe profonde n'est pas suivie. Ces ouvrages font l'objet de mesures piézométriques régulières et, lors d'études spécifiques, de prélèvements pour analyses.

Localisation des ouvrages sur la ville de Bucarest (source : Gaitanaru Dragos et al, 2015)

<u>Références :</u>

Boukhemacha Mohamed Amine, Radu Gogu Constantin, Serpescu Irina, Gaitanaru Dragos and Bica Ioan (2015) - A hydrogeological conceptual approach to study urban groundwater flow in Bucharest city, Romania. Hydrogeology Journal, 2015, vol 23, n°3, pp437--450.

Gaitanaru Dragos, Gogu Constantin Radu, Boukhemacha Mohamed Amine, Serpescu Irina, Litescu Livio, Zaharia Valentin, Moldovan Alexandru and Mihailovici Madalin J. (2017) – Urban hydrogeology studies in Bucharest City, Romania. Urban Subsurface Planning and Management Week, SUB-URBAN 2017, 13-16 March 2017. 8 p.

Royaume-Uni – Doncaster (6,3 km² et 0,11 millions d'habitants en 2011)

- **Objectifs et synthèse des résultats**

La ville de Doncaster a développé un réseau de surveillance sur le centre-ville (6,3 km²) afin d'estimer la part de la recharge de la nappe provenant de fuites de réseaux. Les fuites des collecteurs d'eaux usées constituent une source de pollution notamment pour l'eau potable. Les piézomètres ont été installés en 2003 à différentes profondeurs dans un aquifère gréseux.

Une étude conduite en 2008 a permis d'interpréter les résultats. L'approche utilise un concept de bilan de masse par géochimie pour déterminer les volumes issus des pertes des réseaux. L'analyse statistique montre que le sodium, le potassium, puis le chlorure et l'alcalinité sont les traceurs les plus pertinents pour l'estimation des fuites de réseau. La recharge de l'aquifère a pu être estimée à 150-200 mm/an dont 28 mm proviennent des eaux usées, 12 mm du réseau d'eau pluvial et 22 mm du réseau d'eau potable. 10% des volumes annuels des eaux usées participent à la recharge de l'aquifère ce qui représente 30 à 40% de la recharge artificielle urbaine.

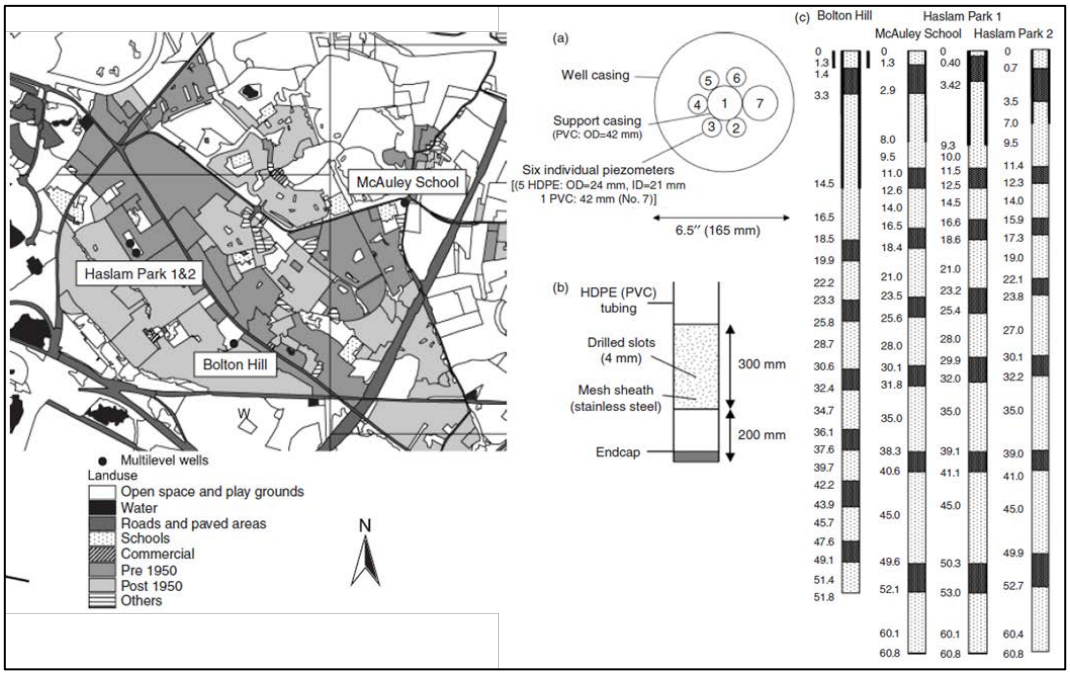
L'étude met en évidence l'utilité d'un réseau de mesure en zone urbaine et démontre l'importance d'un échantillonnage à différentes profondeurs, pour évaluer les volumes d'eau infiltrés. Les piézomètres multiniveaux permettent d'identifier et d'interpréter la stratification en profondeur dans le bilan de masse.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau de mesures de la qualité des eaux souterraines a été mis en place en 2003 spécifiquement pour le suivi des fuites de réseaux d'eaux usées. Il est volontairement minimaliste et se compose de 4 piézomètres sur 6,3 km².

Les profondeurs totales de points de surveillance (52 à 61 m) correspondent aux niveaux supérieurs crépinés des captages d'eau potable (de 30-60 m de profondeur et jusqu'à 140-170 m). L'équipement des ouvrages permet un échantillonnage à 6 profondeurs différentes, afin de rendre compte d'une éventuelle stratification des polluants. De petits piézomètres ont été installés dans les 4 forages après un pompage d'essai, servant à déterminer la conductivité hydraulique et à éviter les échanges verticaux. Les 6 petits piézomètres sont crépinés sur 30 cm, 20 cm au-dessus d'un bouchon hermétique. L'étanchéité entre les différents petits piézomètres est garantie par une épaisseur de 3 m de bentonite.

Les 4 points de surveillance sont localisés afin de pouvoir détecter des contaminants issus du centre historique et industriel de la banlieue de Bessacarr–Cantley.



Localisation des piézomètres, équipement et coupe schématique des 4 ouvrages (source : Rueedi J. et al, 2005)

Références :

Rueedi J., Cronin A.A. and Morris B.L. (2008) - Estimation of sewer leakage to urban groundwater using depth-specific hydrochemistry. Water and Environment Journal, 23, pp134-144.

Royaume-Uni – Glasgow (176 km² et 0,61 millions d'habitants en 2015)

- **Objectifs et synthèse des résultats**

Les principaux objectifs du réseau de surveillance sont d'acquérir des connaissances sur les eaux souterraines et de comprendre les effets des aménagements, en particulier des systèmes de drainage, sur les eaux souterraines. La ville de Glasgow rencontre de nombreuses autres problématiques : la gestion les eaux souterraines afin de respecter les exigences réglementaires, l'impact des sites et sols pollués sur la qualité des eaux, l'impact des prélèvements et des forages géothermiques, le rôle des eaux souterraines dans les inondations. A long terme, les données de surveillance des eaux souterraines pour élaborer un modèle conceptuel amélioré du système des eaux souterraines peu profondes dans le centre et l'est de Glasgow.

Un premier réseau de surveillance est géré entre 2004 et 2009 par la ville de Glasgow sur le centre urbain. En 2010-2011, le BGS (British Geological Survey) a lancé un projet visant à développer un réseau de surveillance et à définir des protocoles de suivi.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Lors de son étude de 2010-2011, le BGS a formulé des recommandations pour la mise en place d'un réseau de surveillance sur la nappe superficielle. Le réseau de surveillance a été développé dans un premier temps sur un secteur pilote. La zone réhabilitée de Clyde Gateway a été sélectionnée : d'une superficie de 8,40 km², elle se situe à l'extrémité est de Glasgow et à Rutherglen. En raison des coûts plus élevés des prélèvements et des analyses par rapport aux mesures de niveaux piézométriques, l'objectif principal du réseau pilote est de surveiller les niveaux des eaux souterraines. Des campagnes de qualité seront possibles ponctuellement.

Le réseau de surveillance s'appuie sur des points existants. 300 points de surveillance ont été identifiés sur Glasgow, avec des chroniques de 1 à 5 ans. Ces ouvrages ont été mis en place pour le suivi de sites industriels et de sites pollués, de travaux en cours (autoroute), d'actions de réhabilitations de sites... Un petit nombre d'ouvrages sont surveillés par la ville de Glasgow depuis 2004.

Le réseau doit comprendre un nombre suffisant de points, avec une répartition et une profondeur appropriées pour permettre une représentation des différentes unités géologiques (dans l'espace et en profondeur) et de l'ensemble de la zone d'étude. Le BGS a défini plusieurs critères pour sélectionner des points de surveillance pertinents :

- présence d'une coupe géologique, permettant de connaître la profondeur de l'ouvrage, les niveaux géologiques rencontrés et l'altitude du sol ;
- présence d'une coupe technique permettant de déterminer précisément le niveau aquifère capté (niveaux crépines) ;
- pérennité du point (au moins 2 ans) ;
- profondeur supérieure à 3 m, sans assec connu ;
- absence de fluctuations importantes du niveau des eaux souterraines dans le temps (absence d'influence de prélèvements).

Les travaux de recensement et de collecte des informations ont soulevé un certain nombre de questions sur les points gérés par différents organismes et sur les données associées : pérennité et répartition des points, efficacité de la collecte auprès de l'ensemble des partenaires, qualité des données collectées, saisie des données dans une base de données de surveillance... Ces constats auront un impact sur le fonctionnement efficace et l'utilité d'un réseau de surveillance des eaux souterraines.

Le BGS recommande que le site pilote de 8,40 km^2 comprenne 12 points équipés d'un enregistreur dont 2 permettent également le suivi de la conductivité. Ces points sont complétés par la collecte régulière des données de points existants auprès de leur gestionnaire. L'ensemble des données sur les niveaux et la qualité des eaux souterraines, collectées en 2010-2011, ont été interprétées pour établir une première liste de 15 points pertinents. Cette liste pourra être révisée avec l'acquisition de connaissances sur des points existants, sur de nouveaux points et avec la révision du modèle géologique de Glasgow.

Références :

Bonsor H.C., Bricker S.H., Dochartaigh B.E.O. and Lawrie K.I.G. (2010) - Project progress report 2010-11. Groundwater monitoring in urban areas: a pilot study in Glasgow, UK. British Geological Survey. 59 p.

Royaume-Uni – Londres (1572 km^2 et 8,91 millions d'habitants en 2018)

- **Objectif et synthèse des résultats**

La nappe de la craie et des sables sus-jacents, située sous la ville de Londres, observe des niveaux naturels vers 35 m de profondeur. Cette nappe a été fortement sollicitée à partir de la fin du XIXème siècle, créant une importante dépression atteignant 100 m de profondeur en 1960 (88 m sous le niveau de la mer), soit une baisse de 65 m. Les prélèvements ont diminué après la seconde guerre mondiale, les rendements n'étant plus suffisant et l'eau potable étant pompée en rivière. A partir de 1965, la nappe est remontée rapidement, jusqu'à 3 m/an au centre du bassin. L'augmentation des niveaux présente un risque d'inondation des infrastructures souterraines (tunnels et sous-sol profonds). De plus, la nappe est majoritairement captive sous une couche d'argile, faisant jusqu'à 80 m d'épaisseur et les niveaux sont alors redevenus artésiens. La saturation lente des argiles modifie leurs propriétés géotechniques et menace les fondations profondes et les tunnels présents dans le niveau argileux.

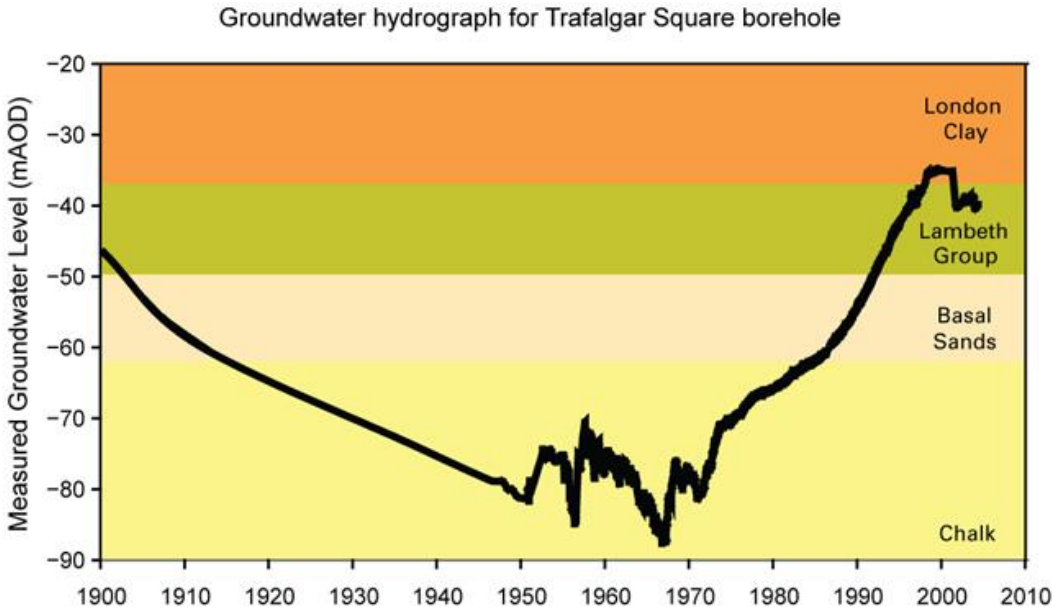
Des plans d'action ont été élaborés dès 1998. Cette stratégie dite de GARDIT (General Aquifer Research Development and Investigation Team) a pour objectif d'augmenter les volumes prélevés en nappe, pour un usage public ou privé, et de maîtriser ainsi les remontées des niveaux. Un modèle hydrogéologique a été développé pour fournir un outil d'aide à la décision dans le cadre de la mise en œuvre de la stratégie GARDIT. Son objectif était d'améliorer la compréhension de l'aquifère, d'évaluer les volumes à prélever selon les secteurs et de gérer les prélèvements actuels.

L'Agence environnementale est en charge de la surveillance des niveaux piézométriques. Le réseau de suivi permet de réaliser d'actualiser le modèle hydrogéologique et de vérifier que la stratégie GARDIT fonctionne.

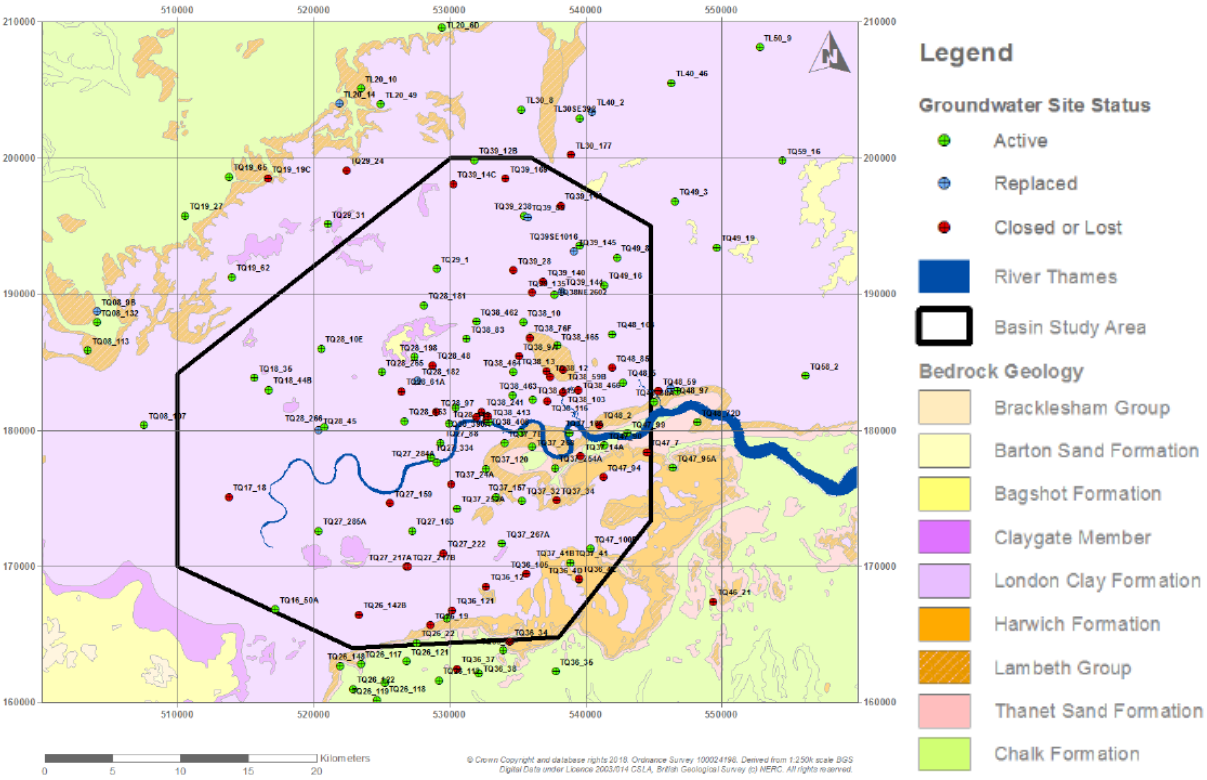
- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau de surveillance était composé de 200 points d'observations au début des années 2000 et de 86 points en 2018. Plusieurs forages d'observation de longue date ont été perdus dans le centre de Londres et l'Agence environnementale a des difficultés à les remplacer. Certains points de mesure sont suivis par d'autres organismes, en particulier par les compagnies de distribution de l'eau potable. La disponibilité de ces données peut être compromise par des modifications des réseaux de surveillance et par la destruction des points.

Les points de mesures sont sélectionnés afin d'obtenir une répartition spatiale homogène. Les points possédant des longues chroniques, avec des données de bonne qualité, sont choisis comme référence pour évaluer la tendance à long terme du niveau des eaux souterraines.



Evolution du niveau piézométrique de 1900 à 2007 à Trafalgar square (0 = niveau de la mer), avec la mise en place du GARDIT en 2000 (source : www.groundwateruk.org, 2019)



Localisation des points de suivi du bassin de Londres en 2018 (source : Environment Agency, 2018)

Références :

Environment Agency (2018) – Management of the London Basin Chalk Aquifer. Status Report 2018. 32p.

www.groundwateruk.org/Rising_Groundwater_in_Central_London.aspx

Slovénie – Ljubljana (275 km² et 0,29 millions d'habitants en 2019)

- **Objectifs et synthèse des résultats**

En 2004, des concentrations en trichloréthylène (TCE) importantes, de l'ordre de 740 µg/l, ont été retrouvé dans un puits situé dans le périmètre de protection d'un champ captant de Ljubljana. Au droit de la ville, le nombre de sources de pollutions potentielles est important, la nappe alluviale est particulièrement vulnérable et les écoulements des eaux souterraines sont rapides.

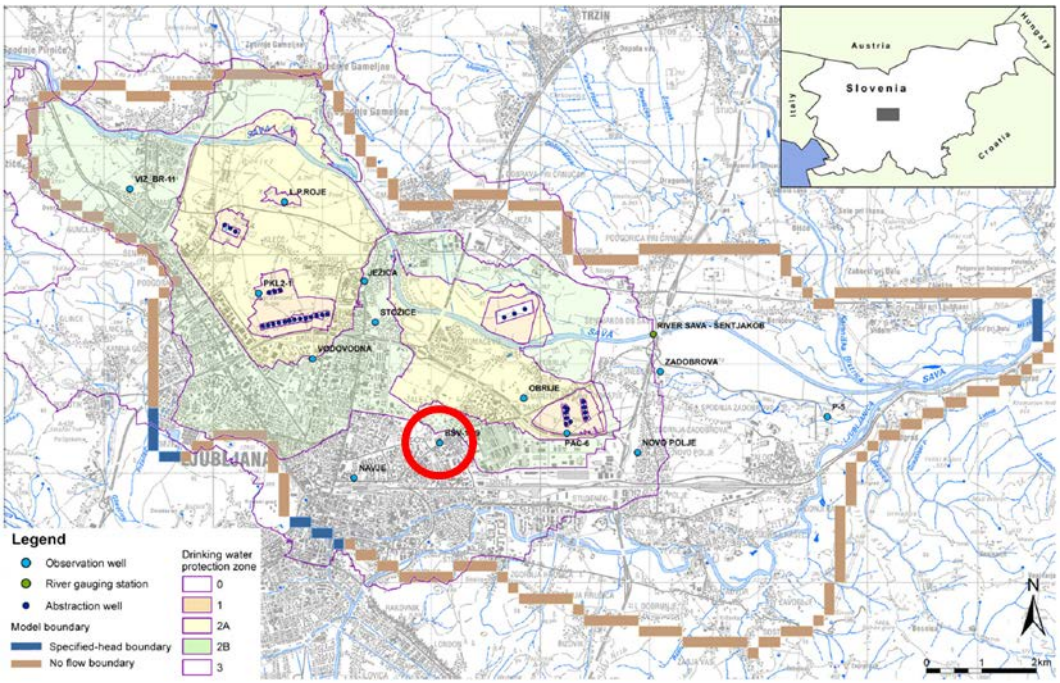
Suite à ce risque avéré de pollution des captages d'eau potable, la ville a souhaité mettre en place un réseau de surveillance de la qualité des eaux. Le réseau de surveillance a été installé sur 29 points captant la nappe alluviale profonde d'environ 4 à 30 m.

Ce réseau a été utilisé pour établir un modèle hydrodynamique permettant de localiser les panaches de polluants, d'évaluer leur propagation et de faciliter la prise de décision pour la gestion efficace des aquifères contaminés. Le modèle a permis de démontrer que la pollution en TCE avait été causée par un accident en surface. Le panache de pollution a été délimité sur une emprise de 3,5 km de long et 500 m de large et se déplace rapidement vers le sud du champ captants. Le forage d'eau potable situé au sud a mesuré des concentrations égales à légèrement supérieures à 10 µg/L de TCE (norme de potabilité).

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

29 piézomètres ont été installés pour surveiller les concentrations en TCE et localiser la source de pollution puis pour surveiller la qualité générale de la nappe alluviale.

Le panache de pollution en TCE se déplace rapidement. Ce constat montre la nécessité d'avoir un réseau de surveillance et d'alerte suffisamment dense et de ne pas mettre en œuvre des études dans l'urgence lorsque la santé publique est menacée.



