

Un équilibre entre eaux de surface et eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable de La Rochelle

La Rédaction¹.

Une histoire de fontaines et de réservoirs

En raison de la situation de la ville en bordure de mer et des marais, les puits qui existaient au Moyen Âge dans la zone urbaine fournissaient une eau saumâtre. Pour cette raison, dès le XV^e siècle, voire antérieurement, la ville s'est tournée vers des sources situées à la périphérie : Périgny d'une part qui alimentait les fontaines de La Salaude et de Maubec, Fétilly, Lagord, Puilboreau dans la cuvette de Lafond, de l'autre. Entre 1447 et 1863, ce sont des conduites en terre cuite qui acheminaient les eaux de Lafond vers plusieurs fontaines du centre ville.

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, huit fontaines attestées (Fig. 1) existaient dans le centre ville. Parmi celles-ci, six ont disparu et seules les fontaines du Pilon (Fig. 2) et de la Caille sont encore visibles aujourd'hui. La première fonctionne hydrauliquement en circuit fermé, la seconde n'est plus en service mais le massif qui la supporte existe toujours. Les diverses fontaines furent créées aux XVI^e et XVII^e siècles et ont été démolies pour la plupart au XIX^e siècle, voire avant.

Les fontaines avaient une dimension symbolique double, à la fois par l'eau source de vie et comme témoignage du pouvoir royal par leur architecture monumentale et leur décor, comme en témoignent la fontaine Royale construite en 1650 sur la place d'Armes pour com-

14. Nous remercions également Romuald Chapuy, Directeur de l'Aménagement de la CAC, pour les informations qu'il a bien voulu nous communiquer relatives aux aménagements hydrauliques, existants et en projet.

1. Remerciements à Philippe Herviou, directeur du service de l'eau de la ville de La Rochelle, Emmanuel Phélut, hydrogéologue, et Éric Lentier (Communauté d'Agglo de La Rochelle) pour leur aide dans l'élaboration de cet article.

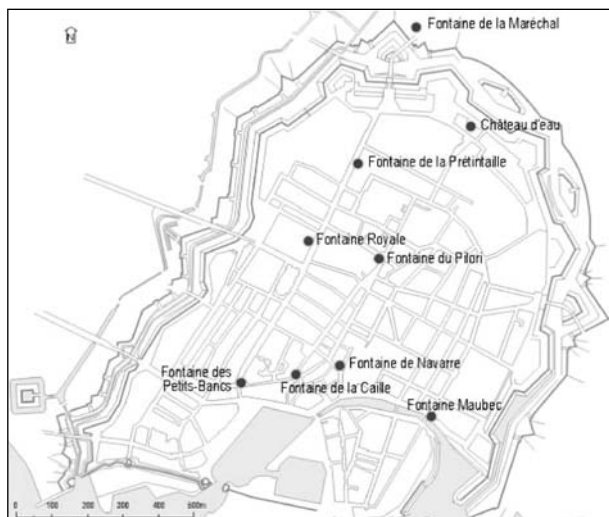


Figure 1. Plan de localisation des différentes fontaines ayant servi à l'alimentation en eau aux XVII^e et XVIII^e siècles. © Région Poitou-Charentes, inventaire général du patrimoine culturel / Z. Lambert, 2002.

mémorer la reddition de 1628, la fontaine des Petits Bancs ornée d'une statue du dauphin ou la fontaine de la Caille dont le dôme était surmonté d'une fleur de lys. Les fontaines étaient également des lieux de convivialité, notamment pour les femmes.

Il fallut attendre l'année 1863 pour qu'une nouvelle distribution d'eau se mette en place, en lien avec la croissance urbaine et l'évolution des modes de vie. Il faut dire aussi que les mesures faites en 1859 sur le réseau alimenté par les sources Lafond montraient que les deux tiers de l'eau étaient perdus dans le réseau. C'est par le décret du 13 mars 1863 qu'il est décidé d'installer une nouvelle distribution à La Rochelle : nouveaux points d'alimentation à Lafond et dans le secteur du champ de Mars, construction d'un nouvel aqueduc reliant les trois bassins de captage, ainsi que des réservoirs. En 1866, la distribution se faisait par 50 bornes fontaines qui se sont avérées rapidement insuffisantes. En 1886-87, l'adduction d'eau fut développée dans la partie ouest de la ville (Laleu, port de La Pallice) et un nouveau château d'eau construit à St-Maurice, aujourd'hui converti en mosquée.

Avec des besoins croissants, l'impact des périodes d'étiage et la mise en cause de la qualité de l'eau issue de Lafond, il a fallu rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Ce qui conduisit d'abord la municipalité à organiser l'exploitation conjointe des sources de Lafond et de Périgny puis, dans les années 1920 à abandonner le captage de Lafond et à se tourner vers des sources plus lointaines : Fraise, Le Gué d'Alléré... D'autres châteaux d'eau furent également construits : Les Cordeliers (aujourd'hui appelés St-Éloi 1, 2 et 3), respectivement



Figure 2. Fontaine du Pilon. Gravure d'Adolphe Varin, 1853. © Archives municipales La Rochelle - Reproduction Région Poitou-Charentes, inventaire général du patrimoine culturel / A. Maulny, 1992.

en 1925, 1932 et 1944, année où fût également construit celui de Lamartine, en remplacement du réservoir de la Glacière. On trouvera ci-dessous quelques références historiques sur toute cette période².

Une situation actuelle de diversification des ressources

L'histoire nous a montré une offre régulièrement en retard pour satisfaire une demande croissante. Aujourd'hui, le problème a été résolu : la suite de l'histoire ne fournit qu'un tiers des besoins, les deux autres tiers étant assurés par l'eau de surface issue de l'usine de Coulonges-sur-Charente, située à une soixantaine de kilomètres au sud-est de La Rochelle (50 km de canalisations). La localisation de l'usine, en amont du barrage de St-Savinien était destinée à se protéger de la remontée de l'eau de mer et du bouchon vaseux. La Communauté d'Agglo possède aussi 4 forages dans l'aquifère cénomani à proximité de l'usine, fournissant une eau de qualité qui est mélangée à celle de l'usine. Ces forages ont été réalisés pour apporter une ressource d'appoint à la production de l'usine, suite aux trois années 90 de grande sécheresse, qui avaient mis en exergue la fragilité de l'alimentation en eau de La Rochelle. L'usine, dont la capacité totale est de

2. - Arcère, Père Louis-Etienne : Histoire de la ville de La Rochelle et du pays d'Aulnis. La Rochelle, Desbordes, 1756-1757 ; reprints Marseille : Laffite, 1975, 588-592.
 - Béraud Rémi : Petite encyclopédie monumentale et historique de La Rochelle. La Rochelle, Éditions Rupella, 1981, 77-80.
 - Couneau, Émile, 1999 : La Rochelle disparue : les fontaines, les marchés, les corporations. T III, La Rochelle, Alain Thomas.
 - Exposition. La Rochelle, 2005 : Le quartier [de Lafond-Cognehors-Beaugard] d'hier à aujourd'hui. La Rochelle : Comité de quartier Cognehors-Lafond-Beaugard, juin 2005.
 - Masse Claude, 1979 : Recueil des plans de La Rochelle. La Rochelle, Éditions Rupella.

28 500 m³/j³, relève de la Communauté d'Agglomération de La Rochelle et couvre non seulement une très forte part des besoins en eau de La Rochelle, mais également ceux de 3 autres communes de l'Agglomération, ainsi que de 3 autres communes et de 2 syndicats d'eau sur le trajet. Les autres communes de l'Agglo sont approvisionnées par d'autres ressources.