Zone d'étude avec le piézomètre (cercle rouge) où le TCE a été mesuré à 740 µg/l (Janža Mitja, 2015)

Références :

Janza Mitja (2015) - A decision support system for emergency response to groundwater resource pollution in an urban area (Ljubljana, Slovenia). Geological survey of Slovenia. Environmental Earth Sciences, 2015, vol. 73, n°7, pp3763—3774

www.life-income.si

Suède – Göteborg (448 km^2 et 0,58 millions d'habitants en 2018)

- **Objectif et synthèse des résultats**

Le substratum de Göteborg est constitué de gneiss, recouvert en vallée d'une épaisse couche argileuse de 50 à 100 m d'épaisseur. Trois systèmes aquifères sont présents sous Göteborg : la nappe superficielle contenue dans les remblais (1 à 7 m), la nappe inférieure du niveau sableux situé entre le substratum rocheux et les argiles et la nappe profonde des gneiss.

La nappe inférieure se retrouve captive sous une épaisse couche d'argile. Dans le centre de Göteborg, l'exploitation de cette nappe captive a engendré une dépression maximale dans les années 1970. Les niveaux des eaux souterraines sont ensuite remontés. La fluctuation des niveaux de la nappe captive et les saturations et désaturations successives des couches argileuses provoquent un tassement des sols et, par conséquent, de graves dommages sur les bâtiments, les infrastructures et les conduites d'eau. Une analyse entre niveaux piézométriques et épaisseur d'argile montre que les secteurs fortement impactés par les tassements de sols sont en corrélation avec les zones observant une forte épaisseur d'argile et une baisse des niveaux de la nappe.

Des actions ont été menées pour éviter des dommages sur les bâtiments et minimiser le risque d'affaissement dû à l'abaissement des niveaux de la nappe. Des travaux de renforcement des fondations sont effectués, notamment sur les pieux en bois des anciens bâtiments. L'infiltration des eaux est favorisée vers la nappe profonde (recharge artificielle) et les prélèvements sont contrôlés, afin de maintenir le niveau de la nappe captive stable.

Un réseau de surveillance des niveaux a été mis en place afin de vérifier l'impact de ces actions sur la nappe captive : les niveaux se stabilisent après 1990. Cependant, le système aquifère est complexe et les processus de recharge et d'écoulement au sein de la nappe ont été modifiés par le changement climatique et par les aménagements anthropiques : augmentation des précipitations et donc de la recharge, aires d'infiltration artificielle, présence de constructions drainant les eaux souterraines, prélèvements…

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le bureau de l'urbanisme de Göteborg surveille le niveau de la nappe depuis 1970, afin de vérifier la stabilité des niveaux. 400 points d'observation sur la zone urbaine (204 km^2) possèdent des chroniques de quelques mois à plusieurs décennies. En 2015, le niveau des eaux souterraines était surveillé sur environ 140 points : 8 dans la nappe superficielle des remblais, environ 125 dans la nappe inférieure captive des sables et 5 dans la nappe profonde des gneiss.

Références :

Ljungdahl Johanna (2005) - Analysis of groundwater level changes and land susbidence in Gothenburg, SW Sweden. 78 p.

Etats-Unis Californie – Fremont (201 km² et 0,21 millions habitants en 2010), Newark (36 km² et 0,04 millions habitants en 2010) et Union City (50 km² et 0,07 millions habitants en 2010)

- **Objectif et synthèse des résultats**

Une salinisation des eaux souterraines a été observée dès 1920 dans bassin versant du Cone Niles, dans la région de la baie de San Francisco en Californie, du fait d'une surexploitation des nappes. Le biseau salé a contaminé l'aquifère superficiel mais également les aquifères plus profonds. Les dépôts quaternaires se caractérisent par une succession de couches sableuses, graveleuses et limoneuses, entrecoupées de niveaux argileux. Les niveaux aquifères principaux sont : l'aquifère de Newark, les aquifères de Centreville et de Fremont et l'aquifère profond. Un autre aquifère s'étend sur un secteur réduit à l'est de la faille de Hayward, considérée comme imperméable (barrière étanche).

A partir de 1962, le comté d'Alameda a financé des actions permettant de minimiser l'intrusion d'eau salée de la baie vers les nappes. La rivière Alameda est détournée pour s'infiltrer dans les gravières des lacs Quarry (recharge active), afin de remonter le niveau piézométrique. Les eaux souterraines salées sont pompées vers une usine de dessalement de Newark ou vers la baie de San Francisco, afin d'empêcher le biseau salé d'atteindre des forages d'eau potable. A partir de 1972, le niveau piézométrique est repassé au-dessus du niveau de la mer et a permis de retrouver un gradient hydraulique naturel.

L'Alameda County Water District (ACWD) surveille les eaux souterraines du bassin du Cone Niles depuis 1914 et gère l'adduction en eau potable et le réseau de suivi des eaux souterraines. Ce réseau de surveillance, mis en place à partir de 1961, permet de suivre la migration du biseau salé et de préserver les ressources en eau. Il concerne un secteur de 272 km^2 sur les villes de Fremont, d'Union City et de Newark. Un rapport annuel réalise un bilan sur les écoulements (cartes piézométriques) et cartographie le biseau salé.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Depuis 1961, plusieurs programmes de surveillance ont été mis en œuvre et modifiés au fil du temps, pour répondre aux besoins de gestion des eaux souterraines ou pour mener des études spécifiques. Les points de mesure appartiennent à des organismes publics et privés. Le réseau a été modifié suite à la destruction et à la création de nouveaux points. Afin de combler des lacunes de données et remplacer des puits privés ou peu fiables (problème de conception), de nouveaux piézomètres sont créés par le gestionnaire du réseau.

Les ouvrages de surveillance sont sélectionnés afin d'obtenir une répartition homogène sur l'ensemble de territoire ainsi qu'en fonction de l'accessibilité du point et de la présence de données historiques.

Des campagnes semestrielles permettent de relever les niveaux des nappes et de réaliser des analyses en chlorures et en solides dissous (TDS). La campagne de printemps a pour but de tracer une carte piézométrique des hautes eaux. L'objectif de la campagne d'automne est de réaliser une carte piézométrique des basses eaux et de cartographier le biseau salé.

Entre 2017 et 2019, le nombre de points visités est de 280 à 285 ouvrages. Des mesures piézométriques sont effectués sur les points accessibles (225 à 255) : une centaine sur l'aquifère de Newark, une centaine sur l'aquifère de Centerville-Fremont, une trentaine sur l'aquifère profond et une vingtaine sur l'aquifère à l'est de la faille. Les prélèvements concernent environ 90 points au printemps et 190 à l'automne. Les niveaux de 7 points sont suivis

hebdomadairement et 49 mensuellement. 26 points sont également suivis mensuellement dans le cadre du réseau de surveillance de l'Etat de Californie.

Références :

Chen Eileen, McMahon Patti and Shorno Anton (2017) - Groundwater Monitoring Report. Water Resources Department Groundwater Resources Division. 81p.

Chen Eileen, Shorno Anton and Bautista Jeremy (2020) - Groundwater Monitoring Report. Water Resources Department Groundwater Resources Division. 84p.

www.acwd.org/227/Niles-Cone-Groundwater-Basin-Monitoring

Etats-Unis Massachusetts – Boston (232 km^2 et 0,69 millions habitants en 2018)

- **Objectif et synthèse des résultats**

Les fondations des plus anciens bâtiments de Boston reposent sur des structures en bois. L'imperméabilisation des terrains a entrainé une diminution de la recharge de l'aquifère et une baisse des niveaux piézométriques. Cette baisse menaçant d'exposer les fondations à l'air et donc de porter atteinte à l'état structural des bâtiments. Les impacts économiques engendrés par ce genre de dégradation peuvent être colossaux, par exemple les réparations de l'hôtel de ville de Milwaukee (Wisconsin, Etats-Unis) qui rencontre le même type de problème sont estimées à 60 000 000 $.

En 1986, l'association Boston Groundwater Trust (BGwT) a été créée par la ville de Boston pour surveiller et trouver des solutions face à cette problématique. Cet organisme a bénéficié du soutien de l'ensemble des acteurs locaux (mairie, associations de voisinage…) et de l'Etat du Massachusetts pour récolter des fonds suffisants afin de mettre en place un réseau de surveillance dense. Ce réseau permet de surveiller exclusivement les niveaux d'eau de la baie de Boston.

Par ailleurs, la ville de Boston a promulgué un code de zonage pour les districts menacés par cette problématique. Pour améliorer la recharge de l'aquifère, les eaux de pluies récoltées dans la zone sont désormais infiltrées directement dans le sol. La législation spécialement créée sur le secteur impose avant tout travaux de démontrer que ceux-ci n'auront pas d'impact sur le niveau des nappes, que les bâtiments seront étanches et ne nécessiteront pas de pompages post-travaux et que des systèmes de recharge de l'aquifère (appelés « groundwater recharge systems ») seront installés. En effet, lorsque des bâtiments sont construits ou entièrement rénovés, des réservoirs sont installés pour diffuser progressivement les eaux de pluies récoltées (plus de 420 systèmes installés).

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau de surveillance quantitatif de Boston est unique en son genre tant par sa densité que par sa conception. En 2019, le réseau comporte 811 piézomètres sur 15 km^2 afin de surveiller le niveau d'eau souterraine et permet au BGwT d'alerter lorsque des irrégularités apparaissent (fuites, seuil de niveau bas…). Cette forte densité d'ouvrages de surveillance s'explique par un financement conséquent mais négligeable face aux coûts d'éventuels dommages pouvant apparaître sur les bâtiments suite à une baisse des niveaux de la nappe.

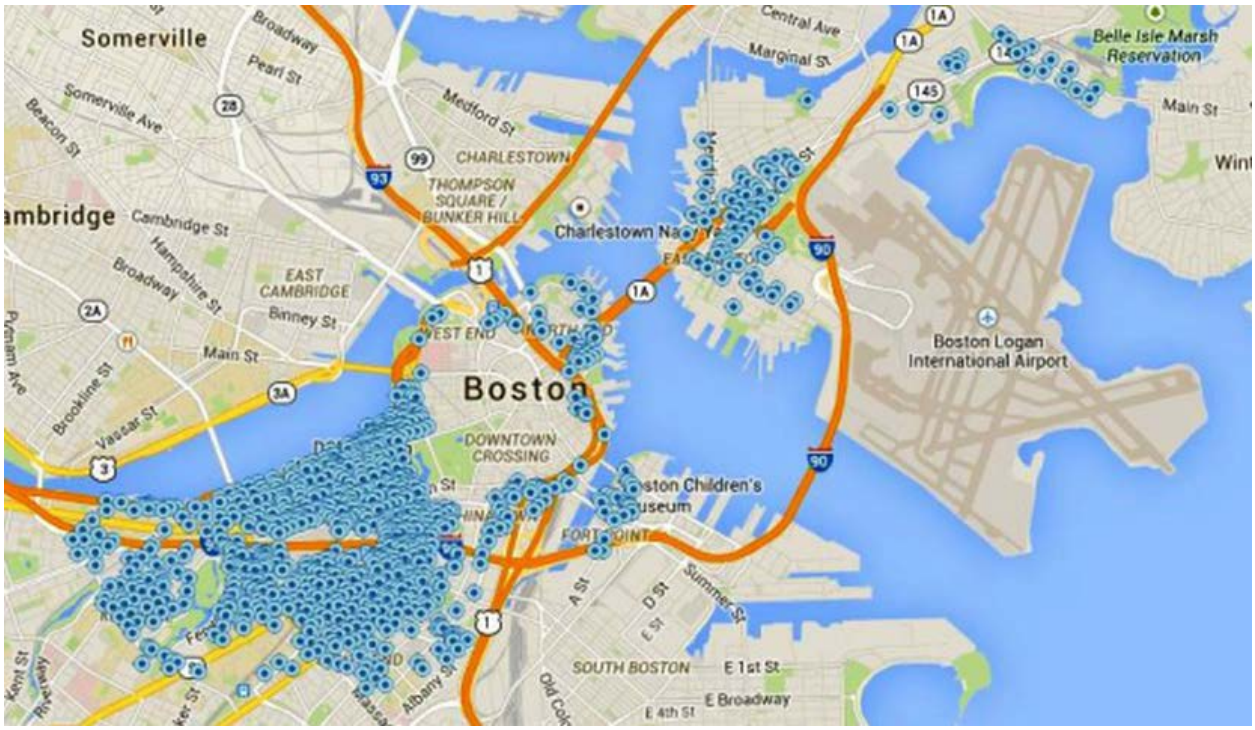
Ces piézomètres, d'environ 125 mm de diamètre, sont tous placés sur les trottoirs publics afin de garantir leur accès et de faciliter la mesure. La mention BGwT est facilement repérable sur les capuchons et permet donc une identification rapide de la nature de l'ouvrage.

Les piézomètres sont relevés manuellement 6 à 8 fois par an. Jusqu'à 23 appareils de mesures automatiques sont périodiquement installés pour densifier le nombre de mesures dans certains districts. Lors de ces campagnes spécifiques, les enregistreurs effectuent des mesures horaires, généralement pendant une période de 2 mois.

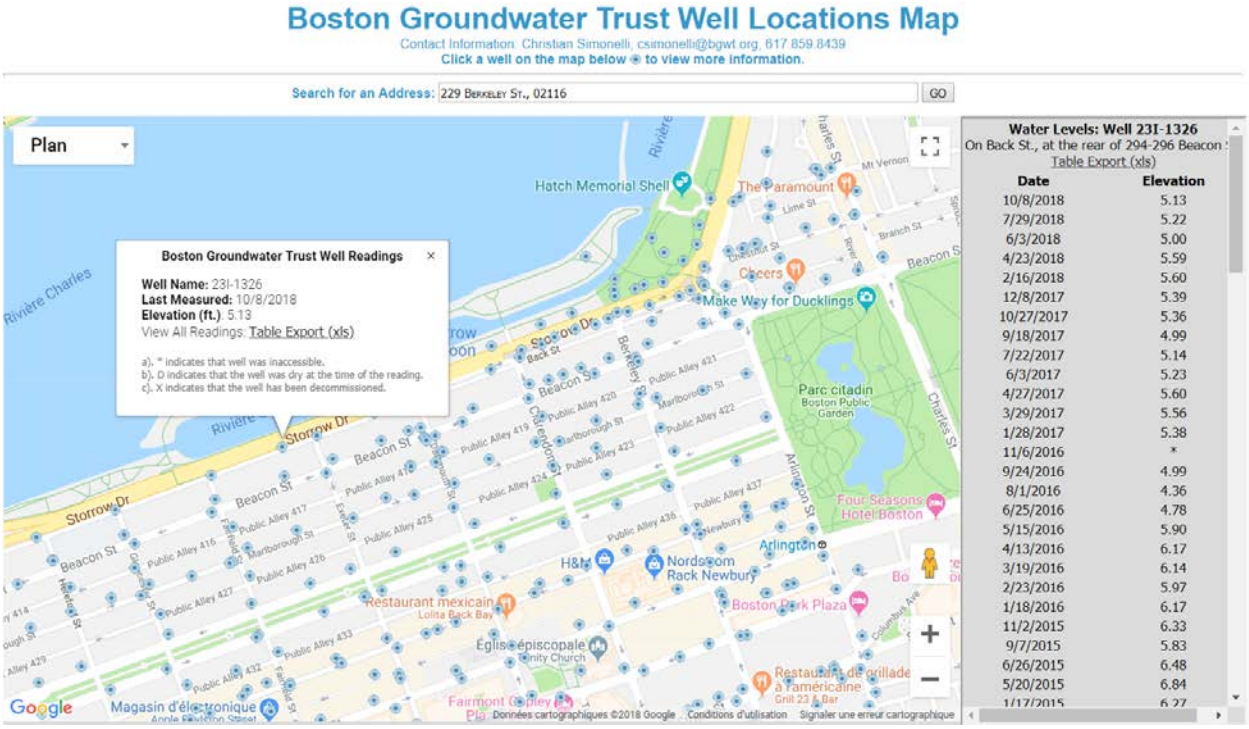
L'un des succès du cas de Boston réside dans le transfert des informations aux publics et aux différents acteurs et du travail coopératif qui a été mis en place pour préserver la ressource. Le BGwT organise de nombreuses réunions publiques pour présenter les résultats, notamment après une campagne exceptionnelle, et publie fréquemment des rapports. Les chroniques complètes peuvent être visualisées grâce sur un site internet et sur une application mobile. Une initiative innovante a été mise en place avec l'installation de bouchons transparents et interactifs

au droit de quelques piézomètres, permettant aux passants de voir les eaux souterraines et de connaître la profondeur de l'eau en temps réel grâce à un afficheur numérique.

Tête d'un piézomètre et bouchon interactif du réseau piézométrique de la ville de Boston (source : www.bostongroundwater.org, 2019)



Réseau piézométrique de Boston (source : www.bostongroundwater.org, 2019)



Diffusion des données piézométriques de Boston (source : [www.bostongroundwater.org, 2019](www.bostongroundwater.org))

Références :

Laffer Elliott (2014) - Wood pilings groundwater and the Boston groundwater trust. A Model of Cooperative Problem Solving.

Thomas Brian F. and Vogel Richard M. (2012) - Impact of Storm Water Recharge Practices on Boston Groundwater Elevations. Journal of hydrologic engineering.

www.bostongroundwater.org

Etats-Unis Tennessee – Memphis (839 km^2 et 0,65 millions habitants en 2010)

- **Objectif et synthèse des résultats**

L'alimentation en eau potable de Memphis provient essentiellement d'un aquifère profond captif. L'aquifère superficiel a été dégradé par la présence de pesticides (atrazine, simazine…), nitrates, composés organiques volatiles (COV) du fait d'une forte urbanisation entre 1970 et 2001. La crainte d'une communication entre les deux aquifères a conduit à la mise en place d'un réseau de mesures sur la nappe superficielle en 1997.

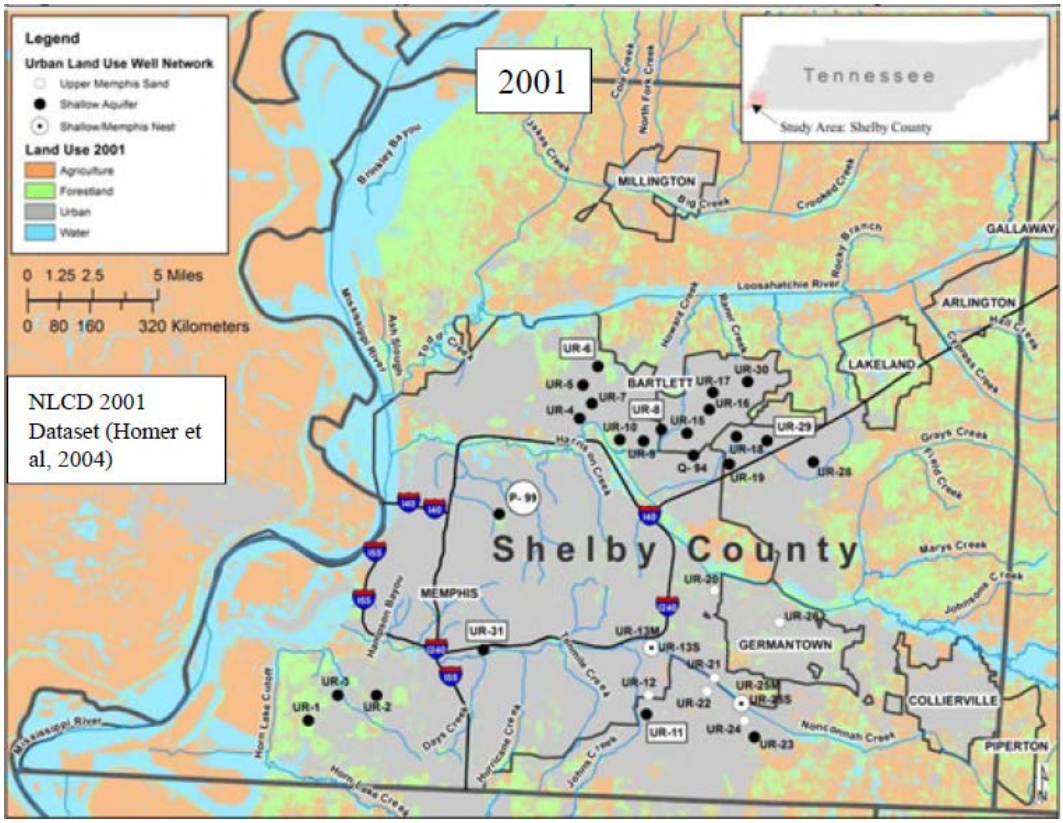
L'interprétation des résultats a montré que la pollution en nitrates et pesticides était, au moins en partie, d'origine agricole. Ce constat s'explique par la vocation agricole des terrains avant l'urbanisation. Pour certains paramètres, il est cependant difficile de discriminer la part agricole et urbaine dans l'origine de la pollution. En effet, l'âge médian des eaux souterraines est de 21 ans et la concentration en pesticides est généralement plus élevée dans les eaux souterraines récentes, ce qui indique que les polluants seraient d'origine urbaine.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau est implanté uniquement sur le secteur de la ville qui s'est fortement développé après 1970, soit approximativement 113 km^2.

Les 31 piézomètres ont été réalisés à la tarière et équipés d'un tubage de 50 mm en PVC. La crépine de 3 m a été placée en partie supérieure de l'aquifère, afin de caractériser les eaux récemment infiltrées. 23 points captent la nappe superficielle. Plusieurs des points ont été implantés sur des secteurs où la couche argileuse séparant les deux aquifères est mince ou absente. Ainsi, 8 points captent la partie supérieure de l'aquifère profond, l'aquifère superficiel étant pratiquement sec. 2 de ces piézomètres ont été installés à proximité immédiate d'un point captant l'aquifère superficiel.

Des prélèvements et analyses ont été réalisés annuellement, entre fin avril et fin mai, de 1997 à 2006. 6 points représentatifs de la qualité de la nappe ont également été suivis deux fois par an entre 2002 et 2009. Les analyses concernent les propriétés physiques, les constituants inorganiques majeurs et mineurs, les composés azotés, les pesticides et les composés organiques volatiles. Des échantillons ont également été prélevés lors de la campagne de 2006 afin de dater les eaux souterraines (SF6).



Localisation des points de mesures sur le secteur impacté (source : Barlow et al., 2012)

Références :

Barlow Jeannie R.B., Kingsbury James A. and Coupe Richard H. (2012) - Changes in shallow groundwater quality beneath recently urbanized areas in the Memphis, Tennessee area. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 48, pp336-354.

Taylor Charles J. and Alley William M. (2001) - Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data – Rapport U.S. Geological Survey. 74 p.

Argentine - Córdoba (576 km^2 et 1,40 millions habitants en 2010)

- **Objectif et synthèse des résultats**

La ville de Córdoba doit faire face à des problèmes de pollution des eaux souterraines, notamment en sulfates, chlorures et, au droit de certaines zones industrielles, en nitrates, arsenic, fluor et bactéries. Les principales sources de pollution identifiées sont les eaux usées (réseaux et rejets directs), les eaux urbaines de ruissellement et les sites de stockage des déchets. La nappe des sédiments limono-sableux quaternaires n'est pas utilisée pour l'eau potable mais uniquement pour un usage industriel. Il n'existe donc pas de réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines. Cependant, la ville se développe rapidement et il est envisagé la création de forages d'eau potable permettant de compléter les prélèvements en eau de surface.

Une étude a été conduite en 2014 afin que les services de l'Etat, les gestionnaires de l'eau et de l'environnement et les aménageurs comprennent les impacts des activités polluantes sur les ressources en eau et développent des stratégies efficaces pour la protection des eaux souterraines. Dans ce cadre, la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines est recommandée pour évaluer la qualité des eaux souterraines, identifier les sources potentielles de pollution et définir la localisation éventuelle des futurs captages d'eau potable.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

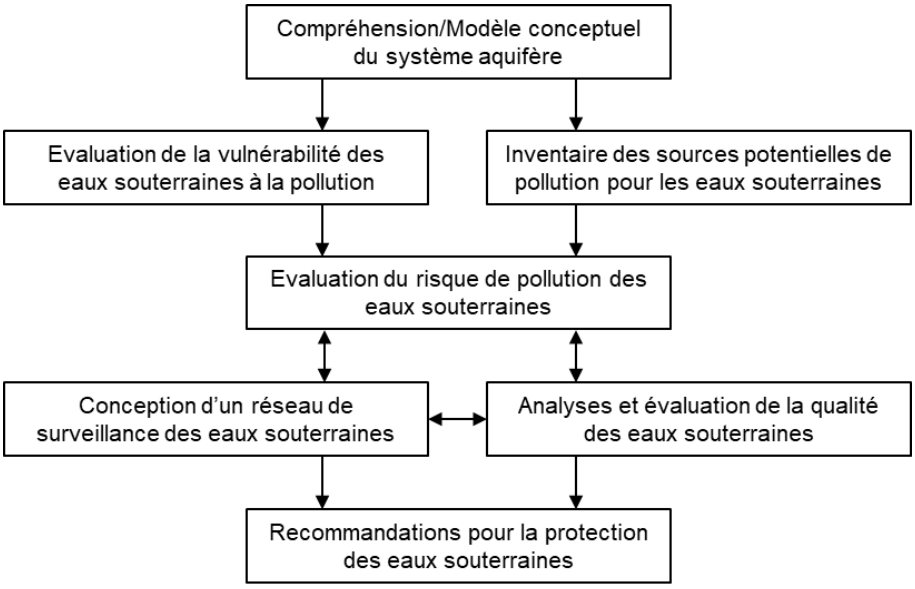
L'étude de 2014 ne va pas jusqu'à la mise en place opérationnelle d'un réseau de surveillance des eaux souterraines mais formule des propositions et des recommandations pour sa conception.

La méthodologie se base sur l'élaboration d'un modèle conceptuel, représenté par une modélisation hydrogéologique du système aquifère. Ce modèle permet d'étudier et de prévoir la dynamique du système aquifère, d'évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, d'identifier les sources potentielles et les transferts de polluants vers les eaux souterraines et d'interpréter les résultats de la surveillance de la qualité de la nappe.

La carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution est déterminée par la méthode DRASTIC, largement utilisée aux Etats-Unis. Cette méthode combine plusieurs critères tels que l'occupation des sols, la topographie (pente), la recharge, l'épaisseur de la zone non saturée (profondeur de la nappe), les paramètres hydrogéologiques, etc. La carte finale constitue un outil pour une meilleure planification de l'occupation des sols urbains.

Les sources potentielles de pollution sont identifiées et hiérarchisées, afin d'établir les priorités pour le contrôle et le traitement des sources de pollution. La ville de Córdoba ne disposant pas de bases recensant les sites et sols potentiellement pollués et les activités industrielles historiques et actuelles, l'étude utilise les méthodologies décrites à l'international (Etats-Unis et Europe) pour inventorier et noter l'ensemble des sources existantes et potentielles de pollution.

La carte de risque de pollution des eaux souterraines, issue de la combinaison des cartes de vulnérabilité et des sources potentielles de pollution, sert de support pour localiser les secteurs prioritaires à surveiller. Le réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines devra se concentrer sur ces secteurs prioritaires. Il pourrait comprendre 100 points de surveillance et le programme proposé pourrait être orienté selon les objectifs du suivi, par exemple pour détecter une pollution et alerter.



Méthodologie définissant la surveillance, l'évaluation et la protection des ressources en eau souterraine (traduit de Ferral Anabella et al., 2014)

Références :

Ferral Anabella, Sarmiento Tagle Martin, Alaniz Eugenia, Ferral Alberto (2014) – Assessment, monitoring and protection of groundwater pollution in urban areas, Córdoba city, Argentina. European Scientific Journal February 2014. Special edition. vol.3. 9 p.

Argentine - Mar del Plata (79 km^2 et 0,61 millions habitants en 2010)

- **Objectif et synthèse des résultats**

La ville de Mar del Plata est en plein développement et se trouve confrontée à plusieurs problématiques. Son aquifère multicouche, épais de plus de 100 m, est composé de limons et de sables quaternaires, entrecoupés de bancs d'argiles. En raison de la surexploitation de la nappe, le sens d'écoulement des eaux souterraines s'est inversé au droit d'une bande côtière de 3,5 km de large, ce qui a entraîné une intrusion d'eau salée. Depuis 1963, les écoulements des eaux souterraines au droit de la ville sont simulés par un modèle hydrodynamique. En 1992, les puits d'eau potable ont dû être déplacés en périphérie sud-ouest de la ville.

La ville a mené très tôt des études pour déterminer la qualité des eaux souterraines au droit de sa zone suburbaine sud-ouest et ainsi définir une politique d'aménagement et de protection de ce secteur. Dans les villes en développement, la zone suburbaine constitue une zone de transition entre le milieu urbain, en accroissement rapide, et le milieu rural, en recul. Elle joue un rôle primordial pour répondre à la demande grandissante en eau, pour les besoins domestiques, les processus industriels et l'irrigation. Les activités humaines au droit de ce secteur suburbain peuvent impacter la qualité et la quantité des eaux souterraines.

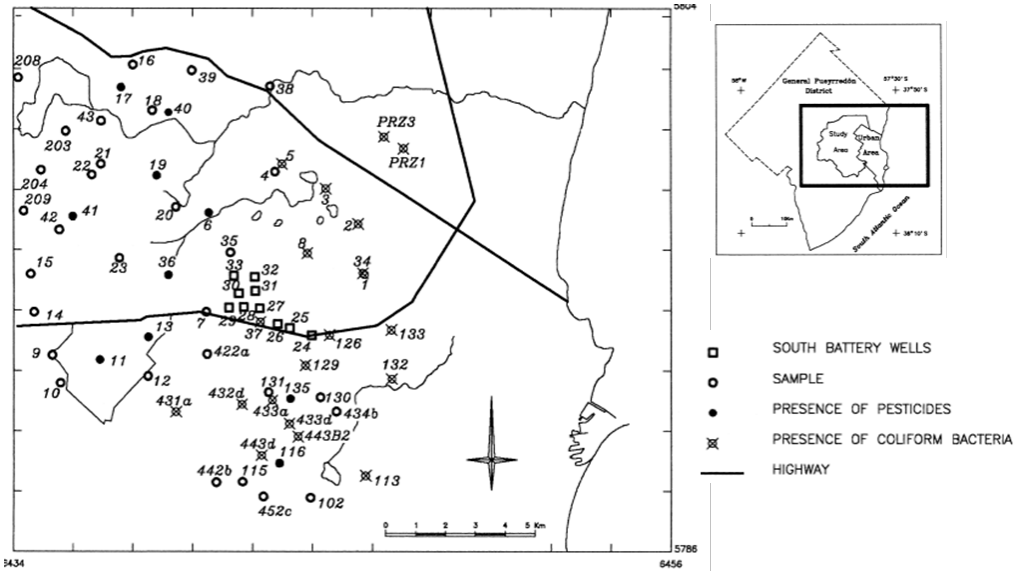
En 1998, une vaste campagne de prélèvements sur 50 puits et 175 km^2 a eu pour objectif de vérifier l'impact des activités humaines sur la qualité des eaux souterraines en zone suburbaine. Les analyses ont permis de démontrer que l'activité agricole, les sites de dépôts de déchets et les rejets directs des eaux usées sont les principales sources de pollution. Cette étude préconise la mise en œuvre d'un programme de surveillance de la qualité des eaux souterraines.

En 2014, une étude a été menée afin d'évaluer la part de chaque source potentielle de nitrates contribuant aux concentrations élevées mesurées dans les eaux souterraines. Des prélèvements ont été réalisés au droit de 4 zones ayant une occupation des sols différente : semi-rurale (zone A), intermédiaire (zone B), urbaine (zone C) et sans pression anthropique (zone CZ). L'étude a permis d'identifier la part des nitrates imputable à l'agriculture et la part provenant des fuites des réseaux d'assainissement de la ville.

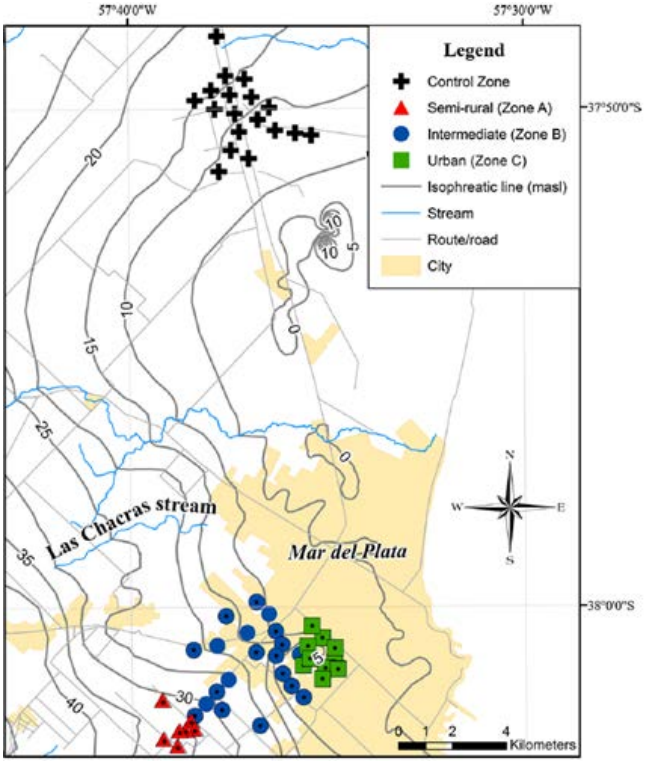
- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

En 1998, la campagne de prélèvements a porté sur un secteur de 175 km^2 avec 50 puits, 40 puits domestiques peu profonds (12-18 m) et 10 captages d'eau potable profonds (80-100 m). En s'appuyant sur les connaissances hydrogéologiques et hydrochimiques, il a été décidé de répartir les prélèvements de façon homogène, avec un point tous les 4 km^2. La densité de points a été augmenté à proximité des sources suspectées de pollution. Les prélèvements ont été analysés pour les ions majeurs, la bactériologie et les métaux lourds sur 29 points et pour les pesticides sur 13 points.

Concernant l'étude de 2014, la répartition des points de prélèvements est de 11 en zone A, 20 en zone B, 10 en zone C et 18 en zone CZ. Des analyses hydrochimiques ont été réalisées en 2008, dont 5 en zone A, 14 en zone B, et 10 en zone C. Des analyses isotopiques (^{15}N, ^{18}O et ^{34}S) ont été réalisées en 2010.



Réseau de surveillance de l'étude de 1998 (source : Massone Hectore E. et al., 1998)



Réseau de surveillance de l'étude de 2014 (source : Martínez et al., 2014)

Références :

Massone Hectore E., Martínez Daniel E., Cionchi Jose L., Bocanegra Emilia (1998) - Suburban Areas in Developing Countries and Their Relationship to Groundwater Pollution: A Case Study of Mar del Plata, Argentina. Environmental Management vol 22, n°2, pp.245–254.

Martínez Daniel E., Moschione Eleonora, Bocanegra Emilia, Glok Galli Melisa, Aravena Ramón (2014) - Distribution and origin of nitrate in groundwater in an urban and suburban aquifer in Mar del Plata, Argentina. Environmental Earth Sciences, vol 72, n°6, pp877-1886.

Brésil - Recife (219 km^2 et 1,56 millions habitants en 2012)

- **Objectif et synthèse des résultats**

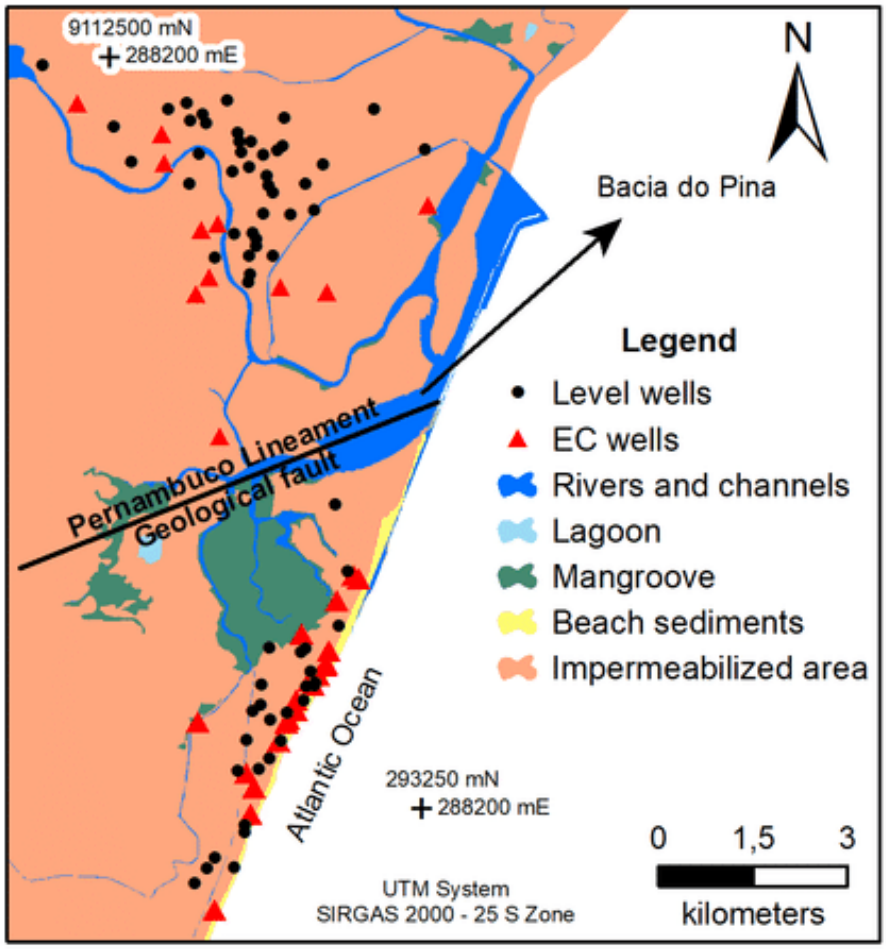
La ville de Recife connait un accroissement rapide sa population. L'augmentation de la demande en eau, avec la création de nombreux forages, et des sécheresses importantes et successives depuis la fin des années 1990 ont entraîné une surexploitation de l'aquifère multicouche. Les rabattements piézométriques importants augmentent le risque d'intrusion du biseau salé et la contamination des nappes profondes par la nappe superficielle.

L'exploitation des données sur les eaux souterraines (niveau d'eau et conductivité électrique) et des connaissances géologiques ont permis de mettre en évidence deux comportements différents sur les aquifères profonds. Sur le secteur nord, les niveaux des eaux souterraines diminuent et la conductivité reste stable. Au sud, les niveaux stables de la nappe s'accompagnent de valeurs élevées de la conductivité à proximité de la zone estuarienne. Cette hétérogénéité spatio-temporelle témoigne d'une recharge probablement favorisée localement sur la zone estuarienne. Ces résultats ont montré que la surveillance spatio-temporelle des données piézométriques et géochimiques ainsi que des connaissances géologiques pouvait constituer une approche préliminaire, mais importante, pour la définition de stratégies de gestion de la recharge des aquifères. Un programme de recharge active de l'aquifère a été préféré à la gestion des volumes prélevés, du fait notamment de l'impossibilité de contrôler les nombreux puits illégaux. Sur la base des résultats de l'étude, la recharge active pourra se faire par infiltration contrôlée à proximité de la zone estuarienne et par injection profonde directe dans les secteurs plus éloignés.

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Entre 1999 et 2014, de nombreuses mesures de niveaux piézométriques et de conductivités sur des forages déclarés ont été collectées dans une base de données. Cependant, elles sont insuffisantes pour modéliser correctement la répartition spatio-temporelle des niveaux des conductivités.

Un suivi piézométrique annuel a été mis en place de 2005 à 2014 sur 67 puits captant la nappe profonde : 27 sur le secteur sud (environ 8 km^2) et 40 sur le secteur nord (environ 45 km^2). La conductivité a été mesurée sur 31 ouvrages en septembre 2012 et mars 2013 : 20 au sud et 11 au nord.



Réseau de suivi des eaux souterraines (niveaux et conductivité électrique) de Recife (source : Coelho Victor Hugo R. et al., 2018)

Références :

Coelho Victor Hugo R., Bertrand Guillaume F., Montenegro Suzana M.G.L., Paiva Anderson L.R., Almeida Cristiano N., Galvão Carlos O., Barbosa Luís Romero, Batista Larissa F.D.R., Ferreira Eduardo L.G.A. (2018) - Piezometric level and electrical conductivity spatiotemporal monitoring as an instrument to design further managed aquifer recharge strategies in a complex estuarial system under anthropogenic pressure. Journal of Environmental Management, Volume 209, pp426-439.

Corée – Séoul (605 km^2 et 9,96 millions d'habitants en 2019)

- **Objectif et synthèse des résultats**

La superficie de Séoul a été multipliée par deux entre 1960 et 1980. Vers la fin des années 1980, la consommation en eau a fortement augmenté, créant une vaste dépression piézométrique, alors que la qualité de la nappe s'est détériorée. Par ailleurs, la mise en place du métro a fait baisser le niveau de la nappe de 25 m. Un plan de gestion stratégique de la ressource en eau à l'échelle de la ville a été décidé.

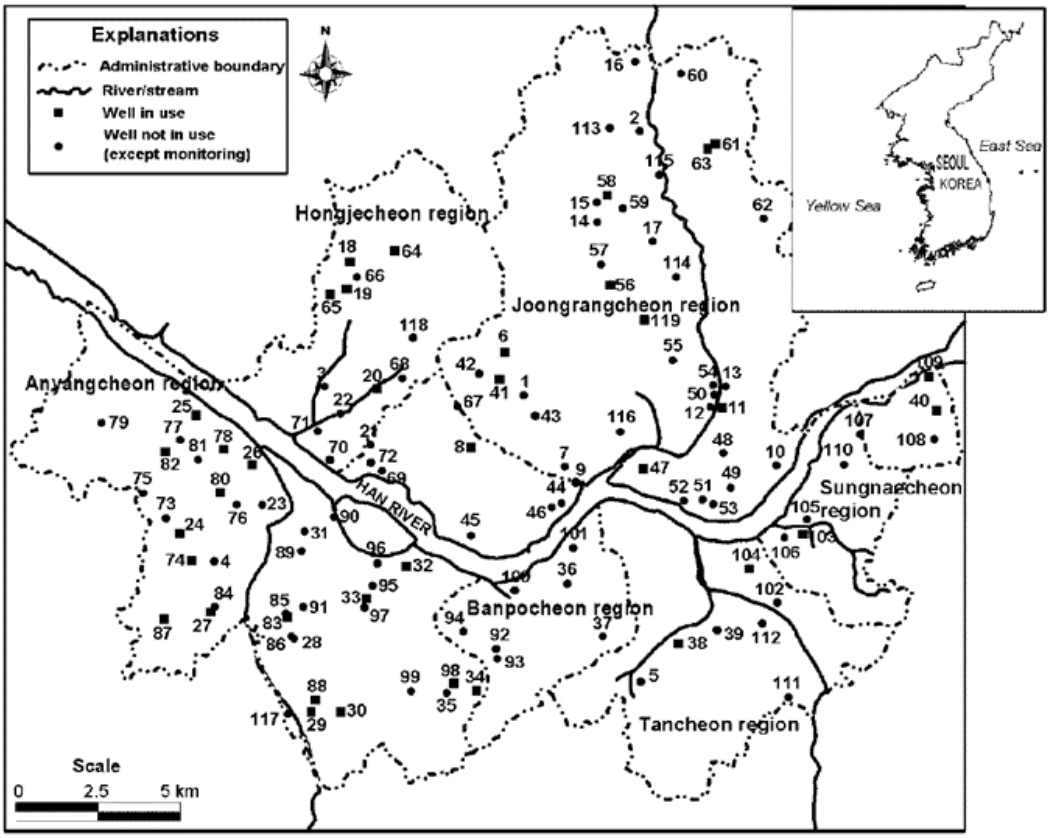
En 1995, une première étude a permis de comprendre le contexte hydrogéologique. En 1997, un réseau de surveillance qualité et quantité a été installé sur la base de cette étude, avec 110 points de mesures (119 en 2000, avec un objectif prévu de 180). Ce réseau vient en complément de deux réseaux préexistants : celui du Ministère des transports et de l'urbanisme et celui de la société KOWAKO spécialisée dans la gestion de la ressource en eau à l'échelle nationale.

Une étude ponctuelle a été réalisé dans le but d'analyser les données sur les eaux souterraines pour optimiser la gestion des ressources en eaux. Les 119 points existants ont été utilisés entre 2000 et 2001. Les 83 ouvrages non exploités ont été équipés d'une sonde permettant la mesure du niveau piézométrique, de la température et de la conductivité toutes les heures. Les chroniques ont permis de montrer que de nombreux facteurs interviennent dans le cycle des eaux de la métropole : pompage des eaux souterraines dans les stations de métro et les chantiers de construction, prélèvements pour l'irrigation, recharge provenant des fuites des réseaux d'eau potable et d'assainissement…

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

Le réseau local de la ville comprend 110 points de mesures en 1997, lors de sa mise en place, 119 points en 2000 pour un objectif de 180 points sur un secteur de 391 km², excluant les forêts et rivières. Les ouvrages, de 30 à 90 m de profondeur, permet de suivre la qualité et les niveaux de la nappe des alluvions et du socle fracturé.