En 2010, La Rochelle couvrira ses besoins en eau, de l'ordre de 6 millions de m³, de la façon suivante :

- 5% à partir du captage de Varaize (commune de Périgny) ;
- 30% en provenance des captages de Fraise et Anais ;
- 65% en provenance de l'usine de Coulonge.

Par comparaison, en 1998, il y avait 75% d'eau de surface au regard de 10% d'eau de Varaize et 15% d'eau de Fraise. Le traitement de l'eau à l'usine est classique : pré-traitement (dégrillage, acidification, pré-ozonation et/ou chloration amont), floculation, décantation, filtration sur sable, ozonation et désinfection par chloration. L'eau issue du traitement titre en moyenne 22-23 mg/l de nitrates. À noter aussi l'existence d'une station d'alerte sur la Charente en amont de l'usine. Une opération d'optimisation et d'amélioration des traitements de l'eau de l'usine pourrait voir le jour en 2012 après une phase d'études en 2011. La figure 3 correspond à un schéma de principe de l'alimentation en eau de La Rochelle.

À l'intérieur de la ville de La Rochelle, 6 petits captages, bien répartis sur le territoire urbain, couvrent la moitié des besoins en eau des espaces verts de la ville. Apparemment, il n'y a pas de problème de salinité, mais les prélèvements sont faibles. Le solde des besoins est couvert par l'eau de la ville.

Un mot sur les châteaux d'eau, évoqués dans l'historique. Dans le secteur de Mireuil, en 1999, les deux châteaux d'eau ont été déconstruits et remplacés par un

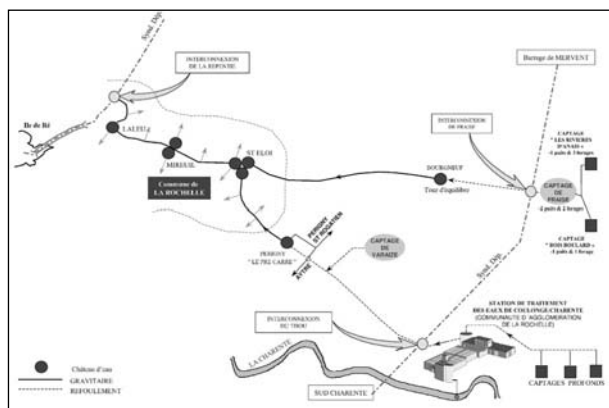


Figure 3. Schéma de principe de l'alimentation en eau de La Rochelle (document Service de l'eau de la ville de La Rochelle).

réservoir enterré de 3 000 m³. Un autre réservoir, également de 3 000 m³, existe pour le secteur de Laleu – La Pallice. En centre ville, existent les trois châteaux de St-Éloi 1, 2 et 3 (ex. Cordeliers) dont nous avons parlé. L'un d'entre eux a une capacité de 3 000 m³, les deux autres de 2 500. Les anciens réservoirs de St-Maurice et de la Glacière ont été reconvertis, le premier en mosquée, le second en entrepôt pour vélos.

Enfin, c'est dans le réservoir du Pré Carré, à l'est de La Rochelle, sur le territoire de la Communauté d'Agglo, réservoir le plus haut de l'Agglo et propriété de celle-ci, qu'arrivent les eaux traitées en provenance de l'usine de Coulonge/Charente. Sa capacité est de 5 000 m³, équivalente à celle de la bêche au sol qui vient d'être mise en service pour doubler le stockage et sécuriser par là même l'alimentation en eau. C'est au Pré Carré que se fait l'ajustement du taux de chlore.

Repères géologiques

C'est le Malm et plus spécifiquement le calcaire kimméridgien fracturé qui constitue l'aquifère régional, sous les alluvions quand elles sont présentes. Cet aquifère fait partie de la nappe générale de la plaine d'Aunis, dans laquelle l'ensemble du Jurassique (Malm, Dogger, Lias) est présent sous la couverture d'alluvions et de formations superficielles. Cette nappe relève des domaines d'étude de l'Institution Interdépartementale du bassin de la Sèvre niortaise. Cette structure de coopération interdépartementale, créée fin 1987 (statuts modifiés en 1990) par les départements de Charente-Maritime, Deux-Sèvres et Vendée, a pour mission principale d'assurer un fonctionnement normal du réseau hydraulique de la Sèvre Niortaise et de ses affluents jusqu'aux exutoires dans la baie de l'Aiguillon. L'institution réalise des études d'intérêt général, ainsi que des travaux. Un des thèmes principaux sur lesquels elle se focalise est la réhabilitation des réseaux (principal, secondaire et tertiaire) d'ouvrages hydrauliques du Marais poitevin.

Au chapitre hydrogéologique, on soulignera l'étude hydrogéologique NIE⁴ de l'Aunis, dont seule la phase 1 a été publiée à ce jour⁵. Un modèle sur les écoulements du bassin, réalisé par l'Institution Interdépartementale, est en voie d'achèvement. L'Institution y étudie l'ensemble des bassins hydrographiques de la région et des prélèvements d'eau réalisés, afin de comprendre les écoulements et d'être en mesure de proposer des seuils de partage de la ressource. C'est un modèle bicouche : calcaire fracturé du Jurassique supérieur et alluvions⁶.

Les captages alimentant La Rochelle en eau potable, quel que soit le champ captant considéré, sont peu pro-

3. Usine + eau captée dans les galeries (4 500 m³/j environ).

4. Nappe Intensément Exploitée.

5. Institution Interdépartementale du bassin de la Sèvre Niortaise. Étude hydrogéologique de la nappe Intensément Exploitée (NIE) de l'Aunis. Safège Ingénieurs Conseils. Rapport d'étude, décembre 2001, 252 p. Téléchargeable sur le site nappeaunis.voila.net

6. Les aquifères discontinus du Lias et du Dogger ne sont pas pris en compte. On dispose d'ailleurs de peu de données piézométriques pour chacun d'eux.

Les bassins d'alimentation des captages de Fraise, Anais et Bois Boulard sont beaucoup plus vastes que celui de Varaize. Outre la mesure sur 50 ha déjà évoquée, on s'efforce de favoriser l'implantation de zones boisées et de prairies. Il faut aussi noter la présence de zones de tourbières en fond de vallée qui favorise la dénitrification naturelle. Des contrôles mensuels sont faits sur les cours d'eau qui montrent de grandes disparités dans les teneurs en nitrates selon la saison. La recharge de ces bassins d'alimentation se fait pour une large part sur les hauteurs périphériques, là où affleurent les calcaires fissurés. Les sols sont peu développés et sur les calcaires jurassiques on ne dépasse guère 10-15 cm de « terres de groies ».

Sur les captages, les contrôles analytiques englobent annuellement deux analyses réglementaires complètes, en hautes et basses eaux, et deux autres analyses de ce type qui permettent de doubler les analyses réglementaires. Des analyses plus ciblées sont aussi faites tous les trimestres, pour la bactériologie et certains types de pesticides : atrazine et dérivés, glyphosate et dérivés. Ces analyses sont faites au laboratoire départemental d'analyses.

Conclusion

L'alimentation en eau de la ville de La Rochelle est l'exemple type d'un compromis entre des ressources souterraines traditionnellement exploitées et une ressource de surface qui couvre les deux tiers des besoins. Cette situation reste fragilisée par l'importance des prélèvements agricoles, plus particulièrement en période d'étiage, et par l'impact des pollutions diffuses en raison de la vulnérabilité des captages. La stratégie retenue consiste à mettre en place des compromis concertés, notamment avec les agriculteurs, pour parvenir à réduire la charge en intrants et optimiser la gestion de l'occupation du territoire. C'est un vaste chantier pour lequel on notera l'importance du rôle de l'hydrogéologue comme intermédiaire entre la gestion d'un aquifère et la pression d'un territoire fortement anthropisé.

Gestion durable d'une ressource karstique – la source du Vivier à Niort

Marc Lambert¹.

Résumé

Le Syndicat des Eaux du Vivier (SEV), producteur et distributeur d'eau potable pour 100 000 habitants du sud des Deux-Sèvres (dont Niort), dépend d'une ressource karstique dont le bassin d'alimentation est en zone agricole céréalière intensive, avec une forte compétition entre usages. L'étiage 2005 a rendu nécessaire la gestion durable et partagée de la ressource, et un modèle prévisionnel de comportement du karst a été élaboré. La présente note résume la démarche, qui a abouti au prix de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne 2007 dans la catégorie « Économies d'eau ».

Introduction

La source du Vivier se trouve située sur la rive gauche de la Sèvre Niortaise, à l'amont de la ville de Niort, et son bassin d'alimentation, de plus de 170 km², s'étend à l'est sur une vingtaine de kilomètres (Fig. 1). Utilisée

depuis le XVIII^e siècle, cette ressource en eau, stratégique à l'échelle du département, fait désormais partie des captages « Grenelle ». Le cycle de réalimentation du karst est annuel et, jusqu'aux années 1970, la source du Vivier a pu, moyennant quelques aménagements, suffire aux besoins de la population croissante, avec ses 2 m³/s en hiver quand la recharge a été bonne.

Depuis les années 1970, le développement de l'agriculture intensive a amené une compétition entre usages durant les mois d'été, qui a abouti à une surexploitation dans les années 90, avec même un effondrement du karst terminal amenant le tarissement complet de la source en 1991, durant plusieurs heures. C'était alors la seule ressource en eau de Niort !

Deux hydrogéologues agréés, Bernard Coirier en 1984 puis Fabrice Moreau en 2003, ont mené des études de terrain (nombreux traçages de M Coirier) et une excellente approche synthétique classique en vue de l'établissement de périmètres de protection. Cependant, les

1. Directeur du Syndicat des Eaux du Vivier (SEV).

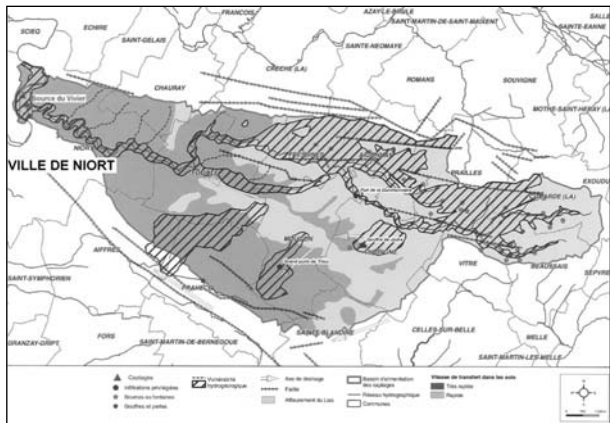


Figure 1. Bassin d'alimentation de la source du Vivier (Coirier, 1984).

moyens mathématiques et informatiques modernes pour l'étude des karsts sont assez récents. Le présent article récapitule les démarches successives du travail mené et le choix d'un outil de gestion par l'exploitant, ainsi que les apports déterminants que cela a permis dans la régulation entre les utilisateurs de la ressource.

Contexte de l'étude, problématique

Après l'effondrement du karst terminal en 1991, des ressources alternatives et interconnexions ont été progressivement mises en œuvre. Mais les prélèvements agricoles pour l'irrigation ont également augmenté, pour atteindre durant les trois mois d'été, sur la trentaine de GAEC² du bassin, l'équivalent de la consommation journalière des habitants du Syndicat ! Il fallait donc fournir les arguments chiffrés et vérifiables de l'impact des prélèvements agricoles amont sur le débit de la source à Niort et fournir des critères objectifs pour la limitation de l'irrigation en fonction de la recharge constatée.

Cela n'a été possible qu'à la suite d'une prise de conscience par tous les acteurs, lors de l'étiage centennal de 2005 qui a démontré la justesse des calculs ayant permis d'anticiper la crise (et un éventuel effondrement irréversible du karst) et d'accompagner la vidange de la nappe en ne prélevant que ce qui pouvait l'être.

Contexte géologique

Le bassin d'alimentation de captage, principalement dans le bassin versant du ruisseau du Lambon, affluent de la Sèvre qui s'y jette à Niort, se situe en bordure NE du Bassin aquitain. Il est constitué de terrains secondaires déposés sur le socle primaire, puis plissés et faillés, avec un pendage général vers le sud-ouest, et il est limité au nord et au sud par des lignes de failles nord-ouest/sud-est (voir figure 1).

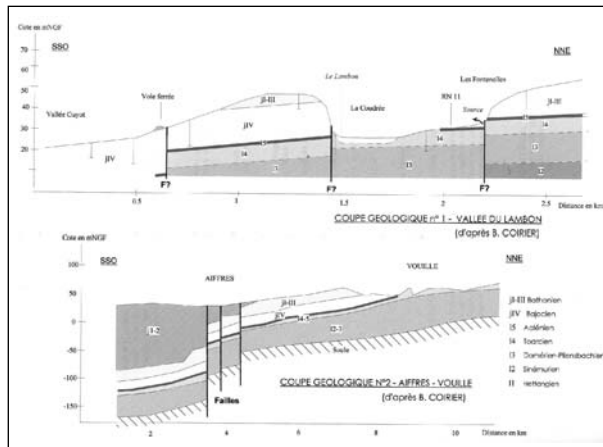


Figure 2. Vues en coupe du bassin d'alimentation de la source du Vivier (Coirier, 1984).

La couverture secondaire est quasiment complète dans ce secteur (Fig. 2), depuis le socle briovérien et l'Infra-Lias, qui affleure par endroits au fond du Lambon, jusqu'au Callovien sur les bordures du bassin, les calcaires affleurants étant parfois recouverts d'interfluves limoneux vers l'est. Des alluvions fluviales quaternaires récentes, peu épaisses, tapissent le lit majeur du Lambon.

Contexte hydrogéologique

L'ensemble Dogger-Lias dans la plaine de Niort détermine l'existence de deux systèmes aquifères carbonatés séparés par un niveau marneux d'âge toarcien. Ces deux systèmes sont désignés sous les termes de « supra-toarcien » et « d'infra-toarcien ». Le réseau de trois captages se situe à proximité de la confluence Lambon-Sèvre, dans un méandre entaillé dans les calcaires « supra-toarciens ». Les calcaires gréseux du Lias moyen affleurent en fond de thalweg, parfois recouverts d'alluvions.

L'aquifère « infra-toarcien » est constitué par les calcaires du Lias inférieur et moyen, à porosité d'interstices, de fissures et de chenaux. La karstification affecte préférentiellement les calcaires dolomités du Jurassique inférieur. Les eaux circulent dans les drains karstiques et sont restituées à la surface par l'intermédiaire de résurgences, dont la principale est l'historique « Source du Vivier ». Il peut être libre, le plus souvent dans les thalwegs, ou captif, selon la présence ou non des marnes toarciennes, dans les zones d'interfluves.

L'aquifère « supra-toarcien » se développe dans les calcaires du Jurassique moyen, à porosité d'interstices, de fissures, et de chenaux mais en moindres proportions que la nappe infra-toarcien. Il est toujours libre, parfois en relation avec l'Infra-Toarcien par l'intermédiaire de failles majeures.

2. Groupements Agricoles d'Exploitation en Commun.

Le contour du *bassin d'alimentation* a été délimité par les centaines de traçages réalisés par Bernard Coirier au cours de sa carrière. Cela n'exclut pas une circulation dans les fissures infratoarciennes, au travers de sa frontière nord notamment, mais les principaux flux météoriques transitent néanmoins globalement au sein des contours de la figure 1. Les circulations mises en évidence depuis des gouffres à plusieurs kilomètres en amont montrent parfois des vitesses de plus de 200 m/h.