Les points ont été initialement installés selon plusieurs critères : sur les secteurs où la nappe est fortement sollicitée (> 50m^3/j/km²), sur les zones de recharge et de vidange des eaux souterraines, sur les secteurs où des aménagements actuels et futurs (métro et installations souterraines) risquent d'impacter le niveau piézométrique et à proximité des sources potentielles de pollution. Seuls les ouvrages pouvant être équipés d'un système de mesure en continu et automatique ont été sélectionnés. Ainsi les 180 points de surveillance ont été déterminés : 120 points étaient existants et 60 ont été créés.



Localisation des points de mesures du réseau métropolitain de Séoul pour l'étude de 2000-2001 (source : Jin-Yong Lee, 2005)

Références :

Jin-Yong Lee, Mi-Jung Choi, Yoon-Young Kim and Kang-Kun Lee (2005) - Evaluation of hydrologic data obtained from a local groundwater monitoring network in a metropolitan city, Korea. 13p.

Thaïlande – Bangkok (1569 km^2 et 9,28 millions d'habitants en 2016)

- **Objectif et synthèse des résultats**

La ville de Bangkok est un exemple des effets cumulatifs d'une mauvaise gestion des eaux souterraines : dégradation de la qualité, intrusion saline et forte subsidence. La surexploitation de l'aquifère est la cause principale de ces problèmes : les volumes pompés sont passés de 8360 m^3/j en 1954 à 1,4 Mm^3/j en 1982. Des résolutions ont été prises dès 1983 par le gouvernement en baissant les volumes prélevés. Ces décisions ont conduit à une diminution des phénomènes de subsidence et à une stabilité des niveaux piézométriques.

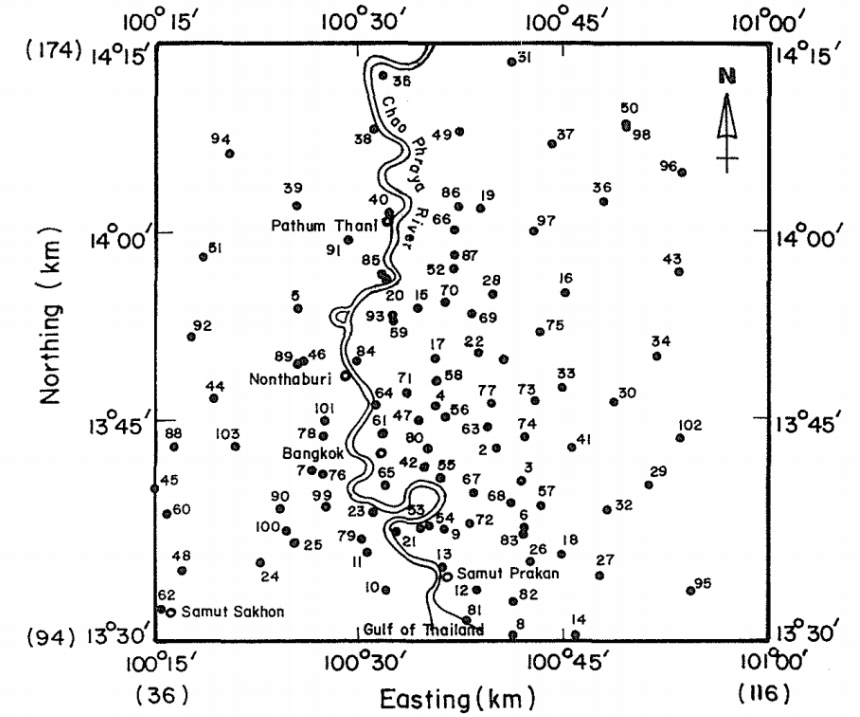
Le problème de qualité des eaux souterraines a poussé les acteurs locaux à rechercher les sources de pollution en créant un réseau piézométrique et de suivi de la qualité. La qualité de l'eau souterraine de l'aquifère multicouche a été évaluée en analysant les résultats d'analyses par le biais de méthodes géostatistiques (krigeage).

- **Méthodologie pour la constitution du réseau de surveillance**

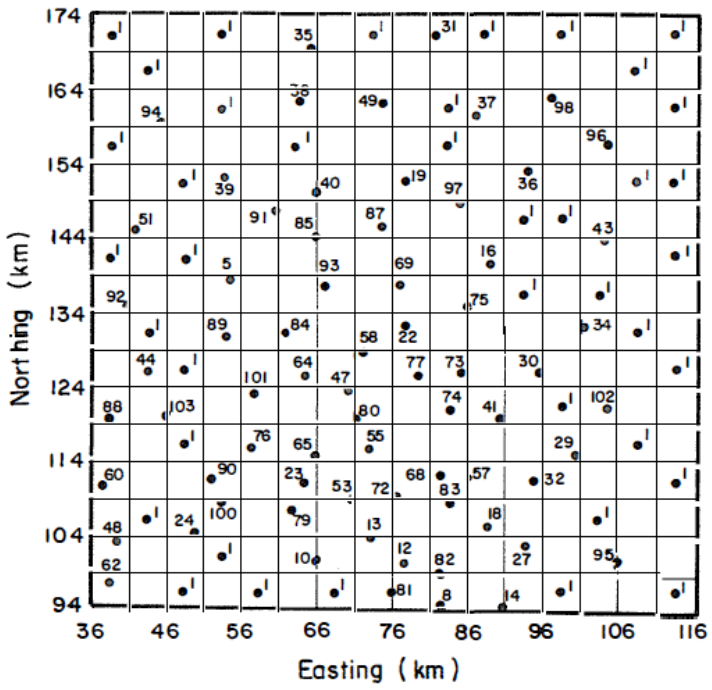
Le suivi de la qualité des eaux et des niveaux piézométriques a été réalisé grâce à un réseau de 103 qualitomètres et 258 piézomètres, installés sur 1280 km². Les points ont été principalement positionnés au droit des secteurs où les niveaux piézométriques étaient les plus bas et où la subsidence était la plus importante. Les ouvrages de différentes profondeurs permettent de capter les 3 nappes superposées. Les niveaux piézométriques sont surveillés mensuellement et des prélèvements pour analyses sont effectués environ une fois par an. Les données piézométriques sont disponibles dès 1981 sur quelques points et les données de qualité à partir de 1978 sur un nombre limité de points puis à partir de 1986 pour la plupart.

Des interrogations sur la fiabilité des résultats d'analyses ont été soulevées. Les piézomètres n'ont toujours pas été purgés avant la mesure et les analyses ne sont peut-être pas représentatives des différentes nappes. De plus, les points de mesures n'ont pas été uniformément répartis, engendrant des répercussions dans la fiabilité du krigeage. En effet, en comparant la répartition des points de surveillance avec la cartographie de la qualité des eaux souterraines, il s'avère que certains secteurs fortement impactés par une pollution ne sont pas ou peu suivis alors que la densité de points est forte sur des secteurs où la qualité des eaux souterraines est bonne.

La cartographie des teneurs en chlorure, obtenue par méthode géostatistique (krigeage), a alors été utilisée pour optimiser l'emplacement des ouvrages. En 1995, les points ont été repositionnés afin de permettre une surveillance de secteurs fortement pollués et une diminution de l'écart type de krigeage. Le nouveau réseau de qualité des eaux souterraines se compose de 110 points de surveillance : 70 anciens et 40 nouveaux.



Localisation des 103 points de mesures du réseau (source : Das Gupta A.et al., 1995)



Proposition d'optimisation du réseau (les propositions de nouvelles stations sont identifiées par un 1, tandis que les numéros des anciennes stations sont conservés) (source : Das Gupta A.et al., 1995)

Références :

Das Gupta A., Jayakrishnan R., Onta P. R. and Ramnarong V. (1995) - Assessment of groundwater quality for the Bangkok aquifer system. Models for Assessing and Monitoring Groundwater Quality (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995). IAHS Publ n°227. 8p.

Annexe 3

Outils de communication ayant servi de support lors des entretiens

Plaquette de communication distribuée avant les entretiens individuels

Réseau de suivi des eaux souterraines en milieu urbain

En cas de pollution des eaux souterraines en milieu urbain, l'identification d'une source de pollution et l'appréciation de son extension et de son évolution sont souvent délicats. Cela est dû à une méconnaissance des sens d'écoulement des eaux souterraines dans les zones fortement urbanisées. Par ailleurs, plus la connaissance d'une pollution est tardive, plus il devient difficile et coûteux de la traiter et la maîtriser.

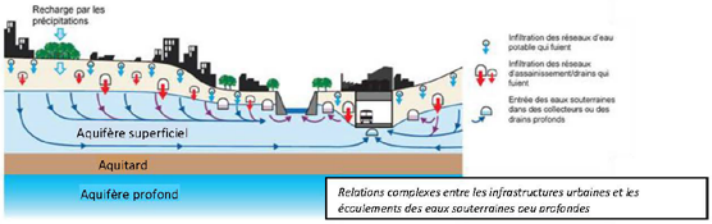
OBJECTIF DU PROJET

Dans le cadre de ses missions d'appui aux politiques publiques pour le Ministère en charge de l'écologie, le BRGM élabore un guide méthodologique, permettant la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines adapté aux spécificités du milieu urbain.
Pour se faire, le territoire de la métropole de Lyon a été choisi pour tester cette méthodologie et servir de pilote pour d'autres villes françaises soucieuses de la qualité de leurs eaux souterraines.

CONTEXTE PARTICULIER DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU URBAIN

Le territoire urbain présente plusieurs spécificités qui en font un milieu sensible où le besoin de suivi des eaux souterraines est accru :

- le cycle de l'eau et les écoulements souterrains y sont perturbés : prélèvements en eau pour divers usages, imperméabilisation des sols limitant l'infiltration des eaux de pluie, drainage ou pompage pour la protection d'infrastructures souterraines (lignes de métros, parkings souterrains…), fuites de réseaux de collectivité, canalisation des cours d'eau…
- les sources de potentielles de pollutions sont potentiellement variées : industries, activités de services, traitements des voiries, parcs et jardins, pollutions historiques…
- les usages de l'eau sont nombreux et plus ou moins sensibles : récréatifs, industriels, géothermiques, privés…



Relation entre les infrastructures urbaines et la nappes phréatique (traduit de S. Foster and G. Tyson, 2015)

INTÉRÊTS DU RÉSEAU DE SUIVI

Un réseau de piézomètres permet d'acquérir des données sur les niveaux et la qualité des eaux souterraines et ainsi d'acquérir une meilleure connaissance de l'hydrosystème urbain.

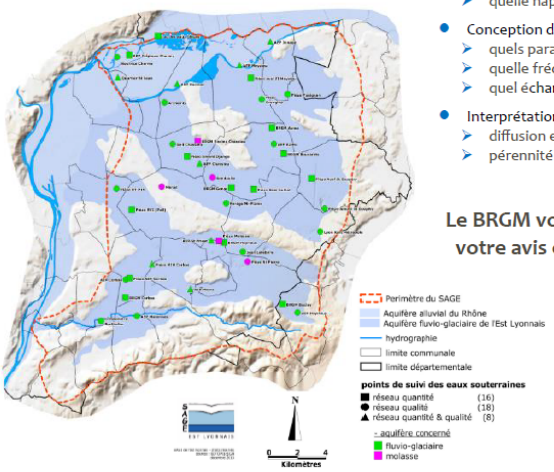
Piézomètre suivi par le Grand Lyon (source : BRGM)

Les applications sont nombreuses en appui aux problématiques de pollution :

1. améliorer la surveillance des eaux souterraines en lien avec des secteurs industriels et aider à la conception de programmes d'investigation ;
2. anticiper la survenue d'une pollution (suivi *a priori*), ce qui peut éviter de devoir gérer une situation devenue complexe et mettre en œuvre des actions correctives (traitement, servitudes, restrictions d'usage…) ;
3. caractériser et suivre l'évolution d'un panache de pollution avérée (suivi *a posteriori*) ;
4. protéger des cibles particulièrement sensibles, comme les captages d'alimentation en eau potable (risque sanitaire potentiel lié à l'ingestion d'eau) ou les zones résidentielles (risque sanitaire potentiel lié à l'inhalation de substances volatiles) ;
5. vérifier la compatibilité de la qualité des eaux souterraines avec l'usage qui en est fait (par exemple l'arrosage de jardins urbains).

Un tel réseau peut également présenter de nombreux intérêts concernant d'autres aspects, comme :

- le suivi en continu des niveaux, de la température, de la conductivité des eaux souterraines ;
- l'appréciation des relations entre la nappe et les eaux superficielles (cours d'eau et zones humides) ;
- la gestion du risque de remontée de nappe afin de mieux protéger des infrastructures (futures constructions ou installations existantes) ;
- la gestion des désordres sur le bâti (tassements, différentiels, dissolution de gypse…), suite à des variations des niveaux d'eau.



Réseau de suivi qualitatif et quantitatif des eaux du SAGE de l'Est Lyonnais (source : SAGE Est Lyonnais, 2013)

ÉTAPES DE LA MÉTHODOLOGIE

- Réflexions préalables :
  - définir le contexte (géologie, hydrogéologie, hydrologie, hydrogéochimie) ;
  - identifier des lacunes de connaissance ;
  - définir le ou les objectifs du suivi et les éventuels secteurs stratégiques (captage à protéger, suivi d'un panache de pollution, zone industrielle en cours de reconversion…).
- Conception du réseau :
  - quels secteurs prioritaires (selon les objectifs) ?
  - quelle densité (nombre) ?
  - quelle nappe surveiller (niveau crépiné) ?
- Conception du programme de surveillance :
  - quels paramètres ?
  - quelle fréquence ?
  - quel échantillonnage (comment prélever) ?
- Interprétation et restitution des résultats :
  - diffusion et utilisation des données ?
  - pérennité du réseau ?

Le BRGM vous sollicite pour recueillir votre avis et apprécier vos besoins.

Contacts :

Mme Xxxx Xxxxx
x.xxxxx@xxxx.xx
00.00.00.00.00

M Xxxx Xxxxx
x.xxxxx@xxxx.xx
00.00.00.00.00

BRGM
Centre scientifique et technique
3, avenue Claude – Guillemin
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2
www.brgm.fr

Ce projet est mené par le BRGM, avec l'appui de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
Liberté Égalité Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Edition 2020

Présentation lors des entretiens individuels

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

- **Retours d'expérience et état des lieux** à l'international (guides méthodologiques et réseaux piézométriques existants en milieu urbain)
- **Réflexion sur une méthodologie** pour une gestion de la ressource en eau adaptée au milieu urbain : définition du contexte, conception et faisabilité d'un réseau de surveillance
- **Application de la méthodologie** au cas de l'agglomération lyonnaise : étude de faisabilité

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

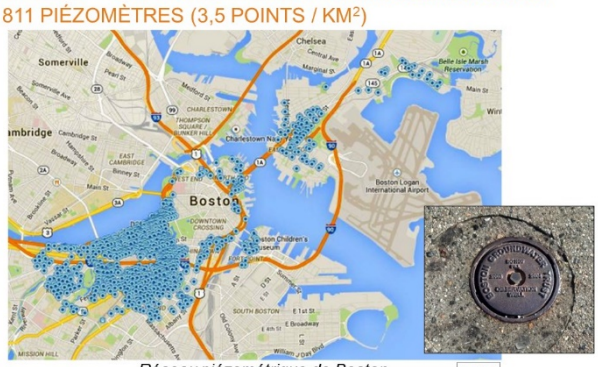
OBJECTIFS D'UN RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE URBAIN

- Amélioration du suivi des eaux souterraines en milieu urbain, pour une meilleure connaissance :
  - des directions d'écoulements ;
  - des niveaux d'eau ;
  - de la qualité de la nappe.

  afin de venir en appui de problématiques de pollution.
- Prise en compte des eaux souterraines dans la stratégie urbaine et foncière

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

BOSTON - ETATS-UNIS : 232 KM² ET 670 000 HABITANTS 811 PIÉZOMÈTRES (3,5 POINTS / KM²)



Réseau piézométrique de Boston (source : http://www.bostongroundwater.org, 2018)

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

BOSTON - ETATS-UNIS

Contexte et objectifs

- Dégradation des pilotis en bois des anciens bâtiments suite à la baisse des niveaux
- Enjeu économique : travaux sur un hôtel de ville de Milwaukee (Wisconsin, USA) estimés à 60 M$ (environ 50 M€)

Méthodologie

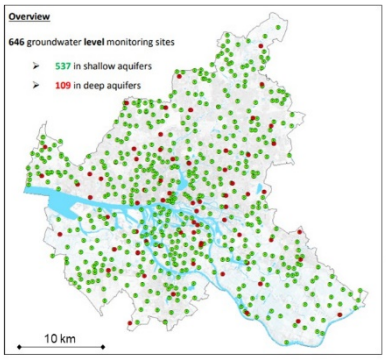
- 1986 : création du Boston Groundwater Trust (BGwT)
- Création d'un réseau de 811 piézomètres (densité très importante) sur le trottoir
- Surveillance des niveaux (campagnes manuelles et enregistreurs) et alerte (fuites, seuil de niveau bas…)

➡ **Modèle d'un réseau pérenne :**

- Fédération de l'ensemble des acteurs locaux (mairie, associations de voisinage, …) et de l'Etat du Massachusetts
- Intégration des ouvrages au cadastre (pérennisation)
- Communication importante : Site internet, bilans mensuels, conférences, application mobile…

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

HAMBOURG - ALLEMAGNE : 755 KM² ET 1,8M HABITANTS
646 PIÉZOMÈTRES DONT 167 QUALITOMÈTRES (0,2PTS/KM²)



Réseau piézométrique de Hambourg (source : BSU Geological Survey, 2018)

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

HAMBOURG – ALLEMAGNE

Contexte

- Origine de l'eau potable: les eaux souterraines (100%)
- Risques importants de pollutions des eaux souterraines par différentes sources: agricoles (nitrates et pesticides), sols industriels contaminés, infiltration d'eaux usées… particulièrement dans l'aquifère superficiel
- Salinité des eaux (dôme de sel)
- Risque d'inondation par remontée de nappe
- De nombreux ouvrages d'eaux souterraines (plus de 4 000) mais mal gérés, coûteux et ne permettant pas un suivi efficient des eaux souterraines

Objectifs

- Protection de la ressource en eau
- Gestion et surveillance optimale des eaux souterraines

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

HAMBOURG – ALLEMAGNE

Méthodologie

Modèle d'un réseau mutualisé, répondant à plusieurs problématiques

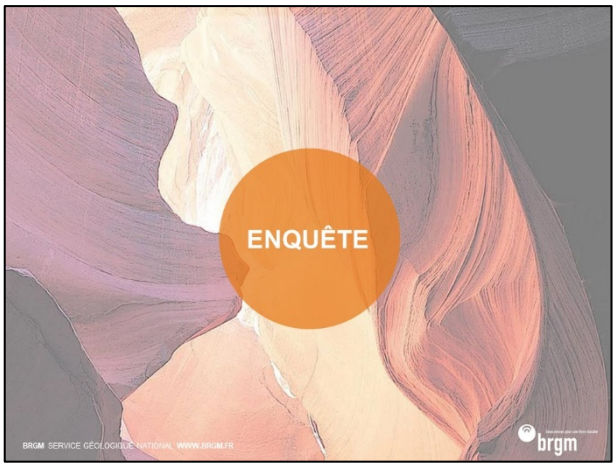
- 4 000 points d'observations : sélection des ouvrages en fonction de différents paramètres (aquifère, risque, …) :
  - 646 piézomètres conservés (543 dans l'aquifère superficiel et 112 dans l'aquifère profond) : enregistreurs et seuils d'alerte
  - dont 167 qualitomètres (99 aquifère superficiel et 68 aquifère profond)
- Développement d'un modèle géologique en 3D et amélioration du modèle hydrogéologique de la ville
- Mise en place d'un système d'utilisation des données collectées (site internet http://www.geoportal-hamburg.de/Geoportal/geo-online/)
- Connaissances mises à jour régulièrement (site internet) :
  - Sens d'écoulement et impact des prélèvements
  - Qualité des eaux et intrusion saline (conductivité)
  - Echange nappe – rivière
  - Secteurs à protéger

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

DÉMARCHE PROPOSÉE

Phase 1 Définition du contexte	- Inventaire des données existantes - Contexte hydrogéologique : compréhension du système aquifère, relations entre les aquifères, écoulements des eaux souterraines, relations avec les cours d'eau… - Foncier : historique de l'occupation des sols, usages des sols et des eaux souterraines, évolutions prévues… - Pollution des sols et des eaux souterraines : pollutions historiques, pollutions potentielles…
Phase 2 **Priorisation des zones et** Définition des objectifs du réseau de suivi	- Enquête auprès des acteurs du foncier et de l'eau - Analyses des données cartographiques et des chroniques de qualité - Cartographie de la vulnérabilité de la nappe à la pression urbaine (passée, actuelle et future)
Phase 3 Définition du réseau de suivi et des outils de diffusion	Définition des campagnes d'analyses (densité selon les secteurs, fréquences, paramètres…) - Sélection des ouvrages de suivis, selon les objectifs (secteurs et paramètres) Mise en place des outils de bancarisation et de diffusion des données
Phase 4 **Utilisation et Optimisation du réseau de suivi**	Etat initial : réalisation d'une campagne « large » (panel large d'ouvrage, analyses, niveaux) - Retour d'expériences sur le suivi antérieur et la campagne « large » - Intégration de nouveaux secteurs stratégiques - Redéfinition des points suivis et des campagnes d'analyses (densité selon les secteurs, fréquences, paramètres…)

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR



BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

Déroulé

Intérêt(s) de disposer d'un réseau piézométrique en milieu urbain

Données sur l'existant et retour d'expérience

Secteurs d'intérêt

Diffusion des données

Pérennité des ouvrages

Financement

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE

Intérêts de disposer d'un réseau piézométrique en milieu urbain

- A1: Quelles sont les problématiques de la métropole de Lyon sur
  - Les eaux souterraines (quantité et qualité)
  - Le sous-sol
  - Le sol (qualité)
- A2: Quels sont les besoins en termes de surveillance des eaux souterraines ?

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

DONNÉES EXISTANTES

Réseau piézométrique

- B1: Êtes-vous gestionnaire d'un réseau piézométrique (quantité/qualité) ?
- B2: Quel sont ses objectifs ?
- B3: Comment sont exploitées vos données ?
- B4: Comment sont diffusées vos données ?

Retours d'expérience

- B5: Votre réseau piézométrique répond-il aux objectifs initiaux ? Pourquoi ?
- B6: Quels sont ses points forts / points faibles ?
- B7: Est-ce que vous verriez des améliorations (nombre de points, fréquence d'acquisition des données, paramètres suivis, diffusion des données, ...) ?
- B8: Quels sont les freins (financiers, techniques…) ? Quelles sont les pistes pour lever ces verrous ?