Au total, avec 170 à 180 km² de bassin d'alimentation et 300 à 400 mm de pluie efficace, ce sont 45 à 50 millions de m³ qui globalement se dirigent vers l'exutoire du bassin en année moyenne, pour 7 à 9 millions de m³ prélevés pour l'eau potable à l'exutoire tout au long de l'année, et moins de 3 millions pour l'irrigation mais principalement sur les trois mois d'été, dont le mois de septembre qui est toujours tendu sur l'utilisation de la ressource. Avec une année exceptionnelle comme celle de l'étiage centennal de 2005, durant laquelle la recharge a été de moins de 50% de la moyenne, on comprend qu'une gestion de crise a été nécessaire et que l'irrigation a dû être interdite.

Outils testés, comparaison

Modèle maillé ou pas ?

Le contexte précité rend la modélisation numérique maillée très difficile, la géométrie de l'aquifère étant en grande partie inconnue, bien qu'on sache que les réseaux karstiques se sont développés dans les réseaux de fractures associés aux failles, sans compter que la structure des écoulements dans le karst aval n'est pas vraiment modélisable par la loi de Darcy, sauf à une échelle supra kilométrique. Par voie de conséquence, si l'on considère qu'il ne peut s'agir que d'une recherche ou d'une action financée par le service public, la mise au point d'un modèle régional par différences ou éléments finis s'avérerait hors de portée de la collectivité, en raison du temps nécessaire à l'acquisition de données régionales.

De plus un modèle régional maillé rendra difficilement compte des détails de variation du débit exploitable localement en fonction des différents paramètres (pluie, pluie efficace, prélèvements amonts, prélèvements sur la source quand elle ne déborde plus, effets de seuils dans les chenaux du karst aval...).

Dés lors, il existait plusieurs alternatives, plus ou moins déterministes et « boîte noire » pour modéliser le comportement local du karst du Vivier : modèles analytiques de récession, modèles hydrologiques globaux à

réservoirs interconnectés, modèles convolutifs, modèles statistiques... Plusieurs approches ont été testées, dont les résultats sont évoqués ci-après. Ce sont finalement les derniers qui ont été retenus, après que l'approche ait été calibrée grâce aux précédents. Une des motivations a été la nature et la quantité de données disponibles.

Données disponibles

La difficulté de disposer de données précises et fiables au niveau des prélèvements agricoles a conditionné le niveau d'exigence sur le rendu des calages et les simulations. Mais, avec quelques années mieux connues, l'outil s'est avéré cependant suffisant pour permettre de cadrer les prélèvements agricoles sur le bassin, puisque leur influence sur le débit de la source a pu néanmoins être prouvée et grossièrement quantifiée.

Un gros travail préalable de collecte, validation et prétraitement de données a été réalisé de 2003 à 2004, pour acquérir une base de données utilisable avec suffisamment d'historiques pour les modèles, à divers pas de temps (mensuel, hebdomadaire, journalier...).

En outre, des outils sophistiqués d'analyse fréquentielle et statistique (analyse en ondelette, analyse

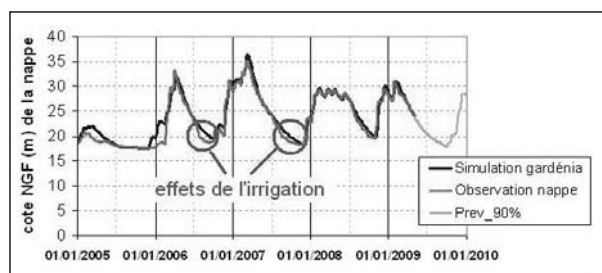


Figure 3. Modélisation hydrologique globale « par boîtes » avec GARDE-NIA: a) simulation GARDENIA, b) observation de la nappe, c) prévisions à 90% (source : M. Lambert 2007).

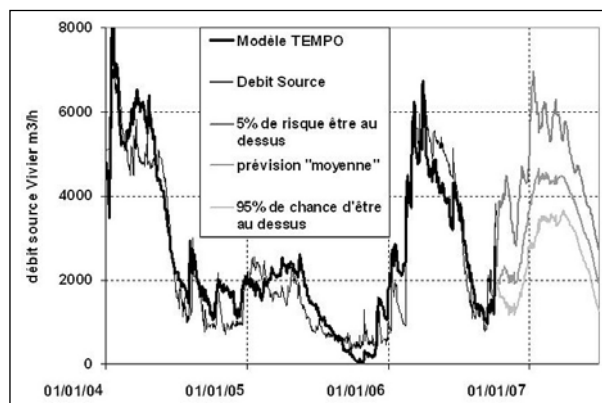


Figure 4. Modélisation de la source avec TEMPO, modèle convolutif. Simulations pour 2007 du débit total Vivier (source : M. Lambert 2007).

Outils	Principes	Apports	Limites
Divers outils <i>USGS</i> ou libres de droit, <i>modèles Mangin / Bakalowicz</i>	Méthodes d'identification de courbes de récession sous formes analytiques	Premières estimations de la cinétique de vidange de la nappe, volumes dynamiques, effets de seuil.	Pas de possibilité d'extrapoler, pas de prise en compte des effets de seuil ni des effets des différentes cinétiques de recharge. Pas de prise en compte des prélèvements. Outil non destiné à un usage prédictif.
<i>Modèle GARDENIA (BRGM)</i>	Modélisation hydrologique globale : vidanges de réservoirs les uns dans les autres après réalimentation par les pluies, et avec contraintes physiques sur les calages de paramètres.	Très bons résultats pour modéliser l'ensemble du cycle, bonnes approximations sur la partie finale du tarissement, ordres de grandeurs physiques plausibles (Fig. 3).	Prise en compte « globalisée » du comportement de la source à partir de 2 ou 3 compartiments virtuels, mais ne rendant pas compte de tous les effets de seuil non linéaires et des différentes cinétiques de recharge, critères de simulations des pluies limités, difficile prise en compte des prélèvements (dans la version testée).
<i>Modèle TEMPO (BRGM)</i>	Modèle de type convolutif, à partir d'identification de réponses impulsionnelles de la source à différents stimuli (pluie, T/ETP, prélèvements...), avec contraintes physiques sur les calages.	Bons résultats de calage, identification des différentes cinétiques de recharge (quelques semaines et quelques mois), quantification de l'action des différents paramètres significatifs (pluie, pluie efficace, prélèvements...), ordres de grandeurs physiques plausibles, excellent simulateur de pluie intégré (Fig. 4).	Complexe à appréhender et délicat à mettre en œuvre, mauvaise prise en compte des prélèvements (dans la version testée), simulations lourdes à mettre en œuvre, modèles contraints pas forcément toujours adaptés à la réalité du phénomène (tendance à lisser).
<i>Modèle neuronal (outil neuro-one, de Netral)</i>	Modèle statistique de type réseaux de neurones, statiques et dynamiques (Fig. 5).	Facilité de mise en œuvre, parfois trop. Possibilité de faire varier les paramètres indépendamment pour observer l'effet sur la source ou la nappe. Simulateur final possible sous forme d'une simple formule Excel... Permet de rendre bien compte des phénomènes non linéaires (seuils, etc.) et de reproduire et quantifier l'effet des prélèvements (Fig. 6).	Outil complexe de compréhension et d'usage délicat. Nécessite des historiques complets et incluant des années extrêmes. L'utilisation n'ayant pas été faite sous contrainte de type semi-physique, il faut donc être conscient des ordres de grandeur des phénomènes. Pas de simulateur de pluies intégré (à gérer en externe).