DONNÉES EXISTANTES

Données sur la qualité des sols et des eaux souterraines

- C1: Connaissance sur les pollutions avérées : fond géochimique urbain, pollutions ponctuelles et panaches de pollution ?
- C2: Connaissance sur les pollutions potentielles : historique de l'usage des sols ?

Données sur les niveaux et les écoulements des eaux souterraines

- C3: Connaissance sur les niveaux d'eau : battement des nappes, inondation par remontée de nappe, surexploitation ?
- C4: Connaissance sur les écoulements : carte piézométrique, influence des ouvrages souterrains, des pompages ?

BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

SECTEURS

Secteurs d'intérêt

- D1: Quels sont les secteurs d'intérêt actuels et futurs ?
- D2: Existe-t-il une ou des problématiques particulières sur ces secteurs ?
  - Source : pollution avérée ou potentielle (industrielle, agricole, remblais, transport, réseau fuyard, …)
  - Vecteur : nappe vulnérable, remontée de nappe au droit d'une friche industrielle,…
  - Cibles et enjeux : secteur à préserver pour l'eau potable, sensibilité sanitaires (captages AEP, jardins potagers, écoles,…), écosystème sensible,…

Secteurs prioritaires

- D3: Définir un ou des secteurs prioritaires et la ou les problématiques sur lesquels on pourra se focaliser pour tester la méthodologie.

CONVAINCRE ET FÉDÉRER

Diffusion des données

- E1: Seriez-vous intéressés pour avoir accès à des données autres que les vôtres ? Si oui, lesquelles
- E2: Quelles soent les conditions de diffusion de vos données ?
- E3: Sous quelle forme les données pourraient être diffusées (site internet en accès libre/restreint, base en interne, …) ?

Pérennité

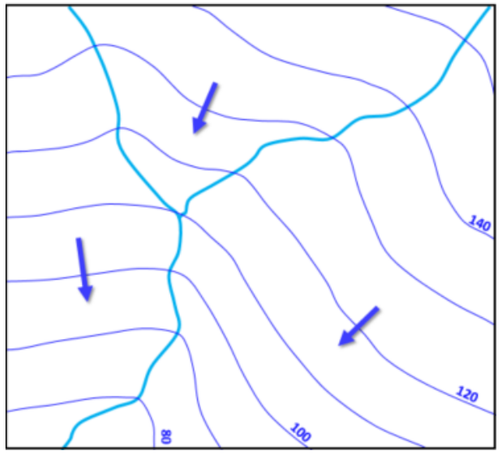
- E4: Comment assurer la pérennité du réseau piézométrique (depuis les ouvrages et les campagnes jusqu'à la diffusion des données)

Convaincre les financeurs

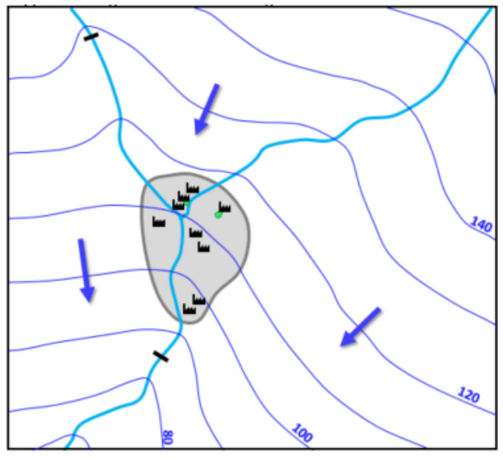
- E5: Quels arguments mettre en avant pour convaincre les élus et les financeurs potentiels ?
- E6: Connaissez-vous un exemple concret où un réseau aurait été utile (éviter une dépollution, mise en place de servitudes, …)

Présentation schématique de l'évolution d'une ville française et de ses réseaux de surveillance, de 1850 à 2019

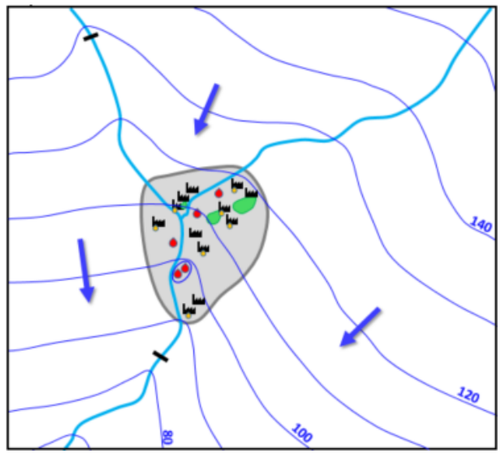
Milieu naturel non urbanisé



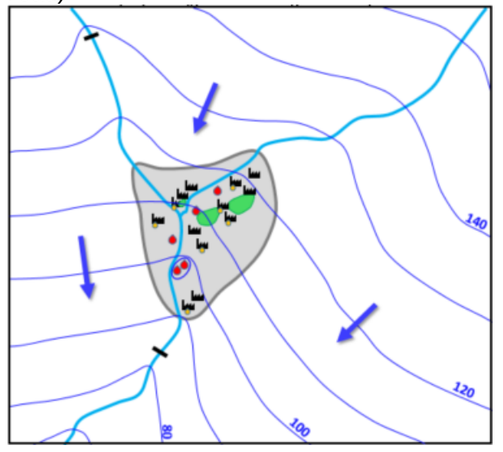
1850 – 1900 : Révolution industrielle
Apparition de grandes villes et aménagement de cours d'eau



1850 – 1900 : Révolution industrielle
Exploitation des eaux souterraines

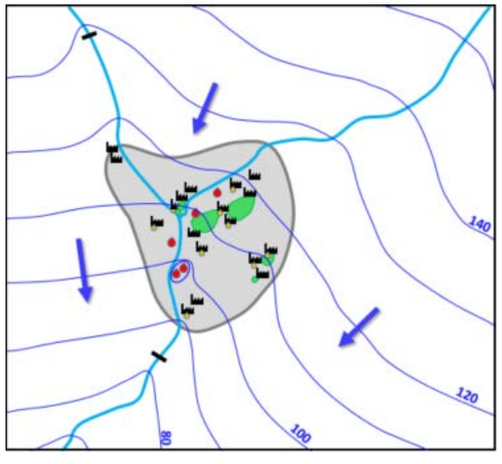


1850 – 1900 : Révolution industrielle
1898 : Loi du 08/04/1989 (gestion des usages de l'eau)

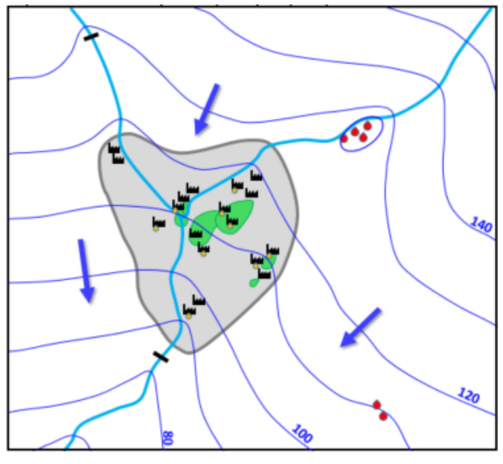


1900 – 1950 : Urbanisation et industrialisation

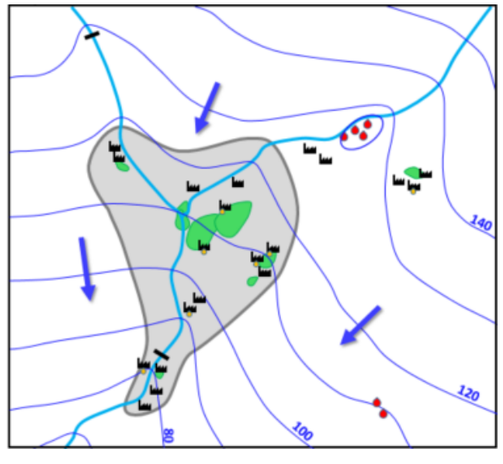
Développement et industrialisation des villes



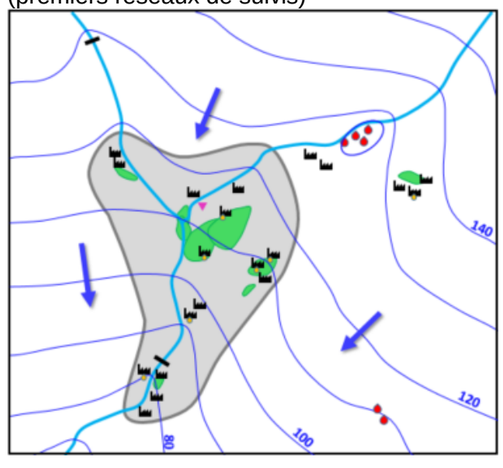
1950 – 1980 : Urbanisation et désindustrialisation des villes
Protection de l'eau potable (champs captant)



1950 – 1980 : Urbanisation et désindustrialisation des villes
Déplacement des activités industrielles



1950 – 1980 : Urbanisation et désindustrialisation des villes
1964 : Loi sur l'eau n°64-1245 du 16/12/1964 (premiers réseaux de suivis)

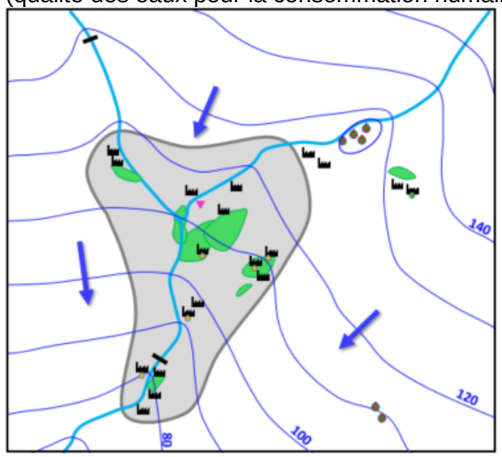


Aménagement et impact du milieu urbain
- Agglomération
- Activité industrielle
- IOTA (travaux)
- Barrière hydraulique et drain
- Pompages
- dont captage AEP
- Panache de pollution

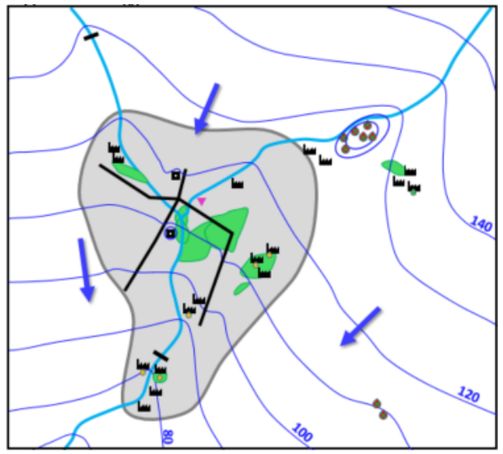
Milieu naturel
- Cours d'eau
- Isopièzes
- Sens d'écoulement

Réseaux de surveillance
- Global - Quantité
- Global - Qualité
- Local - eau potable
- Local - IOTA
- Local – ICPE
- Autre (alerte, investigation…)

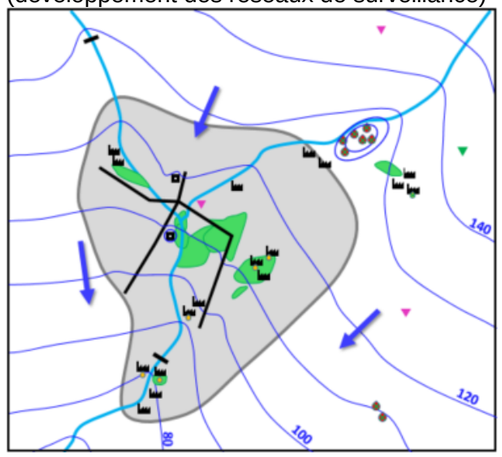
1950 – 1980 : Urbanisation et désindustrialisation des villes
1980 : Directive 80/778/CEE du 15/07/1980 (qualité des eaux pour la consommation humaine)



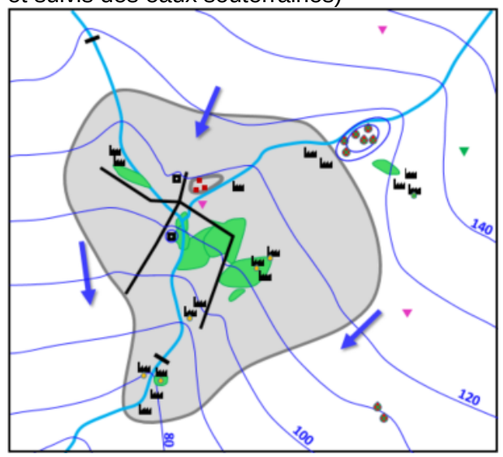
1980 – 2010 : Reconquête du sol et du sous-sol urbain
Apparition des grandes agglomérations et densification du tissu urbain



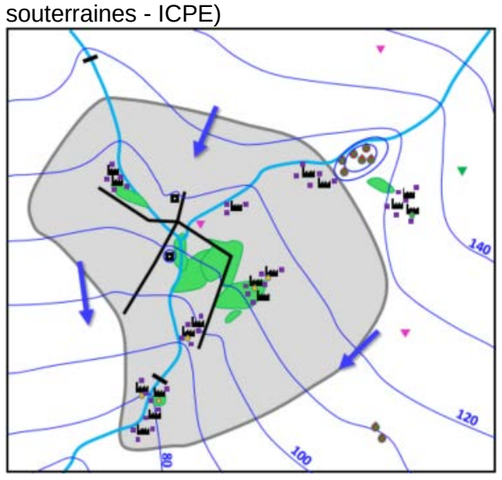
1980 – 2010 : Reconquête du sol et du sous-sol urbain
1992 : Loi sur l'eau n°92-3 du 03/01/1992 (développement des réseaux de surveillance)



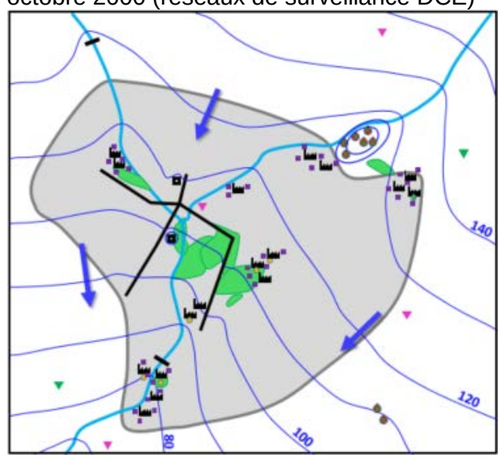
1980 – 2010 : Reconquête du sol et du sous-sol urbain
1992 : Loi sur l'eau n°92-3 du 03/01/1992 (IOTA et suivis des eaux souterraines)



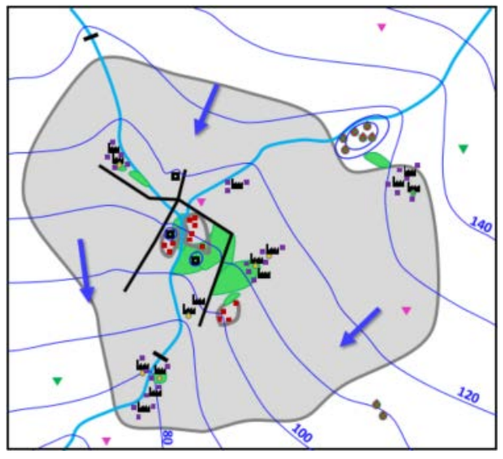
1980 – 2010 : Reconquête du sol et du sous-sol urbain
1998 : Arrêté du 02/02/1998 (suivis des eaux souterraines - ICPE)



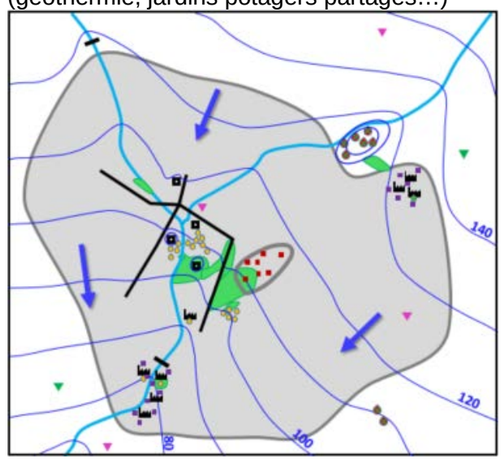
1980 – 2010 : Reconquête du sol et du sous-sol urbain
2000 : Directive européenne 2000/60/CE du 23 octobre 2000 (réseaux de surveillance DCE)



1980 – 2010 : Reconquête du sol et du sous-sol urbain
Reconversion des friches industrielles



1980 – 2010 : Reconquête du sol et du sous-sol urbain
Nouvelles utilisations de la ressource en eau (géothermie, jardins potagers partagés…)

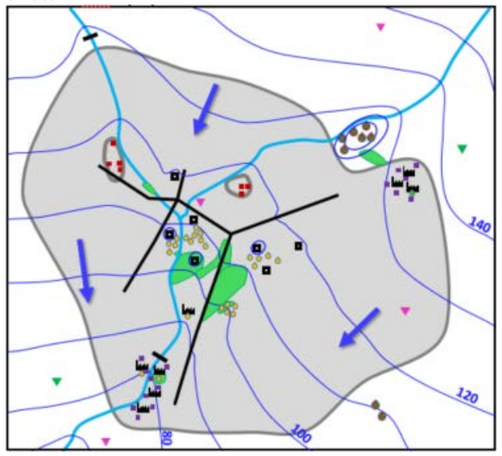


Aménagement et impact du milieu urbain
- Agglomération
- Activité industrielle
- IOTA (travaux)
- Barrière hydraulique et drain
- Pompages
- dont captage AEP
- Panache de pollution

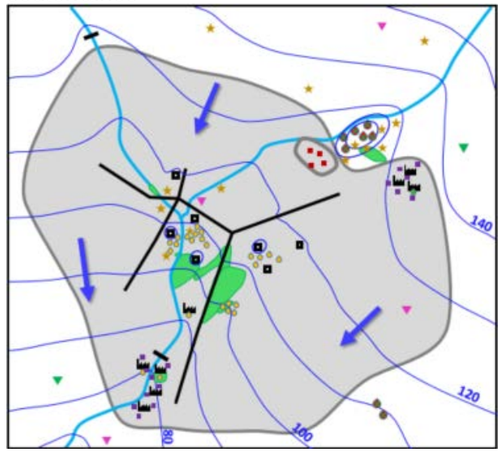
Milieu naturel
- Cours d'eau
- Isopièzes
- Sens d'écoulement

Réseaux de surveillance
- Global - Quantité
- Global - Qualité
- Local - eau potable
- Local - IOTA
- Local – ICPE
- Autre (alerte, investigation…)

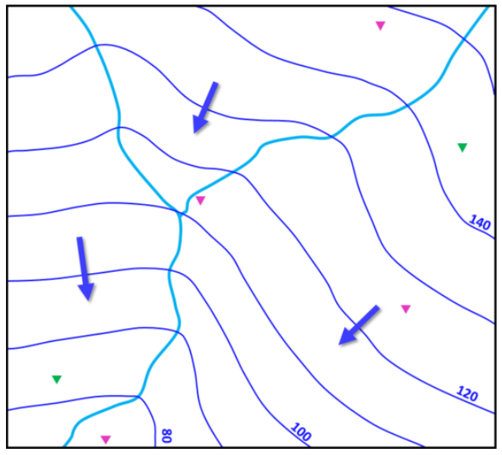
2010 – … : Densification des centres-villes
2014 : Loi Alur 26/03/2014 - Densification du tissu urbain



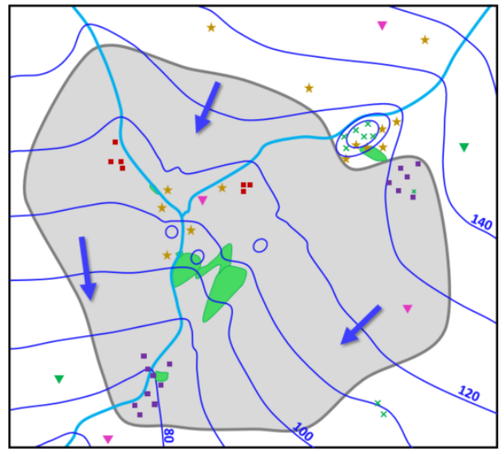
2010 – … : Densification des centres-villes
Nouveaux réseaux de surveillance des eaux souterraines



Milieu non urbanisé
Réseaux de surveillance des eaux souterraines



Milieu urbanisé
Réseaux de surveillance des eaux souterraines



Aménagement et impact du milieu urbain
- Agglomération
- Activité industrielle
- IOTA (travaux)
- Barrière hydraulique et drain
- Pompages
- dont captage AEP
- Panache de pollution

Milieu naturel
- Cours d'eau
- Isopièzes
- Sens d'écoulement

Réseaux de surveillance
- Global - Quantité
- Global - Qualité
- Local - eau potable
- Local - IOTA
- Local – ICPE
- Autre (alerte, investigation…)

Annexe 4

Restitution des entretiens menés avec les acteurs du sol et du sous-sol de l'agglomération de Lyon

Les 14 entretiens individuels des acteurs du sol et du sous-sol de l'agglomération de Lyon se sont déroulés en juillet 2018 et ont permis de rencontrer 26 personnes parmi les structures suivantes :

- Métropole de Lyon – Direction de l'Eau ;
- Métropole de Lyon – Direction Foncier & immobilier ;
- Métropole de Lyon – Service écologie et développement durable ;
- Ville de Lyon – Service Stratégie immobilier ;
- Ville de Lyon – Service Santé-environnement ;
- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse ;
- SAGE Est-Lyonnais ;
- DREAL Auvergne-Rhône-Alpes ;
- DREAL UD 69 – Inspecteurs des installations classées ;
- DDT 69 – Service Eau et Nature (Police de l'eau) ;
- Compagnie Nationale du Rhône (CNR) - Pôle domanial ;
- Transports en commun lyonnais (TCL) - Sytral (Direction des équipements et du patrimoine) ;
- Transports en commun lyonnais (TCL) – Kéolis (Hygiène Sécurité et Environnement) ;
- BRGM – Direction régionale de Lyon.

Les restitutions ont été réalisées lors d'une réunion le 5 décembre 2018 au BRGM de Villeurbanne, sous la forme d'une présentation retranscrite ci-après.

1. Réseaux de suivi des eaux souterraines existants

1.1. Réseaux de connaissance générale

Objectifs :

- Disposer d'une vision globale de l'état des eaux souterraines en suivant l'évolution spatio-temporelle de la qualité et des niveaux
- Avoir une meilleure de connaissance des caractéristiques des nappes:
    - Hydrodynamique : niveaux, sens d'écoulement, relation entre les nappes, relations avec les eaux superficielles…
    - Hydrochimie : fond hydrogéochimique…
- Atteinte du bon état DCE Qualité et Quantité
- Suivi des actions mises en œuvre

Organismes et réseaux de suivi des eaux souterraines existants :

- Agence de l'eau - Qualité
- BRGM – Quantité

Secteurs : Masse d'eau, aquifère

Densité :

- Nappe libre et nappe alluviale : 0,002 point / km^2 (DCE : 1/500)
- Nappe majoritairement captive : 0,0003 point / km^2 (DCE : 1/3000)

Localisation :

- Répartition homogène
- Ouvrages représentatifs de la masse d'eau (non influencés)

Diffusion des données : ADES

1.2. Réseaux d'alerte

Objectifs :

- Satisfaire les exigences sur la qualité et les niveaux des eaux souterraines, en adéquation avec l'usage des eaux souterraines et des sols
- Surveillance de l'eau potable – Producteurs d'eau
    - Contrôle sanitaire des captages AEP
    - Protection des captages AEP: 5 pts à Crépieux-Charmy et 7 à 10 pts depuis 6 ans à Meyzieu La Garenne (périmètre de protection éloigné)
- Gestion des inondations par remontées de nappe – Métropole de Lyon
- Répartition des prélèvements et gestion des étiages - SAGE de l'Est Lyonnais
- Identification et suivi des pollutions diffuses et ponctuelles - SAGE de l'Est Lyonnais
- Suivi des actions mises en œuvre

Organismes et réseaux de suivi des eaux souterraines existants :

- Producteurs d'eau - Qualité
- Métropole de Lyon – Quantité
- SAGE de l'Est Lyonnais – Qualité et quantité

Secteurs : Champ captant, ville, aquifère

Densité : selon l'objectif - 0,06 (SAGE) à 0,64 (Métropole) point / km2

Localisation : selon l'objectif

- Répartition homogène
- Ouvrages en amont d'un enjeu à protéger (AEP) et/ou en aval d'une pollution connue

Diffusion des données :

- ADES (diffusion)
- Rapports téléchargeables sur le site du SAGE (interprétation)
- Convention (diffusion des données)

1.3. Réseaux d'investigation (échelle du site)

Objectifs :

- Evaluer l'impact d'un site sur les eaux souterraines (qualité et quantité)
    - Estimation de l'impact du site présentant un risque pour la qualité, les écoulements et les niveaux
    - Suivi de l'impact des éventuelles actions mises en œuvre
- Sites suivis :
    - Chantiers (IOTA = Installations, Ouvrages, Travaux et Aménagements soumis à autorisation ou à déclaration)

- Site industriel (ICPE = Installations Classées pour la Protection de l'Environnement)
- Aménagement du cours d'eau - Barrage de Pierre-Bénite (CNR) et du canal de Jonage (EDF)
- Aménagements souterrains – Non concerné (tunnels et nouveaux parking principalement en parois étanches, anciens parkings avec pompages (Part Dieu, Brotteaux) - pas de suivis des niveaux)

Organismes et réseaux de suivi des eaux souterraines existants :

- IOTA – Qualité et quantité
- ICPE – Qualité et quantité
- CNR (sud Rhône) et EDF (nord Rhône) – Quantité

Secteurs : Site (site industriel, chantier, aménagement)

Densité :

- minimum 3 pts / site
- exemple IOTA : 8-10 pts sur Part Dieu
- CNR : 10 pts le long du Rhône (sud)

Localisation : Répartition Amont = Non influencé / Aval = Influencé

Diffusion des données :

- ADES (diffusion)
- Rapport papier non valorisé (diffusion et interprétation)
- Convention (CNR)

1.4. Conclusions

Réseaux existants :

- Nombreux réseaux complémentaires : connaissance générale, alerte, impact
- Réseaux non pérennisés : IOTA, ICPE
- Réseaux définis pour répondre à une problématique précise
- Suivi de la quantité (niveaux d'eau) presque toujours associé au suivi de la qualité des eaux souterraines

2 échelles :

- Vision globale (masse d'eau, aquifère, ville)
- Vision locale au site (site industriel, chantier, aménagement, champ captant)

Densité : variable selon l'objectif

Localisation : variable selon l'objectif

- Répartition homogène et ouvrages représentatifs
- Répartition Amont = Non influencé / Aval = Influencé

Diffusion des données

- ADES

- Base de données interne
- Rapport papier
- Peu de valorisation (interprétation des données) et peu de croisement de données entre réseaux

2. Enjeux d'un réseau de surveillance – problématiques et secteurs

2.1. Objectifs d'un réseau de suivi des eaux souterraines en milieu urbain

Vision générale ou Vision locale : manque une interface entre les deux

- Approche globale sur la qualité et les niveaux des eaux souterraines : fond hydrogéochimique urbain (bruit de fond), sens d'écoulement généraux
- Réseau de surveillance : connaître les pollutions historiques, évaluer leurs géométries et suivre la migration des panaches + estimer les perturbations des écoulements et des niveaux
- Réseau d'alerte : détecter les nouvelles pollutions et identifier les sources de pollution

Mutualiser les données

- Optimiser les réseaux et les financements
- Anticiper le suivi sur des futurs secteurs stratégiques (AEP, reconversion foncière…)
- Suivi de plus nombreux polluants : agricole, industriel, émergent (molécules pharmaceutiques, dérivés des plastifiants…), surnageant et plongeant…

Répondre aux multiples problématiques des acteurs du milieu urbain

2.2. Problématiques remontées

Protection et gestion de la ressource

- Anticiper les pollutions, caractériser les panaches de pollutions et remonter à la source
- Protéger à long terme les captages AEP (pollutions agricoles et sites et sols pollués) et faciliter le suivi, le contrôle et les actions à proximité de sites, situés en amont des captages AEP et ayant un risque de pollution
- Avoir une meilleure vision quantitative et qualitative pour la gestion des prélèvements

La présence d'un réseau de surveillance apporterait une meilleure connaissance de l'étendue d'un panache de pollution, afin de savoir exactement où placer les piézomètres de surveillance ou afin de pouvoir délimiter des zones d'exclusions pour un usage domestique.

L'acquisition de données permettrait d'instruire plus facilement une déclaration d'utilité publique, (captages d'eau potables ou prélèvements pour d'autres usages), notamment en cas de proximité d'un site BASOL ou BASIAS ou d'une pollution historique caractérisée.

La mise en place d'un réseau de surveillance permettrait de visualiser l'impact des actions prises pour lutter contre des pollutions des eaux souterraines. Lors, par exemple, d'une pollution ponctuelle, un arrêté est pris pour restreindre l'usage des eaux souterraine dans une certaine zone correspondant à l'emprise du site ou au secteur impacté estimé. Cependant il arrive que cette zone de restriction ne soit pas assez étendue par le manque de connaissance.

Protection des écosystèmes en lien avec les eaux souterraines

- Préservation de la biodiversité (ENS, Natura 2000, ZNIEFF, zones humides…)
- Usage récréatif des eaux de surface (lac de Mirbel-Jonage)

Connaissance sur le fond géochimique naturel et anthropique

Il est indispensable de connaître le fond géochimique naturel et anthropique des eaux souterraines afin de pour pouvoir caractériser et suivre un panache de pollution ponctuel et de rechercher une source de pollution ponctuelle bien précise. En effet le fond géochimique permet d'avoir un état de référence de la qualité des eaux souterraines, notamment par une meilleure connaissance des pollutions diffuses.

Plusieurs rapports dressent la liste des zones à risques de fond géochimique naturel sur les eaux souterraines de l'agglomération lyonnaise : l'arsenic, le nickel, le baryum et le fluor avec un indice de confiance moyen (Blum A. et al., 2006 ; Brenot A. et al., 2006 ; Brusse J.F., 1980 ; Sonney R. el al., 2005). De fortes teneurs, au-delà des normes de potabilité, en fer et manganèse d'origine naturelle peuvent être rencontrées dans les nappes alluviales du Rhône et de la Saône. Du cadmium peut être libéré sous forme dissoute dans les eaux souterraines en provenance des sédiments issus des massifs avoisinants. Enfin, les teneurs en arsenic contaminant les eaux de surfaces en amont de Lyon proviennent d'un bruit de fond engendré par les massifs cristallins et ses nombreuses fractures.

Sites industriels et chantiers - sites et sols pollués

- A l'échelle d'un site
  - Caractéristiques des ouvrages (sens d'écoulement et positionnement des piézomètres amont/aval, niveau crépiné) et des analyses (paramètres, fréquence)
  - Fond hydrogéochimique de référence opposable : interprétation des analyses
- En aval et hors d'un site
  - Suivi des panaches en aval
  - Visualiser les impacts globaux sur les ouvrages voisins et des actions mise en œuvre
- Sites non suivis
  - Alerte sur des pollutions et détection des sources
  - Mise en œuvre d'actions

Un réseau de suivi peut servir à suivre la qualité des eaux souterraines provenant de sites qui sont soumis à simples déclaration auprès de la Préfecture. L'impact des stations-services sur la qualité des eaux souterraines est prouvé mais, à ce jour, pour environ 90% d'entre-elles, il n'existe pas de suivi des eaux souterraines.

Reconversion foncière

- Avant : connaître les contraintes foncières lors de l'instruction des projets d'aménagements, dimensionner le chantier (débits de pompage, dépollution, remobilisation de panaches) et le projet (utilisation des eaux, risques sanitaires et de remontée de nappe, température si projet de géothermie)
- Pendant : impact du chantier et aide pour le suivi des eaux souterraines
- Après : impact du projet et impact cumulé

Impact des remblais sur la qualité des eaux souterraines (métaux)

Gestion des risques

- Remontée de nappe et relation avec les cours d'eau
- Glissements de terrain

Une connaissance des relations entre les nappes et les rivières est importante pour les problématiques d'inondations et de remontées de nappes. En plus de pouvoir provoquer des dégâts au niveau des infrastructures, les remontées de nappes augmentent la vulnérabilité des eaux souterraines aux différentes pressions. Les polluants contenus dans les sols, issus d'une agriculture intensive ou de sites industriels, atteignent plus rapidement et en quantité plus importante la nappe (diminution de la zone non saturée, lessivage des sols).

Réinfiltration en nappe des eaux pluviales

- Impact sur la qualité
- Impact sur la recharge (niveaux)

Visualisation de l'impact du changement climatique

Le suivi de l'évolution de la qualité et des niveaux des nappes, du fait du changement climatique, permettrait d'anticiper les problèmes liés à la production d'eau en fonction des différents usages (eau potable, industriel, irrigation…).

Observatoire de la géothermie : niveaux et température

Communiquer et alerter les utilisateurs en cas de restrictions d'usage, de risques avérés

2.3. Secteurs prioritaires

Les secteurs stratégiques concernent principalement les nappes des alluvions récentes et des alluvions fluvioglaciaires. La nappe profonde de la molasse est suivie pour sa gestion et sa protection. Les autres nappes ne sont pas considérées comme stratégiques.

Pollutions connues : réseau d'investigation (aide pour la prise de décision - paramètres, extension de la pollution, arrêt de l'interdiction)

- Arrêtés municipaux
    - Arrêté – Quincieux : COHV et protection AEP
    - Arrêté - Collonges-au-Mont-d'Or : hydrocarbures
    - Arrêté – Villeurbanne : solvants chlorés
    - Arrêté 06/07/2009 - Lyon 7 : solvants chlorés (tétrachloroéthylène)
    - Arrêté 19/03/2014 - Lyon 8 : PCB, fluorène, hydrocarbures légers, chlorobenzènes
- Pollutions historiques non délimitées
    - Couloirs fluvioglaciaires de l'est lyonnais : pollution historique en solvants chlorés et pollution diffuse agricole
    - Lyon 9° Vaise : molybdène et manganèse
    - Vallée de la chimie (Feyzin Solaize) : pollution historique et relation avec le Rhône

Du fait de son passé industriels, l'agglomération lyonnaise abrite de nombreux sites et sols potentiellement pollués (Clozel Leloup B., 2018). Ces derniers se concentrent principalement dans les secteurs historiquement industrialisés : vallée de la chimie (Feyzin et Solaize), complexe pétrolier du port Lyon Edouard Herriot, zones d'activités de Vénissieux, Villeurbanne, Chassieu, Meyzieu, Collonges-au-Mont-d'Or, Givors… La plupart des sites se situent en zone alluviale, où la nappe est présente faible profondeur est fortement vulnérable. Les pollutions connues font

l'objets d'arrêtés municipaux interdisant ou limitant la consommation des eaux souterraines. Toutefois, les pollutions historiques sont le plus souvent mal connues et non délimitées.

La forte pression agricole dans les couloirs fluvioglaciaires engendre des teneurs importantes en nitrates, ponctuellement supérieures à 50 mg/l, dans les eaux souterraines et notamment en partie centrale et amont du couloir de Meyzieu, en partie amont du couloir de Décines et en partie amont du couloir d'Heyrieux (SAGE Est-lyonnais, 2015 et Asconit Consultants, 2017). Par ailleurs, des analyses ont également révélé la présence de pesticides (bentazone, dinoterbe, traces d'atrazine) notamment dans le couloir de Meyzieu. Enfin des éléments issus de solvants chlorés ont été détectés en aval de zones industrielles ou urbaines. Le développement du tissu urbain sur ce territoire laisse donc présager une augmentation des concentrations de ces éléments si aucun outil de régulation n'est entrepris (SAGE Est-lyonnais, 2015 et Asconit Consultants, 2017).

Protection de la ressource : réseau d'alerte (suivi de panaches et recherche de sources de pollution notamment industrielles)

- Amont des captages AEP :
    - Crépieux-Charmy (couloir fluvioglaciaire de Décines : de Chassieu à Vaulx-en-Velin et Décines) – sites et sols pollués (pyralène, trichloroéthylène) et reconversion ZAC
    - Décines-Meyzieu (fin du couloir fluvioglaciaire de Meyzieu) – sites et sols pollués (solvants chlorés)
    - Corbas-Mions (couloir fluvioglaciaire) – sites et sols pollués
    - Île du Grand Gravier (ouest de Givors, sous l'échangeur A7-A47) avec station d'alerte en amont - sites et sols pollués
- Amont des écosystèmes en relation avec les eaux souterraines : vallée amont du Rhône et lac de Miribel-Jonage

La zone de captage de l'île de Miribel Jonage est le dispositif d'alimentation en eau potable principal de la ville de Lyon. Elle est située au nord-est au confluent du Rhône, du vieux Rhône et du canal de Jonage, puisant dans les alluvions du Rhône (épaisseur 20 m) et se retrouve tributaire à environ 85% du Rhône (Mongereau, 2008). Le développement du réseau de surveillance doit pouvoir intégrer l'enjeu d'une ressource future à protéger en favorisant des points de mesures quantité/qualité sur un futur secteur stratégique.

Reconversion de friches industrielles : réseau d'alerte et de connaissance

- Aménagements en cours : Confluence à Lyon, Carré de soie à Villeurbanne et Vaulx-en-Velin
- Reconversions foncières prévues (anciens sites industriels vers habitations avec nouveaux usages des eaux)
    - Lyon 9° Vaise (pollutions historiques avérées)
    - Lyon 3° Part-Dieu
    - Villeurbanne (Grand Clément, Gratte-Ciel, Saint Jean)
    - Lyon 7° Gerland et port Edouard Herriot (solvants chlorés, naphtalène et benzène)
    - Lyon 2° Confluence (pollutions historiques avérées)

Depuis une dizaine d'années, la Métropole de Lyon a amorcé une reconquête des friches industrielles, du fait d'une forte pression démographique et d'une volonté de densification du tissu urbain. L'intégration de connaissances sur les eaux souterraines permettrait d'anticiper les projets d'aménagement et les changements d'usages des sols et des eaux.

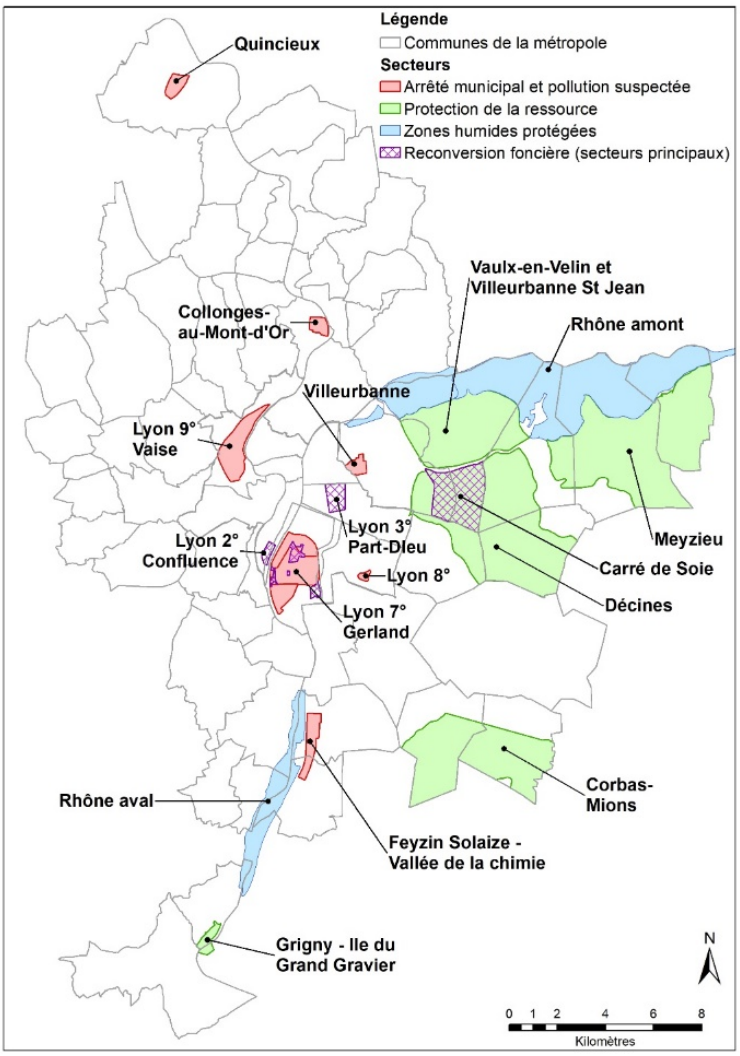
Nappe des alluvions modernes du Rhône et de la Saône

- Remontée de nappe et relation avec les cours d'eau (inondation et étiage) : Lyon et Villeurbanne (Rhône) et Lyon 9° Vaise (Saône)
- Ecosystèmes en relation avec la nappe : vallée amont du Rhône et lac de Miribel-Jonage

La presqu'île de Lyon et la rive gauche de la Saône au niveau de Vaise sont sujet à une problématique d'inondations liées aux remontées de nappes. Des secteurs sensibles aux inondations indirectes (réseaux, nappes) ont été établis par le service de navigation dans le cadre de l'amélioration de la prévention et de la protection vis-à-vis du risque inondation.

Nappe profonde de la molasse : gestion et protection

La ressource en eau de l'aquifère de la molasse miocène de l'Est lyonnais est moyennement importante, peu renouvelée, de bonne qualité et bien protégée (ANTEA, 2005). Elle constitue une ressource d'avenir pour les usages les plus exigeants (alimentation en eau potable, agroalimentaire). La connaissance de cet aquifère est cependant trop faible, du fait du faible nombre d'ouvrages de surveillance. Il semble nécessaire d'instaurer des mesures de protection sur cet l'aquifère.



Secteurs prioritaires évoqués lors des entretiens avec les acteurs de la métropoles de Lyon

3. Mise en œuvre d'un réseau de surveillance

3.1. Pérennité du réseau et des ouvrages

Pérennité des ouvrages

- Propriétaire privé
  - Signature d'une convention pour accès (gratuit, envoi des données)
  - Servitude avec rémunération
  - Environnement non maîtrisé (site dangereux, dégradation du point, vente)
- Domaine public
  - Chaussée : vandalisme, stationnement
  - Protection du site : espace clos ou protégé
- Déclaration des ouvrages, servitude d'utilité publique, inscription au cadastre
- Ouvrages fiables : protégés, conçus correctement, entretenus, non colmatés ou détériorés, non pollués…
- Suivi du protocole d'abandon des ouvrages

Pérennité du réseau

- Réseau répond à l'ensemble des objectifs fixés
- Moyens humains et financiers adaptés
- Protocole pour la fréquence de mise à disposition des données (selon objectifs : temps réel pour gestion de crise à annuel pour connaissance)
- Interprétation et valorisation des données

Campagnes d'analyse

- Campagne de terrain :
  - 1 unique préleveur
  - Norme de prélèvement respectée
- Analyses :
  - 1 unique laboratoire
  - Résultats détaillés

3.2. Mutualisation et diffusion des données

Conditions de diffusion des données

- Accès public / restreint / confidentiel
- Accès gratuit / payant (aménageurs)
- Indiquer le producteur / Anonymiser
- Validation de la donnée et préconisation pour l'utilisation

Portail de diffusion :

- Données numériques et espace cartographique
- Outils pour le croisement entre données (cartes piézométriques, foncier…)
- Outils de valorisation et d'alerte

3.3. Financement et coordination

Financeurs

- Co-financement par tous les bénéficiaires
  - Investissement initial
  - Fonctionnement sur le long terme et éventuel investissement ponctuel
- Financement privé : si incitation (retour sur investissement ou contrainte réglementaire)
- Financement public : réponses aux problématiques, au-delà de l'amélioration de la connaissance
- Convaincre :
  - Bilan coût d'investissement et de fonctionnement / bénéfices (financiers, temps, connaissance)
  - Outil pour la prise de décision pour la gestion et la préservation à long terme de la ressource (santé publique, risques)
  - Image de la ville : projets d'aménagement en adéquation avec l'environnement

Coordinateur du réseau

- Gestion par un organisme public, ayant la compétence sur l'ensemble du territoire
- Portage par un service indépendant : organiser le débat et ne pas perdre de vue les objectifs
- Rôle d'expert avec compétences techniques :
  - Fonctionnement du réseau : entretien des points, définition des campagnes d'analyses
  - Préconisations afin d'optimiser le réseau et les campagnes d'analyses
  - Bancarisation des données et développement d'outils de valorisation
  - Garant du suivi de l'ensemble des objectifs, lien avec tous les acteurs
  - Retours vers les services de l'Etat (bilans, diagnostic et alerte)
  - Communication au Public

Annexe 5

Détail des données à collecter et des sources de données

L'ensemble des données à collecter pour réaliser les différentes phases de la méthodologie sont détaillés ci-après.