Tableau n°1. Principes, avantages et inconvénients des modèles testés sur le karst du Vivier.

factorielle, autocorrélation...) ont été développés en régie et utilisés afin de rendre compte, aux diverses échelles, des rythmicités naturelles de la source, distinguer les paramètres significatifs influençant son débit et constituer un jeu de paramètres et de mesures suffisants pour construire un modèle prédictif.

Le SEV étant une collectivité publique, une collaboration avec le BRGM a permis de tester gracieusement divers outils³, parfois encore au stade de recherche-développement, qui ont tous leur utilité mais également leurs limites. Le tableau n°1 résume la démarche suivie et le choix final du modèle type réseau de neurones.

Utilisation de l'outil retenu

Le principe des modèles à réseau de neurones repose intuitivement sur la mémorisation sous contrainte d'échanges entre petites cellules, jusqu'à reproduire les exemples « d'apprentissage », comme le font les neurones du cerveau, avant de se servir du modèle ainsi créé, pour des simulations ou prédictions.

L'apprentissage consiste en une identification et une évaluation des relations (paramètres) de causes (données d'entrées) à effets (résultats de calcul) à partir d'historiques d'exemples observés (données et mesures). Cela se fait via l'ajustement et la mémorisation de la meilleure série testée de poids attribués aux messages échangés entre neurones, et de paramètres de « potentiels

3. Les outils géostatistiques non stationnaires de traitement du signal n'ont pas été testés, faute de temps et de disponibilité d'outils dédiés. Une approche prévisionnelle, de type simulation stochastique sur la base de fonctions aléatoires intrinsèques, pourrait être testée également, éventuellement sur les logarithmes des débits et après filtrage des tendances saisonnières, si possible en introduisant les contraintes physiques entrées/sorties via un cokrigage.

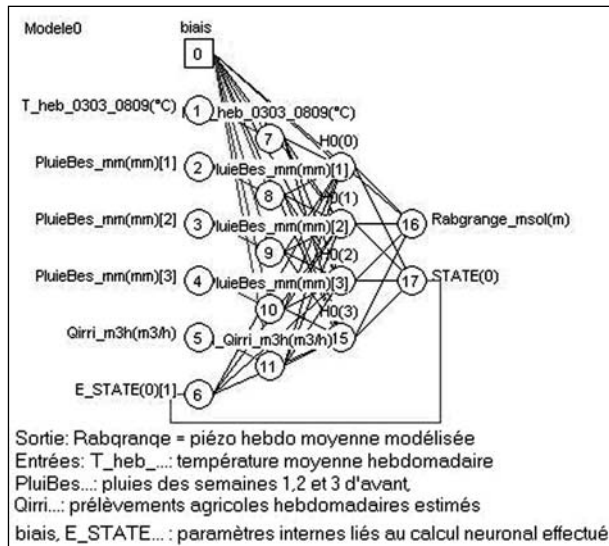


Figure 5. Structure d'un des exemples de réseaux de neurones dynamiques utilisés sur des données au pas hebdomadaire (source : M. Lambert 2007, 2009).

d'activation » des neurones (ex : des fonctions en tangente hyperbolique), qui leur confèrent la capacité de reproduire des phénomènes non linéaires, ce qui est une des forces de ce type d'outils. La figure 5 montre un exemple de modèle neuronal, avec des « cellules » et les relations entre elles, qui a permis de modéliser, par exemple, le comportement de la nappe au pas hebdomadaire (voir résultat figure 6).

Les simulations ont permis, à partir des données basiques disponibles (température, débit, niveau, pluie, prélèvement), de reconstituer les fluctuations de la nappe et/ou de la source, avec une précision suffisante au regard des imprécisions des mesures et du niveau de connaissance des paramètres.

Cependant, il ne faut jamais oublier que la précision et la variabilité des données conditionnent le niveau de calage auquel on souhaite aboutir. D'autre part, il est essentiel de rappeler que dès lors qu'on ne relie pas les paramètres et sorties entre eux *a priori*, avec des contraintes liées aux lois physiques sous-jacentes (comme le font les autres modèles qui ont été testés), les résultats de simulation doivent être toujours regardés avec un œil critique, en particulier quand les phénomènes simulés ou extrapolés sortent de l'enveloppe des historiques entrées/sorties des jeux de données d'apprentissage.

Avec 20 ans de données au *pas mensuel*, on a pu élaborer un modèle statique avec en entrée les pluies brutes sur un seul pluviomètre sur chacun des 6 mois précédant la mesure et les données de prélèvement sur les deux ou trois mois précédents. Cette approche permet, dès la fin du printemps, de réaliser une simulation assez fiable

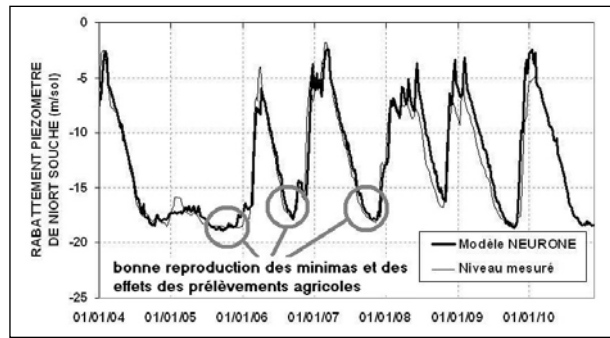


Figure 6. Modélisation type réseau de neurones dynamiques. Simulation de la nappe en fonction des pluies, des prélèvements et des températures hebdomadaires : a) modèle, b) niveau mesuré (source : M. Lambert 2009).

de ce que sera le comportement moyen des mois d'été et d'automne à venir à partir de la recharge constatée la saison humide précédente (octobre à mars). Cela a aidé, par exemple, à la fixation des critères de niveau de la nappe dans l'arrêté cadre annuel pour la limitation de l'irrigation.

Au *pas hebdomadaire*, un modèle dynamique a été construit, (bouclant sur lui-même pour prendre en compte les cinétiques de recharge, voir figure 5), incluant de façon plus détaillée les phénomènes non linéaires liés à « l'écran » que constitue l'évapotranspiration potentielle durant les 6 mois d'avril à septembre. L'effet de réserve utile et l'ETP n'ont pas à être calculés, le modèle identifiant les non-linéarités et les seuils sous-jacents à partir des pluies brutes et des températures, et des historiques disponibles sur quelques années, (dont les années extrêmes de 2001, humide et 2005, sèche) pour l'apprentissage !

Il suffit enfin d'intégrer chaque nouvelle année les apports d'apprentissage de l'année précédente pour affiner le modèle, et l'extrait qui est fait de la formule ainsi calée peut ainsi être facilement mis à disposition des partenaires (État, hydrogéologues...) chaque année, sous forme d'une simple formule Excel.

Perspectives

Issu d'un transfert de technologie entre l'industrie et les sciences de la Terre, le type d'outils proposé ici constitue un complément utile pour l'expérimentation autant que pour le contrôle de procédés ou la modélisation de phénomènes physiques.

Une étude est actuellement menée en relation avec le BRGM, qui souhaite compléter ses approches numériques maillées régionales faites avec le modèle MARTHE. Le projet « CAMERA » (traçages hydrogéochimiques sur le bassin d'alimentation), notamment, permettra de cerner les phénomènes portant à la fois sur la quantité et sur la qualité de la nappe dans un contexte de contentieux européen sur les nitrates.

L'approvisionnement en eau potable de la ville d'Avignon. Impact de l'urbanisation sur la nappe alluviale au confluent Rhône - Durance

Salah Nofal, Bernard Blavoux, Anne-Laure Cognard-Plancq, Vincent Marc, Yves Travi¹.

Présentation du périmètre d'étude

La ville d'Avignon s'étend au confluent du Rhône et de la Durance dans une plaine alluviale quaternaire de forme triangulaire qui a pour limites naturelles, le Rhône au nord ouest, la Durance au sud et les collines tertiaires de Chateauneuf-de-Gadagne à l'est (Fig. 1). Le relief de cette plaine est peu marqué du pied des collines à l'altitude de 40 m, à l'est jusqu'au confluent à l'altitude de 16 m, à l'extrême ouest.

La basse plaine alluviale s'inscrit dans un contexte majoritairement urbanisé où les territoires agricoles n'occupent plus que 30% de la surface. Trois principaux canaux d'irrigation permettent d'alimenter en eau ces terres agricoles de manière gravitaire à l'aide de filioles. Ils jouent un rôle important dans l'aménagement de la région d'Avignon. Le canal Puy, au sud, mis en service en 1808 et long de 10 km permet de desservir 140 ha irrigués (état en 2000) dans la ceinture verte d'Avignon au niveau des berges de la Durance. Le canal Crillon, créé en 1775, s'étend du sud vers le nord sur près de 19 km en comptant ses principales filioles et irrigue 700 ha de parcelles. Le canal de l'Hôpital-Durançole, en position intermédiaire, a été mis en service dès le XIII^e siècle ; il irrigue 266 ha au sud-est de l'agglomération et se termine en ville en traversant plusieurs de ses quartiers (Fig.1).

Contexte géologique

Les alluvions grossières qui constituent la basse plaine d'Avignon proviennent majoritairement du Rhône, dans une moindre mesure, du cône de déjection de la Durance en partie sud, au moment où celle-ci abandonnait son ancien lit, qui l'amenait directement à la Méditerranée via la Crau, pour faire irruption dans le bas Rhône. Cet évènement date probablement ces dépôts du Würm récent et de l'Holocène. L'épaisseur moyenne des alluvions de la basse plaine est de 15 m. Elles sont généralement recouvertes de limons d'inondation argilo-sableux, d'épaisseur variant de 1 à 4 m.

Le substratum de ces alluvions, reconnu par de nombreux forages, est constitué essentiellement par des marnes attribuées au Miocène (Burdigalien) qui affleure à l'est et que l'on retrouve à l'ouest sur l'autre rive du Rhône. Certains forages cependant ont rencontré directement les calcaires du Barrémien sous les alluvions. Cette hétérogénéité du substratum s'accompagne aussi d'une morphologie com-

plexe puisque des pointements de calcaire crétacé s'élèvent au dessus de la plaine d'Avignon, comme au rocher des Doms qui supporte le Palais des Papes et au Mont de Vergues à Montfavet (Fig. 2). Quelques Lambeaux d'une basse terrasse du Rhône émergent aussi de quelques mètres au dessus de la plaine alluviale à l'Est de Montfavet. La coupe hydrogéologique SE-NW reconstituée à partir de quelques forages profonds (Fig. 3) rend bien compte de ce contexte.

Le système aquifère alluvial

Les alluvions récentes du Rhône et de la Durance forment le réservoir d'une nappe importante. Conformément à la nature des matériaux, des sables grossiers riches en galets, la perméabilité est élevée, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. L'emménagement moyen, calculé par essais de nappe, est de l'ordre de 6 % (Bogner, 2004), une valeur quasi équivalente à celle de 5 % avancée par Burgéap (1995) pour la porosité efficace, car la nappe est généralement libre.

Une carte piézométrique détaillée, établie en juillet 2010, soit en période de hautes eaux (Fig. 4), montre un écoulement général E.SE-W.NW dans la partie sud-est de la plaine, révélant une alimentation par la Durance accentuée et perturbée par les importants pompages du champ captant d'Avignon. Plus au nord, les écoulements sont franchement Est-Ouest. Le gradient de la nappe est compris entre 1,5 ‰ et 3 ‰ et varie selon les secteurs et la saison. La nappe circule assez rapidement dans les alluvions (plusieurs mètres par jour). Cette nappe n'est pas profonde, 5 mètres sous la surface du sol en hautes eaux pour sa partie amont et 3 mètres seulement en aval c'est-à-

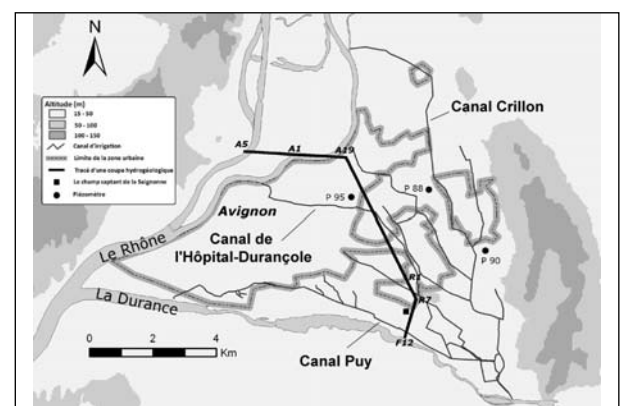


Figure 1. Situation géographique de la plaine alluviale d'Avignon (source Salah Nofal, 2010).

1. Les cinq auteurs sont au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, UMR 1114 UAPV-INRA « EMMAH », UFR Sciences, 33 rue Pasteur, 84000 Avignon.

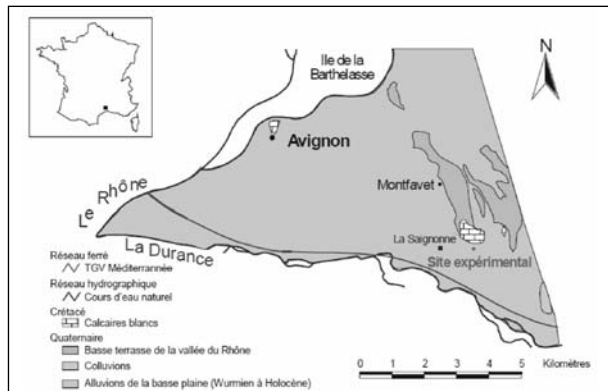


Figure 2. Schéma géologique de la plaine d'Avignon (Bogner, 2004).

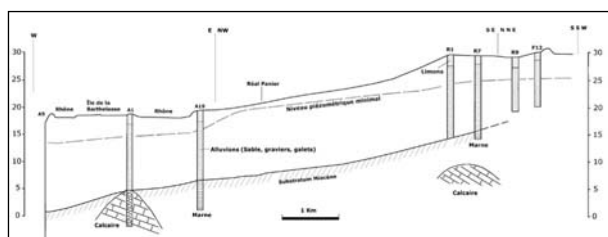


Figure 3. Coupe hydrogéologique SE-NW de l'aquifère alluvial (source Salah Nofal, d'après Durozoy 1964).

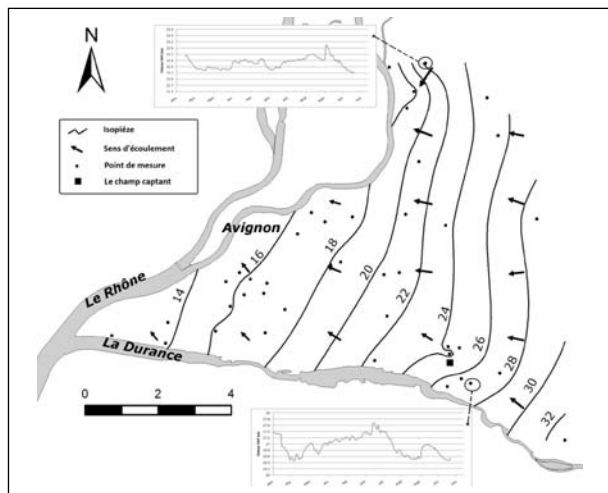


Figure 4. Carte piézométrique en hautes eaux (source Salah Nofal).

dire sous le centre ancien d'Avignon et sa proche périphérie. Cet état de fait est un obstacle majeur au creusement de sous sols et parkings dans l'agglomération.

La réalimentation de l'aquifère alluvial d'Avignon par les surplus de l'irrigation gravitaire est bien mise en évidence par les variations de niveau de trois piézomètres de l'ancien réseau de surveillance de la DIREN²- PACA³ (Fig. 5). Les deux piézomètres amont accusent classiquement des oscillations de plus de 3 m alors que le piézomètre aval, proche du niveau de base que constitue le Rhône,

présente des variations inférieures au mètre. Mais la particularité réside dans la régularité et la chronologie saisonnières de ces variations. On observe un régime de hautes eaux en été (juillet) en l'absence de pluie efficace quand l'irrigation est à son maximum et de basses eaux en hiver (février et mars) quand les canaux d'irrigation sont au chômage. Cette particularité persiste, comme le montrent les enregistrements récoltés en 2010 sur deux piézomètres du même périmètre (voir figure 4).

Ainsi, on doit considérer que l'alimentation principale de l'aquifère alluvial d'Avignon se fait sur sa frontière sud-est par les entrées en provenance de la Durance et par la réalimentation de l'irrigation gravitaire sur les terres agricoles. Les pluies efficaces et l'alimentation en provenance des versants molassiques ne jouent qu'un rôle mineur.

L'alimentation en eau potable d'Avignon

Le champ captant de la ville d'Avignon

Le champ captant de la Saignonne situé à quelques kilomètres au sud-est d'Avignon (voir figure 1) constitue la seule ressource en eau potable de la collectivité. Il est constitué de 18 puits ou forages d'une profondeur moyenne de 20 m atteignant le substratum marneux. Ces ouvrages puisent en moyenne 40 000 m³/jour pour 100 000 usagers. Leur capacité maximum peut atteindre 57 000 m³/jour.

La couche de limon de surface a une épaisseur comprise entre 1 et 3 m et une perméabilité de l'ordre de 1.10⁻⁵ m/s. Le réservoir alluvial, constitué de sable grossier à moyen avec de nombreux galets, est épais en moyenne de 17 m et a une perméabilité de 7.10⁻³ m/s. Les transmissivités mesurées sont comprises entre 5.10⁻² et 2.10⁻¹ m²/s.

L'écoulement de la nappe se fait vers le nord-ouest, de la rivière vers la nappe, phénomène accentué par les pompages. Les basses eaux correspondent à la période hivernale et à un débit de la Durance inférieur à 20 m³/h,

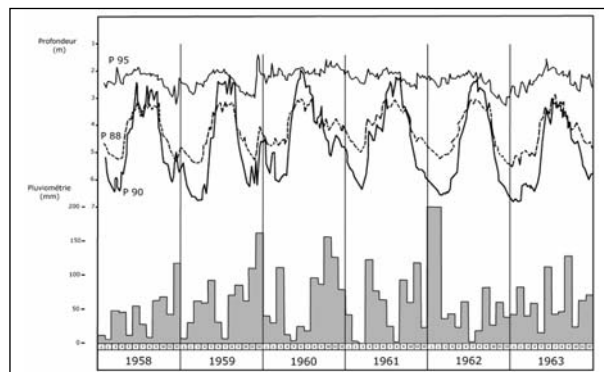


Figure 5. Variations pluriannuelles de niveau dans 3 piézomètres du système alluvial (Durozoy 1964).

2. DIREN (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) aujourd'hui.

3. Provence - Alpes - Côte d'Azur.

les hautes eaux, à la période estivale (irrigation) ou à des crues de la Durance. Ces observations témoignent d'une double alimentation de l'aquifère par la Durance et par les surplus de l'irrigation gravitaire. Le niveau de la nappe oscille vers 5 m de profondeur, soit au dessous de la base des limons peu perméables ; la nappe est donc libre dans ce secteur. En cas de très forte crue de la Durance, la nappe peut être, pendant quelques jours, captive sous les limons.

L'eau prélevée sur le site de la Saïgnonne est de bonne qualité, de type bicarbonaté calcique, assez minéralisée avec une conductivité électrique de 700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et dure. Elle présente des teneurs en sulfate significatives (100 mg/l) d'origine durancienne et des teneurs en nitrates très faibles de l'ordre de 4 mg/l. Préalablement à son refoulement vers les réservoirs et dans le réseau, l'eau est stérilisée par un traitement au bioxyde de chlore.

La ressource est donc abondante, de bonne qualité mais unique et elle est vulnérable dans un environnement urbanisé en pleine extension. Pour sa protection, deux aspects méritent d'être abordés, l'aspect qualitatif avec la vulnérabilité de l'aquifère et les mesures de protection du champ captant mais aussi l'aspect quantitatif avec l'impact possible de la diminution des surfaces agricoles irriguées sur l'alimentation de l'aquifère.

Vulnérabilité de la ressource et protection

La nappe est peu profonde (5 m) et de ce fait très vulnérable. Sa seule protection naturelle est assurée par la couche de limon de surface qui assure une forte rétention et une infiltration lente. Mais son épaisseur est quelquefois réduite à 1 m et cette couche de protection peut être décapée lors de chantiers de construction ou d'aménagement. La Durance, qui alimente la nappe, n'est éloignée que de 700 m des premiers ouvrages de captage et les temps de transfert depuis ses berges sont de l'ordre de 10 jours.

De nombreuses études ont été menées (Ciron, 1986 et Garnier, 1987) pour une nouvelle délimitation des périmètres de protection (Fig. 6). Le périmètre de protection rapproché a été étendu au lit de la Durance sur ses deux berges et sur une distance de près de 4 km vers l'amont et le périmètre de protection éloigné agrandi vers l'est - sud-est de façon à englober le technopôle d'Agroparc et la zone aéroportuaire.

La construction de la ligne TGV qui traverse le périmètre rapproché sur près de 1 200 m entre la Durance et les puits, à quelque 600 m de ceux ci (voir figure 6), a nécessité de la part de la SNCF d'importants travaux de protection du champ captant avec la mise en place d'un dispositif hydraulique destiné à intercepter toute pollution de la nappe pouvant résulter du chantier (Burgéap, 1995). Une barrière hydraulique constituée par 5 ouvrages de pompage disposés entre le champ captant et la ligne TGV

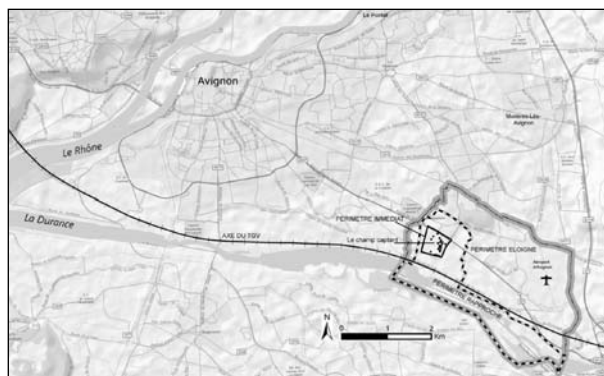


Figure 6. Tracé des périmètres de protection du champ captant d'Avignon (source Salah Nofal, 2010, d'après Burgéap 1995).

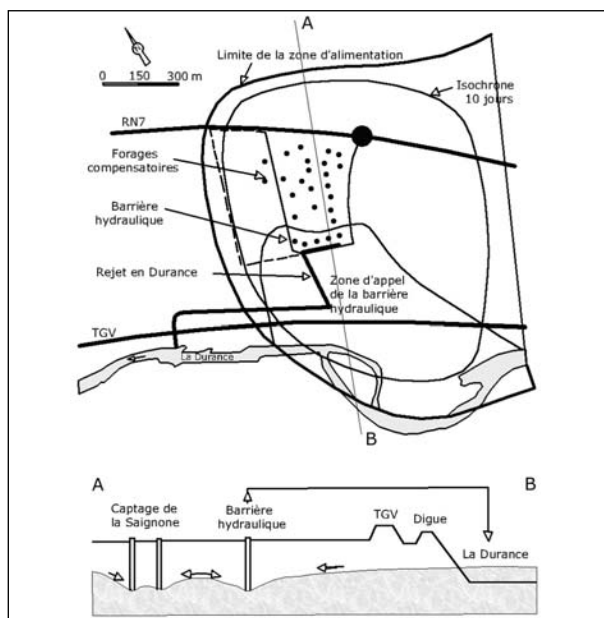


Figure 7. Schéma du dispositif de la barrière hydraulique et de son fonctionnement (Burgéap, 1995).

(Fig. 7) a pour fonction de créer une dépression continue dans la nappe sur toute la largeur du front (700 m) capable d'intercepter d'éventuelles pollutions. Les eaux pompées par la barrière hydraulique sont rejetées en aval, dans la Durance, par une conduite de 1 km.

Un essai de fonctionnement de la barrière hydraulique durant 15 jours avec une simulation de transfert de pollution par injection de 2 traceurs (iodure de sodium et amino G acide) a confirmé l'efficacité de la protection dynamique du champ captant.

Ce dispositif n'a pas eu à fonctionner pendant toute la durée des travaux TGV. Il reste néanmoins en place et constitue un ouvrage de protection du champ captant contre une pollution accidentelle en provenance de la Durance. Il n'a pas été possible jusqu'à présent de trouver pour la ville d'Avignon une ressource de substitution

dans la nappe alluviale en relation avec le Rhône, notamment à cause de teneurs élevées en fer et manganèse entraînées par les aménagements hydrauliques du fleuve dans les années 70. C'est pourquoi, en parallèle à ces travaux le réseau AEP d'Avignon a été connecté à celui du Syndicat Rhône-Ventoux, pour assurer une alimentation de crise en cas de pollution survenant à la Saignonne.

Impact des changements d'occupation des sols sur l'alimentation

Le problème est posé et mérite d'être quantifié. On sait, d'après de nombreuses études menées sur la plaine alluviale de Basse Durance, notamment dans la région de Cavaillon (synthèse de B. Blavoux 2003), que 25% des eaux apportées par l'irrigation gravitaire s'infiltrent et réalimentent l'aquifère. Cette évaluation a d'abord été obtenue de manière globale, dès 1991, en utilisant le marquage isotopique naturel (^{18}O de la molécule d'eau) des eaux d'origine durancienne. Elle a été confirmée et affinée par des bilans hydrologiques réalisés en 1999 sur le périmètre expérimental du canal Saint Julien (Cavaillon). Pour l'ensemble de ces canaux et filioles d'irrigation desservant 3 800 hectares, le total des prélèvements s'élevait en 1999 à 162,4 millions de m^3 , dont 44,5 (27%) avaient réalimenté l'aquifère, comme cela a été montré.

La disparition des zones irriguées dans la partie sud-est de la plaine alluviale d'Avignon porterait donc atteinte à une partie de l'alimentation du champ captant. Même si on peut penser que cette perte serait compensée par des venues de la Durance, il vaut mieux conserver une dualité d'alimentation au champ captant, en cas de pollution de la rivière qui nécessiterait l'activation de la barrière hydraulique.

À l'échelle de la plaine alluviale d'Avignon, la poursuite de l'extension de l'agglomération vers l'est, entraînerait la disparition des périmètres encore irrigués et porterait atteinte au soutien de la nappe, à son débit, à son niveau et peut-être à sa qualité.

Conclusion et perspectives

L'alimentation en eau potable de la ville d'Avignon provient d'une source unique en nappe alluviale, le champ captant de la Saignonne qui doit ses débits importants et sa bonne qualité à la seule Durance. Cette alimentation se fait en effet à la fois de façon directe par infiltration de l'eau du fleuve à travers ses berges et de façon indirecte par les surplus infiltrés de l'irrigation gravitaire dont l'eau est dérivée de cette même Durance un peu en amont. Cette unique dépendance poserait de graves problèmes si la Durance venait à connaître une pollution accidentelle. C'est pourquoi la ville cherche une ressource alluviale de qualité dépendant du Rhône, en vain jusqu'à présent, car les ressources

reconnues sont polluées par le fer et le manganèse.

L'extension de l'agglomération bloquée par le Rhône s'est rapidement faite vers l'Est transformant des terres irriguées en zones résidentielles. L'impact de l'irrigation sur la nappe alluviale s'en trouve réduit. Les conséquences de cette situation ne sont pas quantifiées et on ne saurait dire comment elles sont préjudiciables à la ressource et à sa qualité. C'est pourquoi l'un de nous (S. Nofal) a entrepris un travail de thèse sur ce système hydrogéologique avec comme objectif l'élaboration d'un bilan en eau au pas de temps mensuel ou évènementiel si possible. Le but ultime sera de proposer un modèle de fonctionnement hydrogéologique de la zone intégrant le rôle du sol et de son usage.

L'installation de la ville sur un aquifère peu profond (3 à 4 m) et abondant pose par ailleurs d'autres problèmes qui ne peuvent pas être développés ici. Outre que cette situation constitue un gros handicap dès que l'on doit creuser des excavations, elle a longtemps interdit à la ville de traiter ses eaux usées qui étaient trop diluées par les entrées d'eau claire du fait que le réseau de collecteurs se trouvait sous le niveau de la nappe. Ainsi, jusque dans les années 1990, les effluents de la zone urbaine d'Avignon étaient évacués vers le Rhône sans traitement préalable car l'application des procédés classiques d'épuration n'était pas envisageable à cause d'une DBO_5 des effluents trop faible ($< 8 \text{ mg/l}$) et d'un débit trop élevé, rarement inférieur à $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Ogias et Mme Bizard de la Mairie d'Avignon, MM. Gourmelon et Bahègne ainsi que Mme Guiroy-Vannier de la Communauté du Grand Avignon (COGA) et M. Muscat de la Chambre d'Agriculture de Vaucluse pour les données et renseignements qu'ils nous ont communiqués.

Références

- Blavoux B., 2003 : La réalimentation de l'aquifère alluvial par l'irrigation gravitaire en Basse Durance. Études Vauclusiennes n° 70, juillet-décembre 2003.
- Bogner C., 2004 : Étude hydrodynamique et hydrochimique de la nappe alluviale à la confluence Rhône-Durance, Mémoire de Master 2, Université d'Avignon, 42 p.
- Burgéap, 1995 : État de référence des eaux souterraines et proposition de suivi des impacts - Confluence Rhône/Durance-Bonpas, rapport R/Av. 422 A.4607-C795.221.
- Ciron P et Garnier J.-L., 1986 : Vulnérabilité et protection du champ captant de la Saignonne (Vaucluse). Rapport BRGM 86 SGN 284 PAC.
- Durozoy G., Gouvernet Cl., Margat J., 1964 : Recherches hydrogéologiques dans la zone Avignon-Sorgues. Rapport BRGM, DS-GR 64 A22.
- Garnier J.-L., 1987 : Propagation des pollutions accidentelles et protection des ouvrages de captage en nappe alluviale- Site expérimental d'Avignon (84), nappe de la Durance. Rapport BRGM 87 SGN 839 PAC.
- Monjuvent G. *et al.* 1991 : Notice explicative de la feuille Avignon à 1/50 000. Carte géologique de la France à 1/50 000 feuille Avignon. Édition du BRGM -BP 6009 - Orléans.