1. Données sur les sources de pollution

1.1. Sources potentielles de pollution

Afin d'identifier les potentielles sources sols, plusieurs bases de données permettent de recenser un grand nombre d'activités industrielles et de service passés et actuelles. D'autres sources peuvent être potentiellement à l'origine d'une pollution : les réseaux de transport, les réseaux de collecte fuyards des eaux pluviales ou des eaux usées, les zones d'épandage, les cimetières…

- **BASIAS**

BASIAS constitue la base de données historique des sites industriels et activités de service (www.georisques.gouv.fr/dossiers/inventaire-historique-des-sites-industriels-et-activites-de-service-basias#). Cette base a été mise en place lors de la réalisation d'inventaires historiques régionaux (IHR), dans l'objectif de recenser tous les sites industriels abandonnés (ou non), susceptibles d'engendrer une pollution de l'environnement, afin de garder une traçabilité et permettre aux acteurs locaux d'avoir connaissances de l'existence de ces ouvrages. Cette base comprend plus de 300 000 sites.

Les données à disposition associées aux sites BASIAS sont notamment le code BASIAS du site, son adresse, ses coordonnées WGS84, la précision de la géolocalisation (adresse, centroïde commune, etc..), le code NAF, l'état d'occupation du site (en activité, activité terminée…). Les codes NAF correspondent aux demandes d'autorisation et aux déclarations. Un site BASIAS peut donc posséder plusieurs codes NAF et un même code NAF peut être répété plusieurs fois sur un site.

- **IHU**

Des inventaires historiques urbains (IHU) ont été réalisés sur certains territoires afin de cartographier précisément les sites industriels actuels et anciens. Les données et informations relatives aux sites industriels précédemment inventoriés dans BASIAS sont actualisées et complétées. L'objectif consiste en particulier à recueillir et mettre en forme des données traitant de différents aspects : historique, emprise(s), propriétaires, typologie des activités, géologie et vulnérabilité(s) potentielle(s) à l'effet d'échelle près, utilisation du foncier, études à objectifs environnementaux, opérations de réhabilitation…

- **Installations Classées**

Cette base inventorie les installations soumises à autorisation, à déclaration ou à enregistrement en construction, en fonctionnement ou en cessation d'activité (www.georisques.gouv.fr/dossiers/installations). La France compte actuellement environ 500 000 établissements relevant de la législation des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement), classées selon leur activité, la nature et la quantité de produits stockés ou mis en œuvre.

Les sites sont identifiés par leur nom associé à un code S3IC et au code principal NAF. Les coordonnées géographiques et la précision (coordonnées précises, adresse postale, centroïde commune) sont également renseignées.

- **Registre Français des Emission polluantes (IREP)**

Ce registre des rejets et des transferts de polluants (RRTP) est un inventaire national (www.georisques.gouv.fr/dossiers/irep-registre-des-emissions-polluantes):

- des substances chimiques et/ou des polluants potentiellement dangereux rejetés dans l'air, l'eau et le sol ;
- de la production et du traitement des déchets dangereux et non dangereux.

Les requêtes suivantes peuvent être réalisées :

- liste des établissements
- émissions
- prélèvements
- traitement de déchets dangereux
- traitement de déchets non dangereux
- production de déchets dangereux
- production de déchets non dangereux

Chaque requête génère un fichier et les données contenues pour chaque requête sont les suivantes :

- la liste des établissements permet d'avoir le nom des établissements en France devant transmettre les données de leurs émissions polluantes, leur code S3IC (sous forme XXX.XXXXX, par exemple 061.01326, formalisme différentes de ceux des fichiers ICPE), le code APE et les coordonnées au centroïde de la commune ;
- le fichier des émissions permet d'avoir la liste des établissements (nom et code S3IC) déclarant des émissions dans l'environnement et le poids rejeté en kg par an ;
- le fichier des prélèvements permet d'avoir la liste des établissements (nom et code S3IC) prélevant de l'eau (souterraine, superficielle, au réseau) et le volume d'eau annuel prélevé ;
- les fichiers de traitements des déchets dangereux et non dangereux permettent d'avoir la liste des établissements (nom et code S3IC) traitant des déchets dangereux ou non dangereux, et la nature des déchets et le tonnage par an.

1.2. Sources avérées de pollution

Les bases de données suivantes peuvent être utiles pour identifier et caractériser les sources de pollution avérées :

- **BASOL**

BASOL constitue la base de donnée des sites pollués (ou potentiellement) en France appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif (basol.developpement-durable.gouv.fr). En janvier 2018, 6 690 sites ont été recensés. Il est précisé que :

- les impacts des sites BASOL sont à plus de 70 % des cas liés à une teneur anormale dans les eaux souterraines. Pour 1,2 % des cas (52 sites), des captages AEP ont dû être arrêtés ;
- les sources de pollution dans les eaux souterraines sont traitées ou en cours de traitement dans quasiment les trois-quarts des situations, mais des restrictions d'usage sont régulièrement émises (un peu moins de la moitié des sites) ;
- la surveillance des eaux souterraines concerne 3 693 sites BASOL. 1 583 justifient de l'absence de surveillance et 1 414 ne disposent pas encore de surveillance.

Les sites sont recensés selon leur nom, leurs coordonnées et précision, un code BASOL, le code de l'activité. Le code NAF n'est pas renseigné. Enfin, certaines substances détectées dans les sols et les eaux souterraines de l'ensemble des sites BASOL sont identifiées.

- **Secteurs d'Information sur les Sols (SIS)**

La base de données du SIS recense les terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et la mise en place de mesures de gestion de la pollution pour préserver la sécurité, la santé ou la salubrité publique et l'environnement (www.georisques.gouv.fr/dossiers/pollution-des-sols-sis-et-anciens-sites-industriels#sis).

La base de données SIS recense les sites selon un code SIS. Le code S3IC ou BASOL également est renseigné, contrairement au code NAF. Le site est géolocalisé précisément selon sa délimitation administrative. Cependant, le panache de pollution dans les eaux souterraines éventuel n'est pas représenté hors site.

- **Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA)**

La base de données ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) répertorie « les incidents, accidents ou presque accidents qui ont porté, ou auraient pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques ou à l'environnement. » Cette base est gérée par la médiathèque interactive de référence en accidentologie industrielle, le BARPI, et est accessible sur internet www.aria.developpement-durable.gouv.fr

ARIA recense plus de 46 000 accidents ou incidents survenus en France ou à l'étranger en 2019, environ 1200 nouveaux événements par an.

- **Autres données**

D'autres données peuvent également apporter des informations précieuses quant à la présence de pollutions existantes :
- les arrêtés municipaux de restriction d'usage des eaux souterraines ;
- des études diverses (notamment Interprétation de l'Etat des Milieux ou plan de gestion) réalisées suite à la mise en évidence d'une pollution.

1.3. Qualité des eaux souterraines

- **Réseaux qualitatifs existants dans ADES**

Des informations sont disponibles dans la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (base de données ADES - www.ades.eaufrance.fr). Cette base rassemble des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines. Plusieurs réseaux ADES sont disponibles, au niveau national, par bassin, régional ou départemental.

- Réseau national de suivi des eaux brutes utilisées pour l'eau potable au titre du contrôle sanitaire :

Les agences régionales de santé (ARS) sont en charge du contrôle sanitaire de l'eau distribuée dans le réseau d'eau potable. Le suivi consiste, entres autres, en la réalisation d'un programme de prélèvements et d'analyses d'eau en différent point du réseau de production et de distribution d'eau. L'ensemble des résultats des analyses réalisées dans le cadre du contrôle sanitaire de

l'eau du robinet mis en œuvre par les ARS alimente la base de données nationale « SISE-Eaux d'alimentation » du Ministère chargé de la santé. Les analyses réalisées sur les eaux souterraines dans le cadre de ce suivi bancarisé dans SISE-EAUX sont mis dans ADES à une fréquence annuelle.

- Réseaux qualitatifs des Agences de l'Eau :

La Directive Cadre Européenne a introduit la notion de masse d'eau souterraine et a précisé la nécessité de mettre en œuvre deux types de contrôle, en lien avec l'évaluation de la qualité des masses d'eau et du risque de ne pas atteindre un bon état chimique :

- un réseau de contrôle de surveillance (RCS) des cours d'eau et des plans d'eau ;
- un réseau de contrôles opérationnels (RCO), mis en place sur toutes les masses d'eau identifiées comme risquant de ne pas atteindre les objectifs environnementaux de la DCE (masses d'eau ayant obtenu un report d'atteinte du bon état pour 2021 ou 2027 ou une dérogation d'objectif de bon état). Il a pour objectif d'établir l'état de ces masses d'eau et de suivre leur évolution suite aux actions mises en place dans le cadre des programmes de mesures. Le suivi de ces stations a vocation à être interrompu lorsque le retour au bon état est avéré.

Ces réseaux ont été mis en place par les agences de l'eau, par bassin, et les données sont consultables sur ADES.

- Réseaux de campagnes nationales exceptionnelles, départementaux, de bassin versant…

Des volontés locales (par exemple les conseils départementaux, les syndicats de production d'eau potable, les communautés de communes, des associations de bassin versant) ont permis de mettre en place des réseaux de suivi de la qualité des eaux souterraines dont les données sont parfois disponibles sur ADES.

- Réseau qualitatif des Installations Classées Sols Pollués (ICSP)

Sur un certain nombre de sites industriels en France soumis à auto-surveillance de la qualité des eaux souterraines, les données d'auto-surveillance transmises par les sites industriels au service des Installations Classées des DREAL/DRIEE (sous la forme d'un rapport papier de manière générale) ont été bancarisées dans ADES. Ce réseau, régional, est inégal selon les régions, notamment concernant le nombre de sites industriels mis dans la base de données par rapport au nombre de sites industriels ayant une auto-surveillance des eaux souterraines et les dates de début et de fin des données. Majoritairement, les dernières données de ce réseau datent de 2010-2011.

La base de données ICSP renseigne les sites industriels par code ICSP, et les points d'eau par code BSS. Le code S3IC ou BASOL est régulièrement renseigné. Il n'y a pas d'information concernant le site industriel, notamment sur l'état du site (en activité, en cessation d'activité, réhabilité, etc…). A terme ce réseau devrait être remplacé par le réseau GIDAF.

- **Auto-surveillance des sites industriels**

La consultation des données d'auto-surveillance des sites industriels peut être réalisée auprès de la préfecture ou la DRIEE/DREAL. Le site des Installations Classées (aida.ineris.fr) précise que cette auto-surveillance est réalisée dans le contexte de la surveillance des effets sur l'environnement, notamment imposée par l'Arrêté du 2 février 1998. Les installations concernées sont précisées dans l'arrêté ministériel : il s'agit d'installations soumises à autorisation à fort

potentiel polluant. La surveillance peut concerner les eaux souterraines, l'air ambiant, les eaux superficielles et les sols. Concernant les eaux souterraines, des prélèvements d'eaux souterraines sont réalisés périodiquement en amont et en aval hydraulique de l'installation, permettant de vérifier l'absence de pollution de la nappe phréatique par l'installation classée. Les paramètres à surveiller sont ceux caractéristiques de l'activité, actuelle ou passée. Ils sont choisis en concertation avec un hydrogéologue agréé, et précisés dans l'arrêté d'autorisation. Les résultats de la surveillance doivent être transmis à l'inspecteur des installations classées. Si ces résultats mettent en évidence une pollution des eaux souterraines, l'exploitant doit prévenir immédiatement l'inspection des installations classées. Il doit ensuite déterminer si ses activités sont à l'origine ou non de la pollution constatée et informer le préfet du résultat de ses investigations et, le cas échéant, des mesures prises ou envisagées.

Pour rappel, l'Article 65 de l'Arrêté du 2 février 1998, modifié par l'Article 44 de l'Arrêté du 11 mai 2015 concerne les eaux souterraines et précise que l'auto-surveillance des eaux souterraines n'est pas réalisée pour tous les sites industriels. Or certains petites activités de service soumises à déclaration (ancienne teinturerie, garage, station-essence…) sont des contributeurs potentiels de micropolluants dans les eaux souterraines (hydrocarbures, COHV notamment) compte-tenu de leurs activités et de leur nombre non négligeable en zone urbaine.

- **Réseaux de surveillance des sites IOTA**

Les Installations, Ouvrages, Travaux et Aménagements désignent les installations ayant une influence sur l'eau ou le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (prélèvements et/ou des rejets d'eau souterraine et/ou superficielle). Elles sont soumises à autorisation ou à déclaration, selon l'importance de leur impact sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques, au titre de l'article R214-1 du code de l'environnement.

Un suivi des niveaux et de la qualité des eaux souterraines peut être demandé par l'organisme instructeur du dossier Loi sur l'Eau (DDT(M), DREAL, DRIEE), par exemple dans le cadre de chantiers de réaménagement.

- **Autres**

D'autres données peuvent également représenter une source d'informations précieuses quant à la qualité des eaux souterraines :

- les données acquises par les réseaux de suivi existants, publics (SAGE, agglomération…) ou appartenant à de grands groupes (EDF, Voies Navigables de France…) ;
- diverses études (notamment Interprétation de l'Etat des Milieux ou plan de gestion) réalisées suite à la mise en évidence d'une pollution.

1.4. Liste des substances polluantes (potentiellement) problématiques

La toxicité et le comportement des substances feront partie des critères pour hiérarchiser les différentes problématiques et définir l'objectif du réseau. Il est donc important d'établir une liste des substances associées aux pollutions (potentielles ou avérées) identifiées. Pour cela, un outil est très utile : BD ActiviPoll (ssp-infoterre.brgm.fr/bd-activipoll). Il s'agit d'une base de données qui permet d'identifier des typologies de substances potentiellement liées à des sites industriels. La BD ActiviPoll répertorie et qualifie les corrélations entre les activités industrielles et les polluants qui peuvent leur être associés d'après le croisement de diverses sources d'information (bases de données françaises et littérature internationale spécialisée).

Les activités industrielles sont bancarisées dans la BD ActiviPoll sous la forme d'un libellé (exemple : « Laboratoires d'analyses médicales ») et d'un code basé sur la nomenclature NAF 2008 et adapté au domaine des sites et sols pollués (exemple : « Q86.90B »). De même, les substances sont enregistrées par leur nom et par leur code SANDRE (exemple : « 1371 - Chrome hexavalent »). L'utilisation de la matrice activités/polluants permet, pour chaque code NAF renseigné dans les différentes bases de données, d'associer la liste des polluants potentiels pouvant être émis dans les eaux souterraines.

2. Données sur les enjeux à protéger

Les enjeux à protéger sont à définir en étroite relation avec les acteurs de l'agglomération selon les objectifs du réseau de suivi afin de réaliser l'inventaire le plus précis possible. Toutefois, des recherches documentaires apporteront également de nombreuses informations.

2.1. Populations et usage des eaux souterraines

Les voies d'exposition potentielle à une pollution des eaux souterraines vont déterminer les enjeux à considérer. Ces voies d'exposition peuvent être de nature variée :

- par consommation directe des eaux souterraines : Les enjeux associées sont alors les captages (notamment les captages d'eau potable) et les puits privés existants ;
- par ingestion indirecte : Cette ingestion peut se faire, par exemple, par consommation de végétaux cultivés, d'animaux d'élevage, de produits d'animaux (œufs, lait…) ou de produits de la pêche exposés aux polluants (en particulier par arrosage des végétaux et abreuvage des animaux). Les enjeux à protéger sont donc les zones de culture (y compris les jardins potagers individuels et collectifs) et d'élevage (zones de pâturage et d'abreuvage) ainsi que les eaux de surface à vocations piscicole, conchylicole ou halieutique en relation avec les eaux souterraines ;
- par inhalation de substances volatiles provenant des eaux souterraines : Les enjeux à protéger correspondent alors aux zones susceptibles d'accueillir des populations au droit des zones impactées (secteurs résidentiels, établissements scolaires…). Les secteurs pour lesquels un aménagement est planifié à plus ou long terme sont également à considérer afin de tenir compte de l'évolution du développement urbain ;
- par contact cutané avec les eaux contaminées : Les enjeux concernées sont les eaux de surface en relation avec les eaux souterraines et utilisées comme zones de baignade.

2.2. Ressources et milieux naturels

Plusieurs zones naturelles peuvent faire l'objet de dispositions spécifiques :

- les zones « Natura 2000 » dont l'objectif est de promouvoir une gestion adaptée des habitats naturels, de la faune et de la flore sauvages, tout en respectant les exigences économiques, sociales et culturelles, ainsi que les particularités régionales et locales de chaque zone ;
- les ZNIEFF (Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique) et les ZICO (Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux) qui ont pour objectif d'identifier et de protéger les zones particulièrement intéressantes sur le plan écologique. Sans imposer de contraintes réglementaires particulières, ces zones constituent des espaces naturels exceptionnels ou représentatifs à protéger particulièrement ;
- les zones humides qui sont des milieux de vie remarquables pour leur diversité biologique. Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), qui définissent les orientations nécessaires pour une gestion équilibrée de la ressource en eau, intègrent la protection et la mise en valeur de ces zones ;

- d'autres zones, d'importance locale particulière, peuvent être concernées par des enjeux de protection : les réserves naturelles, les réserves naturelles volontaires, les zones de protections spéciales, les réserves biologiques domaniales, les réserves de chasse, de pêche…

2.3. Sources de données

- **ADES et référentiel des captages**

Le référentiel des captages d'eau potable est disponible, en accès restreint, sur dans la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (base de données ADES - www.ades.eaufrance.fr).

- **Infoterre et BSS-Eau :**

Cette base diffuse des informations spécifiques sur le descriptif des points d'eau, c'est-à-dire les accès naturels (source) ou artificiels (forage, puits…) aux eaux souterraines : identification, localisation, caractéristiques hydrogéologiques, piézométrie... Actuellement, à l'échelle du territoire national, environ 500 000 points d'eau sont référencés dans la BSS-Eau. Consultable sur le site infoterre.brgm.fr.

- **BNPE (Banque Nationale de données sur les Prélèvements en Eau) :**

Les informations portent sur les volumes annuels directement prélevés sur la ressource en eau et sont déclinées par localisation et catégorie d'usage de l'eau (alimentation en eau potable, industrie, irrigation). Consultable sur le site bnpe.eaufrance.fr.

- **Geoportail :**

Ce portail permet l'accès à des services de recherche et de visualisation de données géographiques ou géolocalisées. Consultable sur le site www.geoportail.gouv.fr.

- **Baignades :**

Ce site diffuse des données sur la qualité des eaux de baignade. Consultable sur le site baignades.sante.gouv.fr.

- **Gesteau :**

Ce site permet notamment de connaitre l'état d'avancement des outils de gestion de l'eau (SDAGE, SAGE et contrats de milieu) à l'échelle d'un bassin, une région, un département ou une commune. Consultable sur le site www.gesteau.fr.

- **Cartograph' :**

Il s'agit d'une application sur des données de synthèse sur l'eau (prélèvements, zones protégées, état des eaux souterraines et de surface…). Les données peuvent être affichées sous forme cartographique, d'animation temporelle, graphique et sous forme de tableau. Consultable sur le site www.cartograph.eaufrance.fr.

- **Data.gouv.fr :**

Cette plateforme diffuse des données publiques de l'Etat français (notamment sur l'environnement, l'agriculture, les territoires). Consultable sur le site www.data.gouv.fr

- **Site des Agence de l'Eau**

Par bassin, les portails permettant d'accéder aux principales informations et données sur l'eau et les milieux aquatiques :

- Artois-Picardie : www.artois-picardie.eaufrance.fr
- Seine-Normandie : www.seine-normandie.eaufrance.fr
- Loire-Bretagne : www.loire-bretagne.eaufrance.fr
- Rhin-Meuse : rhin-meuse.eaufrance.fr
- Rhône-Méditerranée : www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr
- Adour-Garonne : adour-garonne.eaufrance.fr
- Corse : www.corse.eaufrance.fr
- Guadeloupe : www.guadeloupe.eaufrance.fr
- Martinique : www.martinique.eaufrance.fr
- Guyane : www.guyane.eaufrance.fr
- Réunion : donnees.eaureunion.fr
- Mayotte : www.mayotte.eaufrance.fr

- **Autres :**
  - les Mairies et les Établissements Publics de Coopération Intercommunale (métropoles,communautés de communes...) ;
  - les Missions Inter Services de l'Eau et de la Nature (MISEN) ;
  - les Services de la Navigation de Voies Navigables de France (VNF) ;
  - les Chambres d'agriculture.

3. Données sur les transferts

3.1. Contextes géologique et hydrogéologique

L'étude hydrogéologique permet de déterminer les conditions d'écoulement des eaux souterraines :

- géométrie des aquifères (étendues, épaisseur, affleurement…), nature et épaisseur de la zone non saturée et/ou des couches de protection ;
- caractéristiques des nappes : type (libre ou captive), recharges, sens d'écoulement, niveaux piézométriques et fluctuations, remontée de nappe… ;
- échanges entre aquifères ;
- relations avec les cours d'eau et la mer (biseau salé) ;
- modifications anthropiques des écoulements (prélèvements, drainage, canaux…).

D'après le guide « Diagnostic de site » (ssp-infoterre.brgm.fr/diagnostic-site - Ministère en charge de l'environnement (2009) - Maîtrise et Gestion des Impacts des polluants sur la qualité des Eaux Souterraines (ESO). Version 0.1. 213 p. ssp-infoterre.brgm.fr/maitrise-gestion-des-impacts-sur-qualite-eaux-souterraines, 2007a), les paramètres géologiques et hydrogéologiques qui concernent la voie de transfert par les nappes d'eaux souterraines sont principalement :

- la lithologie des sols et des formations géologiques sous-jacentes, qui intervient à deux titres :
  - La nature lithologique des formations (d'origine naturelle ou anthropique) qui constituent la couche superficielle du sol et la zone non saturée (portion du sous-

sol entre la surface et le toit de la nappe) conditionne les modalités de transfert du polluant depuis la surface vers la nappe. Ce transfert dans la zone non saturée se fait essentiellement selon une composante verticale ;
    - Les caractéristiques de la zone aquifère : type de nappe (libre ou captive), la nature et la structure de l'aquifère (homogène, hétérogène, monocouche, multicouche), le type de porosité et de perméabilité (interstices, fissures, fractures, chenaux), qui conditionnent les modalités de transfert (vitesse, direction, débit...) des polluants depuis la nappe vers des milieux d'exposition potentiels (captages, puits, cours d'eau…). Ce transfert se réalise selon une composante essentiellement horizontale.
- l'extension, la nature, la continuité et l'épaisseur du recouvrement, qui conditionnent la réelle capacité de rétention et les temps de transfert des polluants ;
- les caractéristiques hydrauliques du sous-sol, qui comprennent :
    - la perméabilité de la couverture constituée du sol et des formations géologiques de la zone non saturée ;
    - la profondeur de la nappe (comportant, dans la mesure du possible, une évaluation des variations des niveaux piézométriques dans le temps - variations saisonnières et annuelles) ;
    - la perméabilité de la formation aquifère et la porosité.

Au-delà, d'autres paramètres peuvent également intervenir :
- la topographie : la pente du sol au droit de la zone de pollution ainsi que la nature de la couverture superficielle conditionnent l'aptitude au ruissellement des eaux de pluie, et donc l'infiltration potentielle. Une pente importante favorise le ruissellement et limite ainsi l'infiltration directe des eaux polluées ;
- l'hétérogénéité des milieux aquifères : un réseau important de fracturations ou fissurations pouvant accroitre les transferts vers et/ou dans la nappe.

Dans le cas des nappes superposées, il convient de s'assurer du nombre d'aquifères présents, et de tenir compte des éventuelles relations entre eux (discontinuités, drainances, défauts d'étanchéité d'ouvrages...).

A ces critères, on peut éventuellement rattacher le critère des conditions climatiques, c'est à dire la pluie efficace qui parvient à la nappe pour la recharger et qui véhicule la pollution. Plus la recharge est importante, plus l'accessibilité du polluant à la nappe est grande si ce dernier est facilement hydrosoluble.

D’autres données sont également utiles pour améliorer la connaissance des contextes géologiques et hydrogéologiques :
- les données sur les prélèvements en nappe (alimentation en eau potable, usage agricole, industriel…) : localisations et débits de prélèvement (au moins pour l’usage AEP) ;
- les informations des cartes piézométriques ;
- les données provenant de modèle géologique et de modélisations hydrogéologiques (si disponible).

Les sources d’informations générales suivantes peuvent être consultées :

- **Infoterre :**

Il s’agit du visualiseur de données géoscientifiques du BRGM. A ce titre, il donne accès aux couches de la Banque du Sous-Sol (BSS), aux cartes géologiques ainsi qu’à des données relatives à d’autres thématiques (risques naturels, carrières et matériaux…). Consultable sur le site infoterre.brgm.fr.

- **BDLISA :**

La Base de Données des LImites des Systèmes Aquifères propose un découpage de l'ensemble du territoire national en entités hydrogéologiques (formations géologiques aquifères, semi-perméables ou imperméables). Cette base permet la caractérisation de ces entités selon 4 attributs principaux (thème, nature, milieu, état). Ceux-ci permettent de répondre à différentes questions telles que : cette entité est-elle aquifère ou imperméable ? S'agit-il d'une entité sédimentaire, alluviale ou de socle? Est-elle plutôt caractérisée par un milieu de type poreux, fissuré, karstique...? Est-ce que la nappe contenue dans cette entité est libre ou bien captive ?... Consultable sur le site bdlisa.eaufrance.fr.

- **SIGES :**

Le Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines permet de trouver des données hydrogéologiques locales et nationales Pour trouver une information, l'internaute dispose d'une recherche par mots-clés et d'un accès par menus thématiques : "Géologie", "Hydrogéologie", "Quantité", "Qualité", "Vulnérabilité", "Législation". Les différents SIGES existant sont les suivants : SIGES Aquifère rhénan, Aquitaine, Bretagne, Centre-Val de Loire, Midi-Pyrénées, Nord-Pas de Calais, Pays de la Loire, Poitou-Charentes-Limousin, Seine-Normandie, Rhin-Meuse.

3.2. Contexte hydrologique

Le terme "eaux de surface" recouvre tant les cours d'eau (ruisseaux, rivières, canaux) que les plans d'eau (mares, étangs, lacs), qu'ils soient temporaires ou non. On les distingue des eaux souterraines du fait que les modes d'exposition aux eaux superficielles ne sont pas forcément les mêmes que ceux qui concernent les eaux souterraines.

Des transferts de polluants peuvent se réaliser de la nappe vers le réseau hydrographique superficiel, ou inversement, selon les fluctuations des régimes hydrauliques. La recherche documentaire devra apporter les informations relatives aux relations pouvant exister entre la nappe et les eaux de surface, dans le cas des nappes alluviales ou des nappes dont le régime hydraulique est souvent influencé par un cours d'eau proche (état des berges, batardeaux, possibilité de transfert de pollution entre les deux milieux...).

La banque de données HYDRO (hydro.eaufrance.fr) permet d'avoir accès à des données sur les niveaux des cours d'eau. Cette banque stocke en effet les mesures de hauteur d'eau (à pas de temps variable) en provenance d'environ 5 000 stations de mesure (dont environ 3 200 sont actuellement en service) implantées sur les cours d'eau français et permet un accès aux données signalétiques des stations (finalité, localisation précise, qualité des mesures, historique, données disponibles...).

Des données sur la qualité des eaux de surface peuvent quant à elles être obtenues sur la base de données Naïades. Cette base permet d'accéder aux données d'observation sur la qualité des cours d'eau (www.naiades.eaufrance.fr).

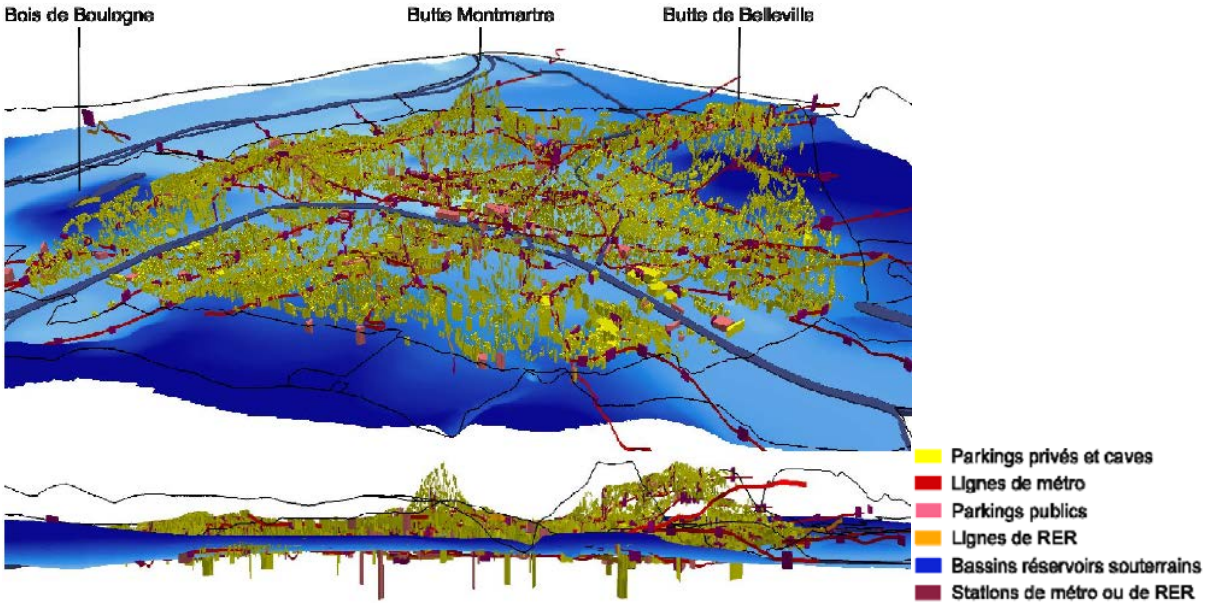
3.3. Occupation des sols et aménagements du sol et du sous-sol

L'urbanisation peut également contribuer à développer de nouvelles sources de recharge :

- les fuites liées aux réseaux d'eau potable, d'eaux usées ou au sortir des fosses septiques ;
- l'arrosage abusif des jardins privés et municipaux ;

- les relargages (délibérés ou non) d'eaux usées et d'eaux pluviales ;
- la plupart de ces effets ont une échelle d'incidence bien inférieure à celle de la masse d'eau mais ils peuvent s'avérer non négligeables dans le calcul de la recharge.

Les différents ouvrages souterrains, lorsque qu'ils sont situés sous le niveau piézométrique, sont autant d'obstacles potentiels à l'écoulement des nappes. C'est pourquoi un recensement et une description (dimension, emplacement) de tous les grands ouvrages souterrains sont importants : fondations de bâtiments, sous-sols de bâtiments et de parkings, lignes de métro, tunnels et trémies routiers et ferroviaires, canalisations de grand diamètre (eau potable et assainissement), etc. La figure suivante présente un exemple de prise en compte des aménagements souterrains à Paris.



Représentation tridimensionnelle des structures souterraines parisiennes et du toit de la nappe phréatique (en bleu) selon 2 angles de vue différents – vue de dessus, vue à l'horizontale (Lamé, 2013).

- **Corine Land Cover (CLC) :**

La donnée CLC (www.geoportail.gouv.fr) correspond à un inventaire biophysique de l'occupation des terres, selon une nomenclature standardisée pour l'Union Européenne. Elle comprend 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire :

- territoires artificialisés, répartis en :
  - sols bâtis : maisons, immeubles, usines, gares… ;
  - sols revêtus imperméabilisés : routes (chaussées et trottoirs), autoroutes, parkings ;
  - sols stabilisés : voies ferrées, chemins, places, parcs et jardin, ronds-points, cimetières, terrains vagues, équipements sportifs et de loisirs.
- territoires agricoles ;
- forêts et milieux semi-naturels ;
- zones humides ;
- surfaces en eau.

Une couche du taux d'imperméabilisation des sols 2015 permet de visualiser le taux d'imperméabilité du sol (exprimé en %) en France métropolitaine et dans les départements et

régions d'outre-mer (DROM), avec une résolution de 20 mètres. Le sol est considéré comme perméable pour les objets suivants : bâtiments, infrastructure de transport (aéroport, port, aire de triage, parking), zone industrielle et commerciale, usine et bâtiments agricoles, parc d'attraction (sauf zone associée couverte exclusivement de végétation), zone de travaux comportant des infrastructures visibles en cours de construction, cimetière, infrastructure sportive, camping (route et infrastructure, sauf zone associée couverte - exclusivement de végétation), routes et voies ferrées associées à d'autres surfaces imperméabilisées (aucun vide n'a été rempli manuellement, aucune route n'a été numérisée), rive artificialisée de cours d'eau ou de plan d'eau. Le sol n'est pas considéré comme imperméable pour : mine à ciel ouvert, carrière, zone de travaux ne comportant pas d'infrastructure visibles en cours de construction, surface en herbe utilisée pour la pratique d'un sport, sol nu, zone de rochers, zone couverte d'une végétation clairsemée, sable, dune, sablière, glacier, névé, surface d'eau, voie ferrée.

- **PLU et données communales**

Les données concernant le Plan Local d'Urbanisme (PLU) permettra d'affiner les différentes zones d'occupation des sols (zones agricoles, cimetières et jardins publics par exemple) et d'identifier les évolutions éventuelles. Certaines métropoles possèdent des données géoréférencées sur l'occupation et l'imperméabilisation des sols ainsi que les aménagements souterrains. Un contact avec les services techniques des communes ou de la communauté de commune, d'agglomération, etc… de la zone urbaine est nécessaire.

Les données concernant les réseaux de collecte des eaux usées et eaux pluviales, les stations d'épurations, les collecteurs d'eaux de pluie et les zones d'épandage des STEP sont également à collecter auprès des services techniques.

4. Données sur les Points d'eau existants

4.1. Points d'eau

- **BSS-Eau :**

Cette base diffuse des informations spécifiques sur le descriptif des points d'eau, c'est-à-dire les accès naturels (source) ou artificiels (forage, drain, puits…) aux eaux souterraines : identification, localisation, caractéristiques hydrogéologiques, piézométrie... Actuellement, à l'échelle du territoire national, environ 500 000 points d'eau sont référencés dans la BSS-Eau. Consultable sur le site infoterre.brgm.fr.

- **BNPE (Banque Nationale de données sur les Prélèvements en Eau) :**

Les informations portent sur les volumes annuels directement prélevés sur la ressource en eau et sont déclinées par localisation et catégorie d'usage de l'eau (alimentation en eau potable, industrie, irrigation). Consultable sur le site bnpe.eaufrance.fr.

- **Autres :**

De nombreux forages ne sont pas déclarés. Un recensement peut alors être effectué auprès :

- des services techniques communaux (voiries, espaces verts, équipements sportifs), qui utilisent fréquemment les eaux souterraines pour l'arrosage des stades, des parcs et jardins, des cimetières, pour le remplissage des piscines municipales et pour l'entretien et le nettoyage des voiries et des stades synthétiques ;

- des gestionnaires et utilisateurs des eaux souterraines : industriels (dont gravières) et CCI, agriculteurs et Chambres d'agriculture, ARS, syndicats et producteurs d'eau, golfs, centres équestres, centres aquatiques, parcs de loisirs et campings ;
- des structures publiques et privés (Agence de l'eau, Métropole, bureaux d'études) qui organisent ponctuellement des campagnes exceptionnelles (cartes piézométriques et bilan de la qualité) ;
- des organismes (SAGE, Agence de l'eau et DDT(M) qui réalisent des inventaires sur les prélèvements ;
- des privés, par publipostage ou lors d'une campagne de terrain…

4.2. Réseaux qualitatifs des eaux souterraines

cf 1.3.

4.3. Réseaux quantitatifs (piézométriques) des eaux souterraines

- **Réseaux existants dans ADES**

Des informations sont disponibles dans la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (base de données ADES - www.ades.eaufrance.fr). Cette base rassemble des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines. Plusieurs réseaux ADES sont disponibles, au niveau national, par bassin, régional ou départemental.

- Le réseau piézométrique national

Pour exercer la surveillance exigée par l'Europe dans le cadre de la DCE, le réseau piézométrique national, dit « quantitatif », est composé d'environ 1700 points de mesure appelés « piézomètres ». Les piézomètres sont équipés de sondes de mesures et de matériels permettant une acquisition journalière à horaire et un chargement à fréquence bimensuelle des données.

- Réseaux départementaux, de bassin versant (SAGE), de nappe…

Dans le cadre des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), certaines politiques locales ont mis en place des réseaux de suivi quantitatif des ressources en eau souterraine afin de répondre à la nécessité de gestions coordonnées et d'anticiper les épisodes de crise. Par exemple, le SDAGE du département de Maine-et-Loire est à l'initiative de ce genre de réseaux, réalisé en collaboration avec l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'ARS et les services de l'état (DDT).

Il peut également exister des réseaux de mesure des eaux souterraines locaux à l'échelle d'une nappe (cas par exemple de la nappe de la Vistrenque gérée par le Syndicat Mixte des Nappes Vistrenque et Costières).

- **Réseaux non déclarés dans ADES**

De nombreux réseaux sont suivis par des organismes publics ou privés : métropole et communes (service foncier et/ou environnement), SNCF, RATP, gestionnaires de transport en communs (métro), gestionnaires des fleuves et des barrages (Voies Navigables de France, EDF, CNR), aménageurs (gestionnaires de parkings…), etc. Certains ouvrages souterrains possèdent leur réseau de surveillance piézométrique, permettant de vérifier leur système de drainage.

Annexe 6

Synthèses des informations compilées lors de la visite de terrain

Identification de l'ouvrage						Visite de terrain					Hydrogéologie			Equipement (tubage et protection)				Conclusion	
Photo	Code	X_L93	Y_L93	Z_repère	Propriétaire	Visite de terrain	Existence	Accès	Pérennité	Usage	Niveau d'eau	Aquifère capté	Source pour aquifère	Diam (mm)	Nature	Crépines	Protection	Suivi Quantité	Suivi Qualité
	BSS001TPFR (BSS)	847766	6521667	168,65	METROPOLE	Oui - info Métropole	Opérationnel	Public - clos	Oui	Suivi quantitatif	3,52m le 06/12/2018	Alluvions	Coupes géologique et technique	115	PVC	5 - 10	Plaque acier	OUI	NON
	OPR0000060209 (BNPE)	847682	6521581		VILLE	Non - info sur place	Opérationnel	Public - clos	Oui	Prélèvement irrigation		Alluvions						NON	OUI
	OPR0000060208 (BNPE)	847683	6521714		VILLE	Non - info sur place	Opérationnel	Public - clos	Oui	Prélèvement irrigation		Alluvions						NON	OUI
	BSS001TNGJ (BSS)	847856	6521808	170	INDUSTRIEL	Oui - Non retrouvé	Rebouché	Privé - clos	Non	Suivi qualité (ICPE)	4,13m le 07/07/1999	Alluvions	Coupes géologique et technique			2 - 6,7		NON	NON
	BSS001TNGK (BSS)	847839	6521780	170	INDUSTRIEL	Oui - Non retrouvé	Rebouché	Privé - clos	Non	Suivi qualité (ICPE)	4,04m le 07/07/1999	Alluvions	Coupes géologique et technique	69		2 - 6,72		NON	NON
	BSS001TNGL (BSS)	847870	6521754	170	INDUSTRIEL	Oui - Non retrouvé	Rebouché	Privé - clos	Non	Suivi qualité (ICPE)	4,14m le 07/07/1999	Alluvions	Coupes géologique et technique	69		2 - 6,72		NON	NON
	BSS001TNEM (BSS)	847602	6522141	170	SAGE	Oui - info SAGE	Opérationnel	Privé - clos	Oui	Suivi qualité et quantitatif	5,60m le 27/07/2003	Alluvions	Coupes géologique et technique	150	PVC	4 - 20	Regard béton avec tampon en fonte et bouchon	OUI	OUI
	VILL-0206 (SAGE)	847405	6522548		METROPOLE	Non - info Métropole	Opérationnel	Privé - clos	Oui	Suivi quantitatif		Alluvions	Profondeur	88	PVC	4 - 20	Dalle béton et tubage acier avec capot cadenassé	OUI	OUI
	OPR0000141003 (BNPE)	847393	6522623		INDUSTRIEL	Non - info sur place	Opérationnel	Privé - clos	Oui	Prélèvement industriel et suivi qualité (ICPE)		Alluvions						NON	OUI
	Terrain 1	847445	6522785		INDUSTRIEL	Non - info sur place	Opérationnel	Privé - clos	Oui	Suivi qualité (ICPE)		Alluvions						OUI	OUI
	VILL-0207 (SAGE)	848914	6521446		METROPOLE	Non retrouvé - info SAGE	Non retrouvé		Oui	Suivi qualité (IOTA)		Alluvions	Profondeur			? - 20		NON	NON
	VILL-0208 (SAGE)	849689	6522059		METROPOLE	Non retrouvé - info SAGE	Non retrouvé		Oui	Suivi qualité (IOTA)		Alluvions	Profondeur			? - 20		NON	NON
	ACOMPL-84 (SAGE)	849067,00	6521736,00	172,16	VILLE	Oui - passage caméra	Opérationnel	Public - libre	Non ?	Suivi qualité (IOTA)	5,06m le 06/12/2018	Alluvions	Passage caméra	110	PVC	1,5 - 19	Dalle béton et tubage acier avec capot cadenassé	OUI	OUI
	ACOMPL-85 (SAGE)	849069,00	6521773,00	172,01	VILLE	Oui	Opérationnel	Public - libre	Non ?	Suivi qualité (IOTA)	5,04m le 06/12/2018	Alluvions	Profondeur	115	PVC	? - 20,5	Dalle béton et tubage acier avec capot cadenassé	OUI	OUI
	ACOMPL-86 (SAGE)	849094,00	6521780,00	172,59	VILLE	Oui	Opérationnel	Public - libre	Non ?	Suivi qualité (IOTA)	4,52m le 06/12/2018	Alluvions	Profondeur	110	PVC	? - 18,15	Dalle béton et tubage acier avec capot cadenassé	OUI	OUI
	ACOMPL-87 (SAGE)	848992,00	6521784,00	171,25	VILLE	Oui	Opérationnel	Public - libre	Non ?	Suivi qualité (IOTA)		Alluvions						OUI	OUI
	ACOMPL-88 (SAGE)	849009,00	6521779,00	171,21	VILLE	Oui	Opérationnel	Public - libre	Non ?	Suivi qualité (IOTA)		Alluvions						OUI	OUI
	ACOMPL-89 (SAGE)	849038,00	6521801,00	171,05	VILLE	Oui	Opérationnel	Public - libre	Non ?	Suivi qualité (IOTA)		Alluvions						OUI	OUI
	ACOMPL-90 (SAGE)	849107,00	6521755,00	170,76	VILLE	Oui	Opérationnel	Public - libre	Non ?	Suivi qualité (IOTA)	3,70m le 06/12/2018	Alluvions	Profondeur	115	PVC	? - 17,7	Dalle béton et tubage acier avec capot cadenassé	OUI	OUI
	ACOMPL-103 (SAGE)	851809	6522031	173,97	INDUSTRIEL	Oui	Opérationnel	Privé - clos	Oui	Suivi qualité (ICPE)	3,11m le 06/12/2018	Alluvions	Coupes géologique et technique	69	PVC	? - 10,6	Dalle béton et tubage acier avec capot cadenassé	OUI	NON

Identification de l'ouvrage						Visite de terrain					Hydrogéologie			Equipement (tubage et protection)				Conclusion	
Photo	Code	X_L93	Y_L93	Z_repère	Proprietaire	Visite de terrain	Existence	Accès	Pérennité	Usage	Niveau d'eau	Aquifere capté	Origine	Diam (mm)	Nature	Crépines	Protection	Suivi Quantité	Suivi Qualité
	ACOMPL-104 (SAGE)	851898	6521931	174,18	INDUSTRIEL	Oui	Opérationnel	Privé - clos	Oui	Suivi qualité (ICPE)	4,19m le 06/12/2018	Alluvions	Coupes géologique et technique	69	PVC	? - 10,4	Dalle béton et tubage acier avec capot cadenassé	OUI	NON
	Terrain 2	851878	6521770	174,89	INDUSTRIEL	Oui	Opérationnel	Privé - clos	Oui	Suivi qualité (ICPE)	3,50m le 06/12/2018	Alluvions	Profondeur	115	PVC	? - 5,8	Dalle béton et tubage acier avec capot cadenassé	OUI	NON
	BSS001TQGK (BSS)	851745	6521547	174	SAGE	Oui - info SAGE	Opérationnel	Public - clos	Oui	Suivi qualité et quantitatif	2,60m	Alluvions	Profondeur		Acier	? - 10	Tubage acier et capot cadenassé	OUI	NON
	BSS001TPAT (BSS)	849284	6521100	170	VILLE	Oui	Opérationnel	Public - libre	Oui	Aucun	4,28m le 06/12/2018	Alluvions	Profondeur	1000	Buses béton	0 - 5,6	Tampon acier sur les places de stationnement (route)	OUI	NON
	BSS001TNZZ (BSS)	848807	6521003	170,5	VILLE	Oui	Opérationnel	Public - libre	Oui	Aucun		Alluvions	Profondeur	1000	Buses béton	0 - 5,8	Tampon acier sur les places de stationnement (route)	OUI	NON

Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr