



Étude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale d'Avignon : impact de l'usage du sol sur les mécanisme de recharge

Salah Nofal

► To cite this version:

Salah Nofal. Étude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale d'Avignon : impact de l'usage du sol sur les mécanisme de recharge. Sciences agricoles. Université d'Avignon, 2014. Français. ⟨NNT : 2014AVIG0051⟩. ⟨tel-01202749⟩

HAL Id: tel-01202749

<https://theses.hal.science/tel-01202749v1>

Submitted on 21 Sep 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

ACADÉMIE D'AIX-MARSEILLE

**UNIVERSITÉ D'AVIGNON
ET DES PAYS DE VAUCLUSE**

THÈSE

Présentée à l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

Spécialité : **Hydrogéologie**

École doctorale 536 « **Agrosciences et Sciences** »

UMR 1114 EMMAH INRA-UAPV
Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE D'AVIGNON

Impact de l'usage du sol sur les mécanismes de recharge

Présentée par

Salah NOFAL

Soutenue le 11 septembre 2014 devant le jury composé de :

F. BARBECOT	Professeur, Université du Québec, Canada	Rapporteur
C. LEDUC	Directeur de recherche, IRD	Rapporteur
H. ROULLIN	Directeur, ASA du Canal St-Julien	Examineur
V. MARC	Maître de conférences, Université d'Avignon	Examineur
Y. TRAVI	Professeur émérite, Université d'Avignon	Directeur de thèse
A.L. COGNARD-PLANCQ	Maître de conférences, Université d'Avignon	Encadrant
O. BANTON	Professeur, Université d'Avignon	Invité

Avant-propos

Ma thèse s'est déroulée au sein du laboratoire d'hydrogéologie à l'université d'Avignon de l'unité de recherche EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes) en coopération avec l'INRA (Institut National des Recherches Agronomiques) avec le soutien financier du CNOUS (Centre National des Œuvres Universitaires et Scolaires) en partenariat avec l'université de Damas de Syrie.

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse ont fait l'objet de deux publications (Annexe 4 et 5) :

- Nofal S., Blavoux B., Cognard-Plancq A.L., Marc V. & Travi Y. (2012). L'approvisionnement en eau potable de la ville d'Avignon. Impact de l'urbanisation sur la nappe alluviale au confluent Rhône - Durance. *Géologues*, 167 : 61-64
- Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Tison F., Daniel M. & Travi Y. (2012). Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en basse Provence : exemple de la plaine d'Avignon. In De l'eau agricole à l'eau environnementale en Méditerranée, Résistance et adaptation aux nouveaux enjeux de partage de l'eau en Méditerranée, Coordination C. Aspe, Ed. Quae, Paris, France. ISBN 9782759216963 (384 pages) pp. 159-173.

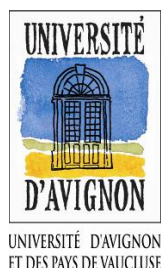
d'une communication orale :

- Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Tison F., Daniel M. & Travi Y. (2011). La recharge des nappes par les eaux d'irrigation en Basse Provence : exemple de la plaine d'Avignon. Actes du Colloque LPED/IMEP/GIEST Usages écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en méditerranée : quels enjeux pour quels services ? Atelier 3, État écologique, biodiversité et paysages de l'eau, 20-21 janv. 2011, Marseille (FRA), 12 pp. <http://www.lped.org/actes-du-colloque-eau-agricole/theme3.html> (dernière consultation : 07/01/2015)

Et d'une présentation sous forme de poster :

- Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Travi Y. & Danquigny C. (2010). Fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale d'Avignon. Impact des changements globaux (climat et usage du sol). [Poster]. 23^{ème} Réunion des Sciences de la Terre ; 25-29 octobre 2010, Bordeaux (FRA).

ainsi qu'une publication soumise à Hydrogeology Journal: Impact of land use on groundwater recharge in an alluvial aquifer: Case of Avignon aquifer, France.



Remerciements

Je suis très reconnaissant envers mon directeur de thèse, M. Yves TRAVI. Sa grande expérience scientifique ainsi que tous ses conseils promulgués avec beaucoup d'attention m'ont grandement aidé pour avancer dans les meilleures conditions.

Mes remerciements vont également à mes co-directeurs de thèse, Anne Laure COGNARD-PLANCQ et Vincent MARC pour leur continuelle attention, conseils et encadrement tout au long de ma thèse.

Je remercie Christian LEDUC, Florent BARBECOT et Hervé ROULLIN pour avoir accepté de faire partie des membres de mon jury de thèse.

Je n'oublie pas M. BLAVOUX que j'ai eu l'honneur de rencontrer avant qu'il ne nous quitte.

J'aimerais remercier l'ensemble du personnel du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. Leur accueil depuis mon arrivée et leur gentillesse m'ont beaucoup aidé. Merci à Olivier, Vincent V., Christophe, Kostas, Adriano, Marina, Naomi, Patrice et Aurélie. Je n'oublie pas les anciens du laboratoire : Dominique, Jean Michel et Jean Claude.

Je tiens à remercier les techniciens du laboratoire sans lesquels il aurait été difficile de mener à bien cette thèse. Je remercie vivement Michel DANIEL pour son grand investissement tout au long de ma thèse telle que son efficace contribution aux campagnes de mesures sur le terrain et au laboratoire et ceci toujours dans la bonne humeur. Un grand merci à Roland SIMLER pour son aide au laboratoire et pour ses nombreuses discussions intéressantes. Merci à Milanka BABIC pour sa gentillesse et sa grande générosité.

Je remercie les chercheurs de l'INRA notamment l'Equipe Sol et l'Equipe Climat. Merci à Franck TISON, Albert OLIOSSO, Claude DOUSSAN et Charles DANQUIGNY.

Je tiens à remercier tous les organismes ayant facilité ma mission de collecte des données et des mesures. Je cite M. OGIAS et Mme BIZARD de la mairie d'Avignon, Mme BEAUMONT de la DDT, M. PAWLOWSKI et M. BLANC de la DDASS, M. BAHEGNE et M. GOURMELON de la COGA, M. MARCHAND de l'Université de Montpellier 2, M. ARRIGONI de l'Entreprise EURENCO, M. DODDOLI et Mme MOREAU du SMAVD, M. GROS de l'Aéroport d'Avignon.

Un grand merci à Nicolas GAUTIER pour son aide et ses conseils très intéressants.

Merci à mes collègues de troisième cycle, Aurore, Laura, Simon. Merci à mon collègue de bureau, voisin et mon ami, Thao. Merci à Emilie pour sa gentillesse et sa sympathie.

Un grand merci à Mme MAISONNEUVE pour sa gentillesse et ses nombreuses attentions. Merci à Ammi Majd, Nabil, Laurent, Adrien, Nathan et Nicolas pour tous les bons moments passés avec eux.

À toi Violaine un grand merci pour ton continuel soutien.

Je remercie ma famille et surtout mes parents qui m'ont toujours soutenu.

Et je remercie vivement mon pays, la Syrie, de m'avoir fait confiance et de m'avoir donné l'opportunité d'étudier en France.

Je tiens à remercier les professeurs à l'Université de Damas. Merci à Yasser MOHAMED, Saleem HAMEED, Kayed MALOULA, Amer GHABRA, Nihad BAHWI et tous les professeurs du Département de Géologie à la Faculté des Sciences de Damas pour leur soutien.

...À ma famille, À mes parents
إهداء إلى عائلتي... إلى أبي وأمي

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	2
TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS	6
INTRODUCTION.....	8
1. CADRE DE L'ÉTUDE	10
1.1. Situation géographique	11
1.2. Climatologie.....	13
1.2.1. Les températures.....	13
1.2.2. Les vents	14
1.2.3. Les précipitations	14
1.2.4. Diagramme ombrothermique	15
1.2.5. Évapotranspiration potentielle	15
1.3. Réseau hydrographique.....	16
1.3.1. La Durance.....	16
1.3.2. Le Rhône.....	17
1.3.3. Réseau de canaux agricoles	17
1.4. Contexte géologique	21
1.4.1. Crétacé inférieur.....	22
1.4.2. Miocène	22
1.4.3. Pliocène marin (Plaisancien)	22
1.4.4. Quaternaire	22
1.5. L'irrigation gravitaire et l'urbanisation.....	26
1.5.1. Irrigation et recharge des nappes.....	26
1.5.2. Urbanisation et cycle de l'eau.....	27
1.5.3. Conclusion.....	28
1.6. Objectifs.....	30
2. MÉTHODOLOGIE.....	31
2.1. Méthode	32
2.2. Données acquises	33
2.2.1. Descriptif des points de mesures	33
2.2.2. Mesures en laboratoire.....	35
2.3. Données acquises auprès d'organismes extérieurs	36
2.3.1. Mesures piézométriques	36
2.3.2. Données climatiques.....	36
2.3.3. Suivi hydrodynamique de la Durance.....	36
2.3.4. Mesures hydrométriques.....	36
3. HYDRODYNAMIQUE ET PIÉZOMÉTRIE.....	39
3.1. Le réservoir aquifère	40
3.1.1. Nature du réservoir	40
3.1.2. Limites du réservoir.....	40
3.1.3. Caractéristiques hydrodynamiques	43
3.2. Régime de la nappe.....	44
3.2.1. Changement de long terme du niveau piézométrique.....	48
3.2.2. Sources d'alimentation de la nappe	48

4. HYDROCHIMIE	69
4.1. Intérêt de l'approche hydrochimique	70
4.1.1. Généralités	70
4.1.2. Informations apportées par les espèces majeures	70
4.2. Caractérisation de la nappe alluviale de la plaine d'Avignon à partir des éléments chimiques et isotopiques	72
4.2.1. Distribution géographique de la chimie de l'eau	72
4.2.2. Faciès chimique des eaux	77
4.2.3. Analyses en Composantes Principales	79
4.2.4. Relation inter-éléments	80
4.2.5. Indices de Saturation (IS)	84
4.3. Les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$)	86
4.3.1. Généralités	86
4.3.2. Signal pluie	90
4.3.3. Les eaux de surface	91
4.3.4. La nappe	93
4.3.5. Modélisation du transfert du signal $\delta^{18}\text{O}$	99
4.4. Le Tritium ^3H	103
5. FONCTIONNEMENT DE LA NAPPE ALLUVIALE D'AVIGNON	105
6. MODÉLISATION DE DIVERS SCÉNARIOS	111
6.1. La modélisation numérique	112
6.1.1. Maillage du modèle et les conditions aux limites	113
6.1.2. La recharge	116
6.1.3. Les pompages	118
6.2. Calage	118
6.2.1. Le régime permanent	118
6.2.2. Le régime transitoire	123
6.3. Analyses de sensibilité	130
6.4. Simulations de scénarios	132
7. CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	135
BIBLIOGRAPHIE	138
LOGICIELS UTILISÉS	147
LISTE DES FIGURES	148
LISTE DE TABLEAUX	153
LISTE DES ANNEXES	154

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS

% : pourcentage

‰ : pour mille

ACP : Analyse en Composante Principale

ADES : banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

AEP : Alimentation en Eau Potable

AIEA : Agence Internationale de l'Énergie Atomique

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

cf : *confer*

CNOUS : Centre National des Œuvres Universitaires et Scolaires

CNR : Compagnie National du Rhône

COGA : Communauté d'Agglomération du Grand Avignon

DDASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales

DDEA : Direction Départementale de l'Équipement et de l'Agriculture

DDT : Direction Départementale des Territoires

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EDF : Électricité de France

EMMAH : Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

EPM : en anglais, *Exponential-Piston Model*, en français, modèle exponentiel-piston

ETP : ÉvapoTranspiration Potentielle

ETR_m : ÉvapoTranspiration Réelle maximale

GMWL : en anglais, *Global Meteoric Water Line*, en français, droite météorique mondiale

GNIP : en anglais, *Global Network of Isotopes in Precipitation*

GPS : en anglais, *Global Positioning System*, en français, système de localisation mondial

ha : hectare

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

IS : Indice de Saturation

Km : kilomètre

Km² : kilomètre carré

LMWL : en anglais, *Local Meteoric Water Line*, en français, droite météorique local

m : mètre

m³ : mètre cube

mm : millimètre

MNT : Modèle Numérique du Terrain

NASA : en anglais, *National Aeronautics and Space Administration*, en français, administration nationale de l'aéronautique et de l'espace

NGF : Nivellement Général de la France

RU : Réserve Utile

s : seconde

SIG : Système d'Information Géographique

SMAVD : Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance

SPCGD : Service de Prévision des Crues du Grand Delta

SRTM : en anglais, *Shuttle Radar Topography Mission*

Sy : en anglais, *Specific Yield*, en français, coefficient d'emmagasinement

TER : Transport Express Régional

TGV : Train à Grande Vitesse

UMR : Unité Mixte de Recherche

UT : Unité Tritium

vs : *versus*

VSMOW : en anglais, *Vienna Standard Mean Ocean Water*, en français, eau océanique moyenne normalisée de Vienne

INTRODUCTION

Les nappes alluviales représentent en France environ la moitié des ressources aquifères exploitées pour diverses utilisations. Du fait de leur situation à proximité de la surface, elles sont directement liées à l'eau de surface et impactées par différents processus qui contrôlent la distribution de cette eau.

En Basse Provence, dont la région d'Avignon fait intégralement partie, l'irrigation a toujours tenu une place importante pour pallier le déficit pluviométrique pendant les périodes de croissance et de production végétale. Outre le bénéfice direct sur la production agricole, un effet induit par les pratiques d'irrigation a été mis en évidence sur les nappes alluviales (Faguet et al., 1980 ; Lacroix, 1991). En effet, les apports d'eau par irrigation gravitaire ne sont que partiellement utilisés par les plantes. Une part non négligeable de cette eau s'infiltre et percole vers les nappes.

À partir de la Durance, la plaine d'Avignon est parsemée de canaux et de filioles destinés à l'irrigation des cultures. Cette irrigation, encore très active, participe à la recharge de l'aquifère de telle sorte que localement le niveau d'eau de la nappe est maximum l'été et minimum l'hiver.

La plaine alluviale d'Avignon est extrêmement diversifiée au niveau de l'usage des terres. Autrefois principalement agricole, cette région subit actuellement une urbanisation importante avec l'extension progressive de l'agglomération d'Avignon même si aujourd'hui, on observe encore très clairement sur les photos satellites la limite entre la zone urbaine avignonnaise et la partie plus agricole.

Dans ce contexte d'urbanisation qui tend à réduire les surfaces irriguées et par là même l'alimentation de la nappe, l'impact de l'irrigation est particulièrement important à appréhender.

Pour anticiper les conséquences d'une telle évolution du territoire et arriver à une gestion raisonnée de la ressource en eau dans cette région, il est fondamental de comprendre les modes de recharge des aquifères, et de faire la part entre les apports naturels et les apports anthropiques.

L'objectif final de la thèse est d'élaborer un bilan en eau au pas de temps mensuel ouvrant la voie à la construction d'un modèle de fonctionnement hydrogéologique de la zone intégrant le rôle du sol et de son usage.

Ce travail est basé sur une démarche multi-approches utilisant, en particulier, la complémentarité entre le suivi piézométrique (carte piézométrique à différentes périodes de l'année, suivi chronologique ponctuel) et le traçage naturel de l'eau (signal hydrochimique et isotopique).

Le mémoire est conçu suivant trois grandes parties regroupant chacune plusieurs chapitres :

- La première partie, regroupant les chapitres 1 et 2, présente le contexte géographique, géologique et climatique de la zone d'étude ainsi que la stratégie d'étude et les méthodes d'acquisition des données réalisées dans le cadre de ce travail.
- La deuxième partie regroupe les chapitres 3 et 4 et concerne plus spécifiquement l'ensemble des mesures et interprétations réalisées dans ce travail. Elle comprend l'aspect hydrogéologique qui fournit une description détaillée du réservoir alluvial, des caractéristiques et de son fonctionnement hydrodynamiques ainsi qu'une évaluation quantitative des apports (conditions aux limites) aux différents compartiments du système. Cette approche s'appuie essentiellement sur les données de plusieurs années de campagne piézométrique, le bilan hydrologique et l'étude détaillée des échanges avec la Durance. Cette deuxième partie comprend également l'apport de l'hydrochimie et des isotopes de l'eau. Ces outils viennent compléter et confirmer l'aspect hydrodynamique. Ils permettent en particulier de localiser et d'évaluer les volumes d'apport des différentes sources d'alimentation dans les différents compartiments du système.
- La dernière partie résume l'ensemble des résultats obtenus et tente d'établir un modèle conceptuel du système à partir des éléments développés aux chapitres précédents. On tente alors la construction du modèle hydrogéologique. Différents résultats sont présentés à la lumière de cette modélisation notamment les conséquences de différents scénarios d'évolution.

1. CADRE DE L'ÉTUDE

1.1. Situation géographique

La plaine d'Avignon correspond à la partie occidentale de la plaine alluviale du Comtat Venaissin limitée à l'Est par les reliefs des Monts de Vaucluse et du Ventoux et à l'Ouest par les plateaux calcaires des Garrigues. Des reliefs miocènes partagent la plaine du Comtat en deux parties, la partie occidentale étant représentée par la plaine alluviale d'Avignon (**Figure 1**). Cette plaine, édifiée par le Rhône, s'élargit après le goulet de Roquemaure pour atteindre une dizaine de kilomètres à la latitude d'Avignon. La plaine d'Avignon de forme triangulaire a pour limites naturelles le Rhône au nord-ouest, la Durance au sud et les collines de Morières-Lès-Avignon à l'est et présente une superficie d'environ 70 Km² (**Figure 2**). Le secteur présente une topographie globalement homogène, avec des altitudes comprises entre 20 et 35 mètres d'altitude, d'où ressortent le Mont de Vergues (75 m d'altitude) et le rocher des doms (35m). De ce fait, le secteur présente une faible pente, inférieure à 1%, orientée majoritairement vers l'ouest. La pente générale du Nord au Sud est très faible (0.3 %).

Les principales zones urbaines sont constituées par les communes d'Avignon, du Pontet, de Montfavet et de Morières-Lès-Avignon. Le réseau hydrographique est principalement représenté par le Rhône, la Durance, les canaux d'irrigation, et plusieurs plans d'eau naturels ou artificiels comme le lac de Saint-Chamand à l'est de la ville d'Avignon. Le secteur s'inscrit dans un contexte majoritairement urbanisé où les territoires agricoles n'occupent plus que 30% de la surface. De nombreuses zones commerciales et industrielles (Mistral 7, Cap Sud, Fontcouverte, La Courtine...) sont installées aujourd'hui à la périphérie d'Avignon. La plaine est parcourue par des réseaux de transport denses :

- Le réseau routier (présence de l'autoroute A7 à l'est de la zone d'étude, de la Nationale 7 au sud et de plusieurs routes départementales).
- Le réseau ferroviaire (présence de la gare TGV au sud et de la gare TER au centre-ville d'Avignon avec la convergence de plusieurs voies de chemin de fer).
- Le transport aérien (aéroport sur le secteur d'Agroparc à l'est d'Avignon).

Le champ captant de la Saignonne situé à quelques kilomètres au sud-est d'Avignon (**Figure 1**) constitue la seule ressource en eau potable collective. Il est constitué de 18 puits ou forages d'une profondeur moyenne de 20 m. Ces ouvrages puisent en moyenne 32000 m³/jour pour 100 000 usagers. Leur capacité maximum peut atteindre 57 000 m³/jour.

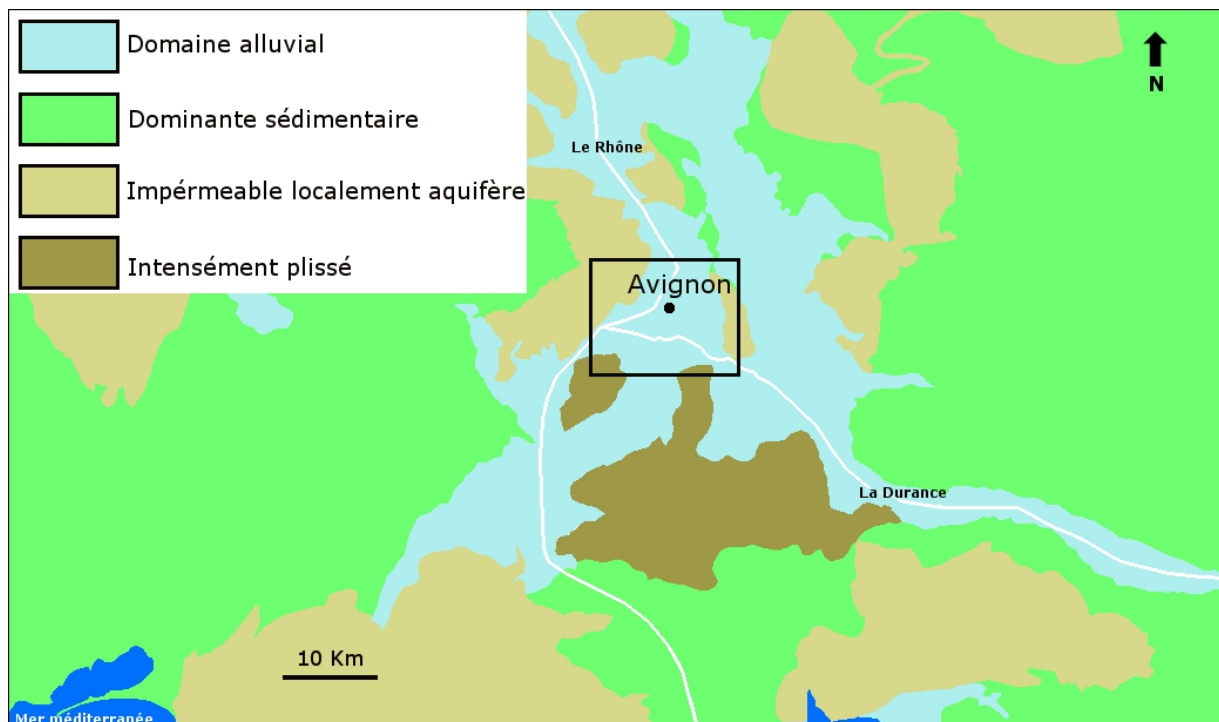


Figure 1. Localisation de la nappe alluviale d'Avignon (Masses d'eau souterraine). Source : Infoterre (BRGM).

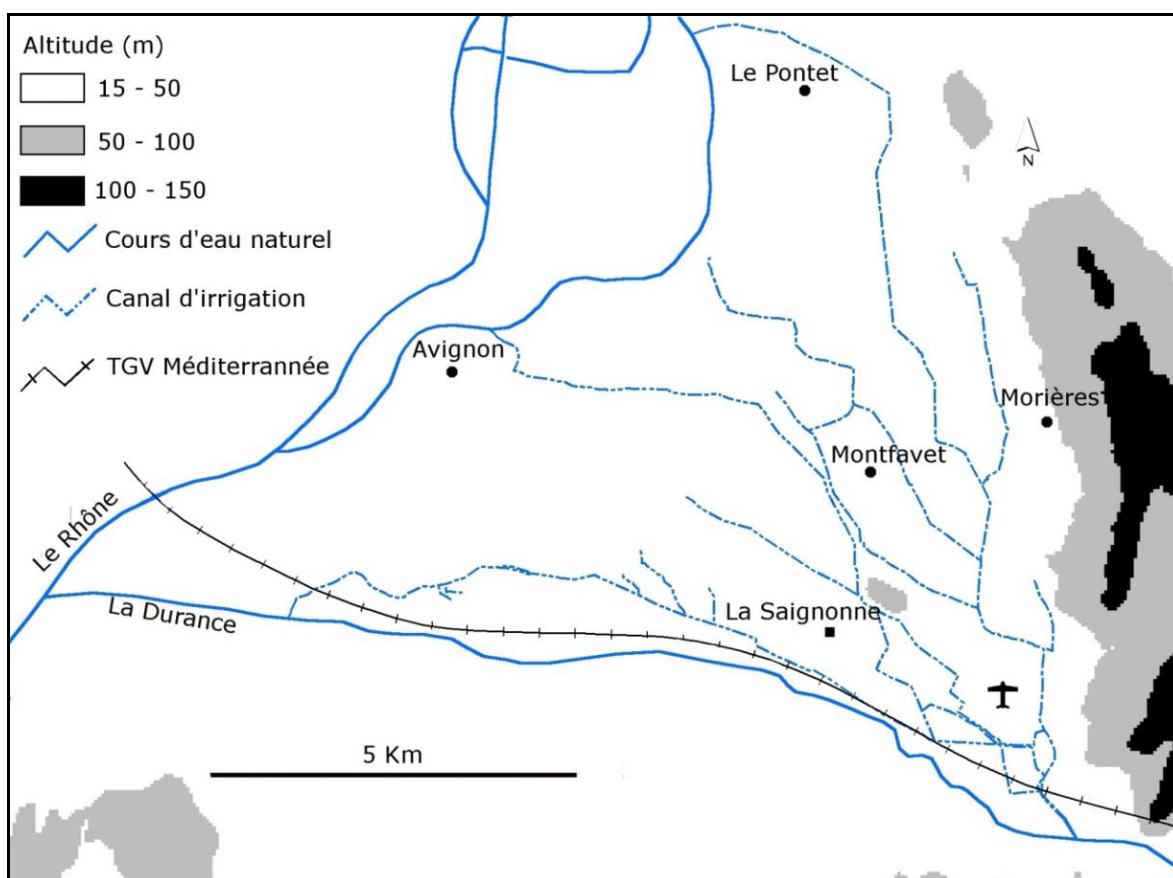


Figure 2. Situation géographique de la zone d'étude.

1.2. Climatologie

Les données climatiques proviennent de la station météo de l'INRA-Montfavet qui est installée à 5 km au sud-est de la ville d'Avignon, et couvrent une période de 24 ans, de 1989 à 2012. Elles ont permis d'établir les caractéristiques moyennes du climat dans la région avignonnaise sur cette période.

1.2.1. Les températures

La température moyenne annuelle d'Avignon pour la période 1989-2012 est de 14° C. Le mois de juillet est le plus chaud et janvier est le plus froid (**Figure 3**). Le climat est typiquement méditerranéen, avec des étés qui peuvent être torrides et des hivers doux, ponctués par des périodes très fraîches, responsables de gelées parfois tardives.

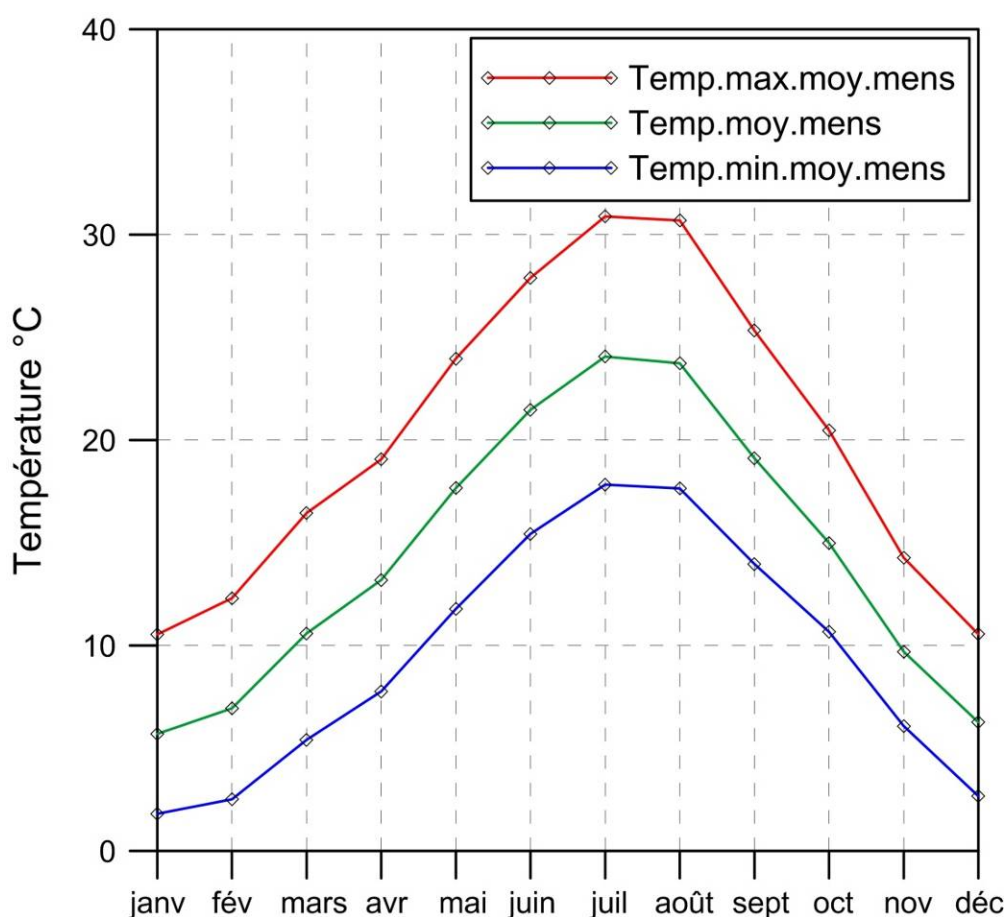


Figure 3. Températures moyennes mensuelles à Avignon de 1989 à 2012.

1.2.2. Les vents

Le vent dominant de la région est le Mistral, vent froid, sec et violent, qui descend la vallée du Rhône vers le sud et s'engouffre en partie le long de la vallée de la Durance. Ce vent est en partie responsable de l'ensoleillement important de la région (2600 heures par an) et contribue fortement à sa sécheresse (Freslon, 1980 ; Huneau, 2000).

1.2.3. Les précipitations

Le régime des précipitations, typiquement méditerranéen, est marqué par une répartition très inégale des pluies dans l'année (**Figure 4**). La pluviométrie annuelle est en moyenne de 688 mm (période 1989-2012). Les pluies se produisent souvent sous forme d'averses violentes et brèves, essentiellement en automne (il tombe environ 40% de la hauteur annuelle entre septembre et novembre) et au printemps (25% de mars à mai). L'été est marqué par la sécheresse (15% seulement des précipitations).

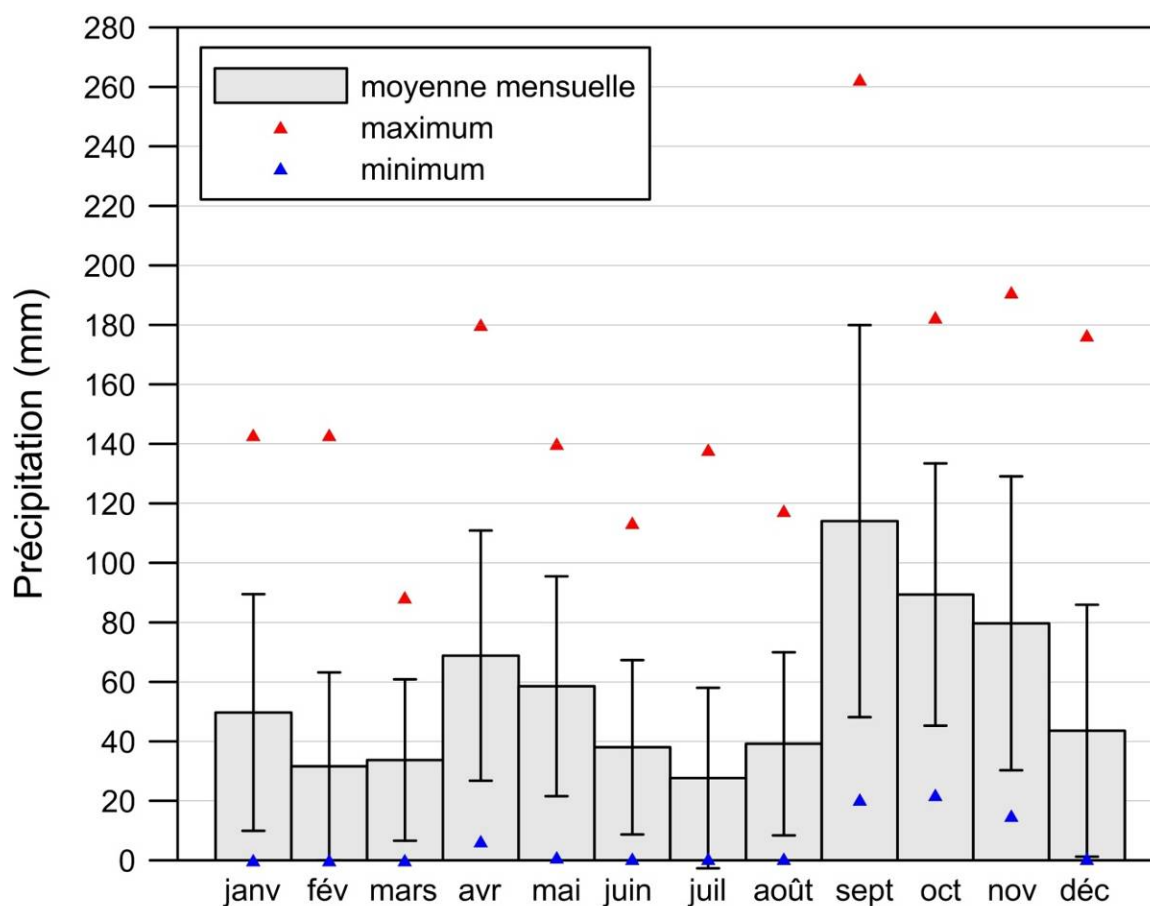


Figure 4. Précipitations moyennes mensuelles à Avignon de 1989 à 2012. Les barres d'erreur représentent les écart-types de cumuls mensuels.

1.2.4. Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique permet d'évaluer les périodes sèches et humides de l'année (Bagnouls, 1953). Les moyennes mensuelles des précipitations et des températures sont portées en ordonnées avec $P = 2T$ (**Figure 5**).

Une période humide et une période sèche se distingue pour la région d'Avignon. La période sèche s'étendrait du mois de juin au mois d'août. Toutefois, l'étude du bilan hydrique de cette région (qui sera présenté en détail dans le chapitre 3) montre que la période sèche (évapotranspiration réelle < évapotranspiration potentielle) peut souvent s'étendre en plus aux mois d'avril, mai et septembre selon le contexte climatique de chaque année.

Le diagramme ombrothermique semble donc pour notre région sous-estimer la durée de la période sèche, sans doute à cause de la forte variabilité interannuelle du climat méditerranéen.

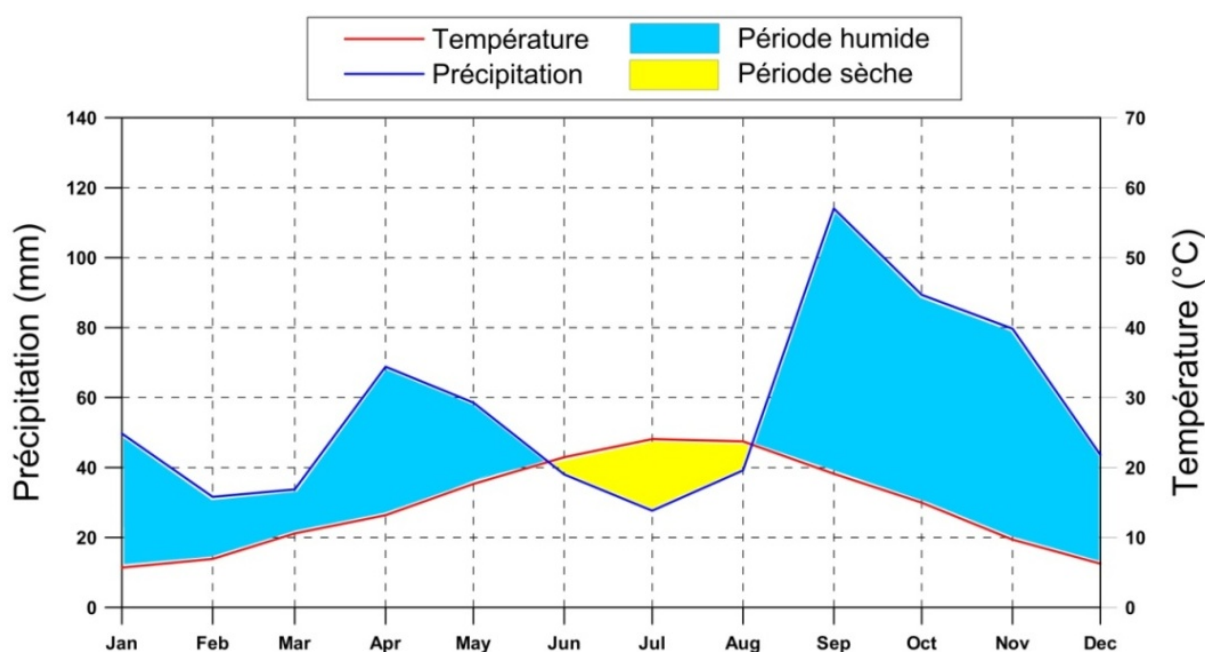


Figure 5. Diagramme ombrothermique d'Avignon pour la période 1989-2012.

1.2.5. Évapotranspiration potentielle

L'action conjuguée de la chaleur, du vent et de la sécheresse crée une évapotranspiration potentielle très importante (jusqu'à 188 mm au mois de juillet) qui atteint 1058 mm par an en moyenne. Elle est supérieure à la moyenne des précipitations avec une période déficitaire (P mensuelle < ETP mensuelle) s'étendant du mois de février au mois d'août (**Figure 6**).

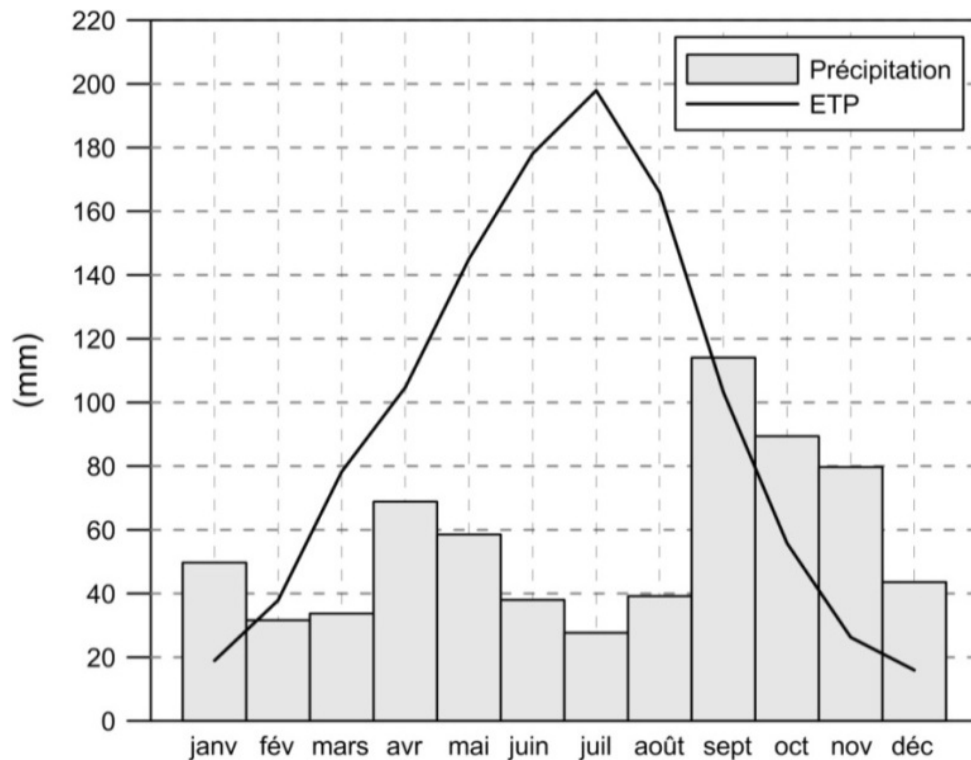


Figure 6. L'évapotranspiration moyenne mensuelle (ETP) pour la période 1989-2012.

1.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué par le Rhône, la Durance, les canaux d'irrigation ainsi que des plans d'eau naturels ou artificiels.

1.3.1. La Durance

La Durance est un affluent du Rhône, situé en rive gauche, qui s'écoule globalement du nord-est vers le sud-ouest. Elle prend naissance dans les Alpes à Montgenèvre à une altitude de 2500 m et rejoint le Rhône au sud d'Avignon à une altitude de 25 m. La pente de la Durance est de 2.6 ‰ entre le Pont de Mirabeau et celui de Cavaillon pour s'atténuer progressivement vers le Rhône : 2.3 m/km entre les Ponts de Cavaillon et de Rognonas (Lacroix, 1991).

L'irrégularité et la violence des précipitations et le relief accidenté ont longtemps conféré à la rivière un régime naturel torrentiel de type pluvio-nival à tendance méditerranéenne, responsable de crues souvent dévastatrices avec également des étiages sévères. Les débits maximaux typiques se situent à la fin du printemps (fonte des neiges) avec, en plus, des crues fugaces en automne. Le débit moyen annuel de la Durance est de 175 m³/s à sa confluence avec le Rhône (Pélissier, 1977). Depuis 1967, son régime est régulé par les aménagements hydrauliques d'Électricité de France : en période d'étiage est maintenu un débit réservé (encore appelé débit de salubrité) de 4.5 m³/s à Cadarache (il était de 2 m³/s jusqu'en 1997),

de 4.6 m³/s à Mallemort, et de 4.7 m³/s à Bonpas. Le reste est dirigé vers l'étang de Berre pour la production d'électricité ou dévié vers les canaux agricoles. Les crues, trop chargées en matières en suspension, ne doivent pas être dérivées vers l'étang de Berre pour éviter de le combler et transitent dans le lit naturel. Seules les crues décennales (2500 m³/s) peuvent être stockées dans les divers barrages en amont (Lacroix, 1991). Depuis janvier 1994, des lâchers sont effectués à l'aval du barrage de Mallemort, afin de réduire les apports d'eau douce dans l'étang de Berre de 35% sur l'année (Clémentz, 1999).

1.3.2. Le Rhône

Le Rhône borde la ville d'Avignon à l'ouest. La Compagnie Nationale du Rhône qui a assuré l'aménagement de la vallée du Rhône a réalisé dans la région avignonnaise deux barrages-usines (Sauveterre et Avignon, 1973). Le cours principal du Rhône a été dragué et recalibré, et le bras de Villeneuve court-circuité par un canal de dérivation entre le barrage de Sauveterre et Villeneuve-lès-Avignon.

Pour éviter une remontée trop importante de la nappe suite à l'élévation de cote du niveau du Rhône par effet des barrages, la Compagnie National du Rhône a réalisé un réseau de contre-canaux de drainage en bordure du Rhône et sur la partie aval de la Durance près de la confluence avec le Rhône. Désormais, ils sont les intermédiaires entre la nappe et le Rhône, alors que la relation était directe avant les travaux.

1.3.3. Réseau de canaux agricoles

Le système d'irrigation gravitaire utilise les différences de cotes altimétriques pour déplacer l'eau d'un point à un autre point situé plus en aval. Pour acheminer cette eau aux parcelles, le réseau dispose :

- D'une prise dont le rôle est de prélever et de quantifier la ressource nécessaire à l'irrigation.
- D'un canal maître dont le tracé dépend essentiellement de la topographie et qui détermine par son altitude le périmètre irrigable. Constitué dans sa partie amont d'une tête morte qui transporte l'eau de la prise jusqu'au périmètre irrigable, le canal maître dessert soit directement les parcelles soit des filioles.
- Des filioles ou canaux secondaires qui sont raccordés au canal primaire grâce à des vannes qui permettent de réguler leur débit. Ces filioles quadrillent la zone et assurent la desserte en eau de la quasi-totalité des parcelles.

La plaine d'Avignon possède trois canaux d'irrigation principaux situés en rive droite de la Durance (**Figure 7**) :

- Le Canal Crillon
- Le Canal de l'Hôpital-Durançole
- Le Canal Puy

Ces canaux permettent d'alimenter en eau les terrains agricoles de manière gravitaire, il s'agit d'inonder la parcelle avec une lame d'eau de quelques centimètres à partir d'un seul point d'alimentation.

La prise d'eau de ces trois canaux s'effectue au niveau du barrage EDF de Bonpas. Contrairement à une prise au fil de l'eau, la mise en place d'un barrage permet de garder le niveau de l'eau stable face aux variations hydrographique, ainsi les débits entrants sont bien connus et contrôlés.

Deux partiteurs permettent ensuite de répartir l'eau dans trois canaux :

- Le partiteur en aval de Bonpas permet de séparer les eaux du canal Crillon et du canal de l'Amené.
- Le partiteur de Chatebrun divise les eaux du canal de l'Amené pour former les canaux de Puy et de l'Hôpital-Durançole.

Ces partiteurs sont équipés de modules à masques qui permettent de réguler les débits entrants dans chaque canal. Seule l'entrée du canal Crillon est équipée d'un système de martelières. L'utilisation de modules à masques permet a priori de connaître de manière plus précise la quantité d'eau par rapport à un système de martelières. Il s'agit d'un fonctionnement au « tout ou rien » et non pas lié à un nombre de tours de manivelle.

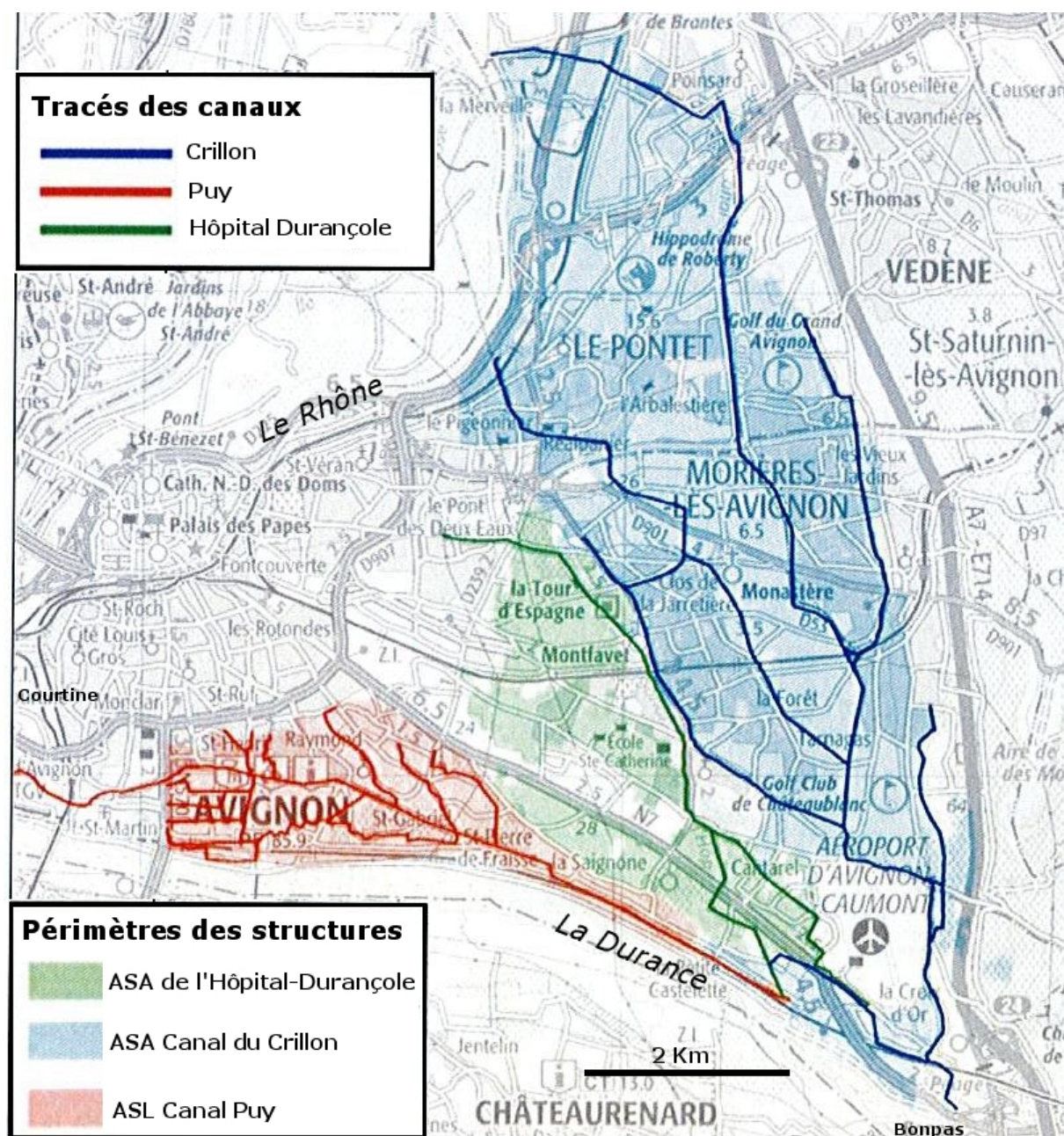


Figure 7. Carte des canaux d'irrigation et de leurs périmètres irrigable (SCP, 2013).

1.3.3.1. Le Canal Crillon :

Le Canal Crillon débute au niveau du partiteur de Bonpas, situé près du barrage hydraulique. Il a été créé en 1775 et s'étend du sud au nord sur près de 15 km de longueur pour le canal principal et 19 km en prenant en compte ses filioles principales. Il s'agit du canal le plus long de la région d'Avignon. La surface irrigable est de 2 460 ha et irrigue des parcelles, principalement des prairies naturelles, vergers, et petit maraîchage.

Le Canal Crillon possède un exutoire dans le Rhône, situé au nord de notre zone d'étude. La filiole de Saint-Martin se jette aussi dans le Rhône, à l'ouest du Pontet.

1.3.3.2. Le Canal Puy :

Le Canal Puy permet de desservir en eau la ceinture verte d'Avignon située au sud de l'agglomération au niveau des berges de la Durance. Il a été mis en service vers 1808. Il est délimité au nord par la rocade sud, à l'est par le périmètre du Canal de l'Hôpital-Durançole et à l'ouest, par la confluence Rhône-Durance. Son tracé est-ouest s'étend sur une longueur de 10 km, couvre près de 500 ha de surface irrigable.

Le Canal Puy débute à partir du partiteur de Chatebrun. Son exutoire se situe au niveau de la gare TGV de Courtine dans la Durance à près de 2.5 km de sa confluence avec le Rhône.

Du fait de l'urbanisation progressive et de l'extension de l'agglomération d'Avignon, la plupart des filioles du Canal Puy ont perdu de leur longueur.

1.3.3.3. Le Canal de l'Hôpital-Durançole :

Le Canal de l'Hôpital-Durançole est la conséquence du regroupement des canaux de l'Hôpital et de Durançole en une branche unique de plus de 10 km au nord du partiteur de Chatebrun. Il a été mis en service vers le XIIIème siècle. L'ensemble du canal maître et de ses filioles constitue un réseau de 33 km de long. Il occupe un périmètre de 840 ha et permet d'irriguer des cultures situées au sud-est de l'agglomération avignonnaise principalement sur la rive gauche du canal.

Le périmètre du canal est délimité au nord et à l'ouest par l'agglomération d'Avignon, à l'est par l'agglomération de Montfavet et au sud par le Canal Puy. Le canal est orienté vers le nord jusqu'au niveau du Clos du Grand Riban, avant de s'orienter vers l'ouest et atteindre la périphérie d'Avignon. Il se déverse dans le drain de la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) qui longe la rive gauche du Rhône avant de se jeter au nord de la zone industrielle de Courtine. Le Canal de l'Hôpital commence au niveau du partiteur de Chatebrun, un complément d'eau provient ensuite du Canal de Durançole au niveau de la colline du Mont de Vergues.

1.4. Contexte géologique

L'histoire géologique du bassin d'Avignon est étroitement liée à la mise en place des unités structurales provençales proprement dites. Les terrains encaissant les alluvions dans le secteur étudié vont du Crétacé au Plaisancien (**Figure 8**). Ils affleurent essentiellement à l'est de la zone d'étude vers la colline de Morières et d'autres affleurements isolés de calcaires pointent au milieu des alluvions (Mont de Vergues et le Rocher des Doms) (**Figure 9**). L'allure du substratum crétacé paraît donc de prime abord complexe tandis que les argiles tertiaires superposées semblent devoir constituer le substratum direct des alluvions sur la majeure partie de la zone étudiée (**Figure 10** et **Figure 11**). Le Miocène intervient de façon importante dans la constitution du substratum des alluvions avec une épaisseur importante et des alternances des niveaux perméables (sables) et imperméables (argiles et marnes).

Les effondrements miocènes et pliocènes se sont surimposés aux reliefs crétacés d'orientation générale Est-Ouest découpant obliquement les structures existantes en "graben" qui permettront par la suite au régime hydrographique de s'établir, et en particulier au Rhône de franchir les reliefs à la faveur de verrous (Caridroit, 1968).

L'origine de la plaine est rhodanienne avec une influence durancienne au sud d'Avignon (ancien cône de déjection de la Durance dans le bas-Rhône) (Monjuvent, 1991). L'érosion post-Crétacé puis post-Pliocène a permis le développement d'une vaste plaine alluviale à substratum tertiaire (Ciron, 1992 ; Durozoy et Glintzboeckel, 1978).

Profondeur (m)	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude (m NGF)
11	Alluvions		Gravier	Pliocène supérieur à Pléistocène	15
48	Marnes bleues de Caumont		Marne Sableuse bleu sombre	Burdigalien (Miocène)	-22
54			Marne très sableuse		-28
72			Marne sableuse micacée		-46
78			Sable légèrement marneux		-52
100			Sable fin et très marneux		-74
109			Sable grossier		-83
112	Calcaire argileux de Chatâteaurenard et de Caumont		Marne argileuse	Barrémien (Crétacé)	-86
170			Calcaire		-144

Figure 8. Colonne stratigraphique depuis le Crétacé établie par un forage de 170 m de profondeur (localisation sur la carte géologique). Source : Infoterre.

En remontant dans la série on trouve successivement :

1.4.1. Crétacé inférieur

L'Urgonien (Barrémien) constitue du nord au sud, les hauteurs dominant à l'ouest Châteauneuf-du-Pape, l'affleurement isolé de Sorgues, la butte de Vedène et celle du Château de Mont de Vergues. C'est un calcaire compact, très souvent crayeux, en bancs peu épais et même en plaquettes, à lits de rognons de silex, quelquefois plus cristallisé.

Les hauteurs dominant le Rhône en face d'Avignon sont constituées par les niveaux inférieurs du Crétacé (Hauterivien). Ce sont des calcaires également compacts, mais plus foncés et plus argileux.

1.4.2. Miocène

Les collines fermant à l'est la vallée du Rhône sont constituées par des argiles, sables et grès du Miocène marin, transgressif sur le Crétacé après les plissements qui ont affecté ce dernier lors de la phase orogénique pyrénéenne. On a, à la base des molasses du Burdigalien supérieur (sables et grès), de la zone à *Chlamys praescabriuscula*, à débris d'organismes (Bryozaires, Echinides, Mollusques), bien développées à l'est de Sorgues ; (Gentoni) qui affleurent principalement entre Vedène et Saint-Saturnin.

1.4.3. Pliocène marin (Plaisancien)

Les dépôts du Pliocène marin existent dans la vallée du Rhône jusqu'à Vienne ; ils affleurent dans la région de l'étang de Pujaut et existent certainement au voisinage de l'axe de la vallée sous les alluvions.

La cote maximale atteinte par les dépôts est de 180 m environ, puis la mer s'est retirée. De cette régression dateraient les sables et argiles à *Potamides* affleurant localement dans la colline de Sorgues (Astien).

1.4.4. Quaternaire

Hautes terrasses

Elles correspondent aux dépôts de cailloutis recouvrant le sommet des collines miocènes de Châteauneuf-du-Pape, Sorgues et Châteauneuf-de-Gadagne (cotes 95-120 m).

Basses terrasses

Les basses terrasses situées sur la rive gauche forment l'essentiel de la région concernée. On rencontre deux niveaux difficiles à distinguer, l'un vers 7-8 m au-dessus du Rhône actuel, l'autre à une cote un peu plus élevée.

La Durance n'a pas contribué à leur édification puisqu'elle empruntait à cette époque le Seuil de Lamanon ; elle ne rejoindra le Rhône à Rognonas, au sud d'Avignon, qu'après la régression pré Flandrienne atteignant la cote -25 à hauteur des rivages actuels et la cote 0 à Rognonas.

Alluvions récentes

Après la transgression flandrienne, la mer se stabilise à la cote 0 et le Rhône dépose des alluvions récentes, grossières à la base, puis plus fines (graviers et sables plus ou moins argileux puis argiles sableuses) et de nouveau grossières.

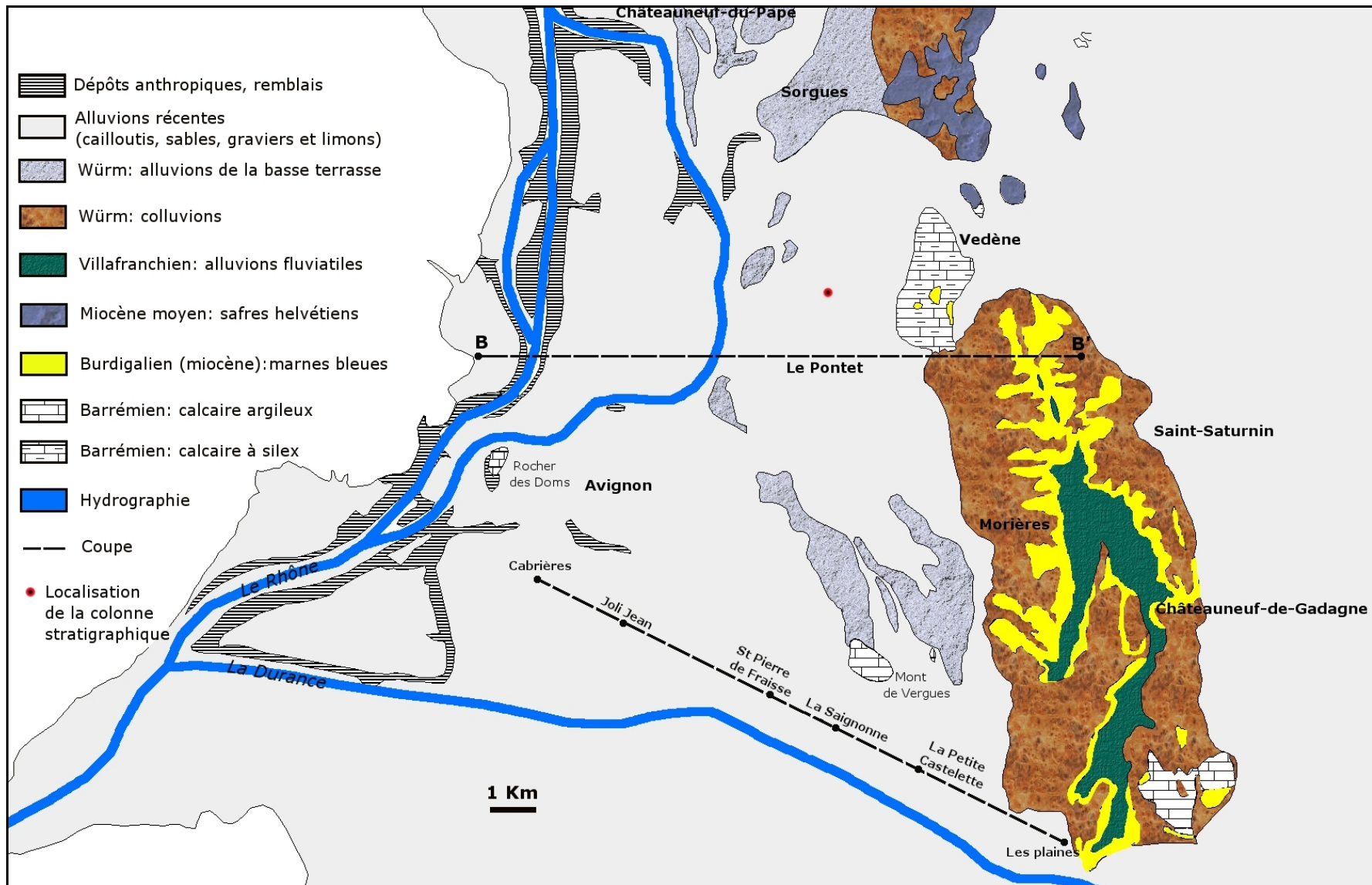


Figure 9. Carte géologique schématique de la plaine alluviale d'Avignon, d'après la carte géologique d'Avignon au 1/50 000.

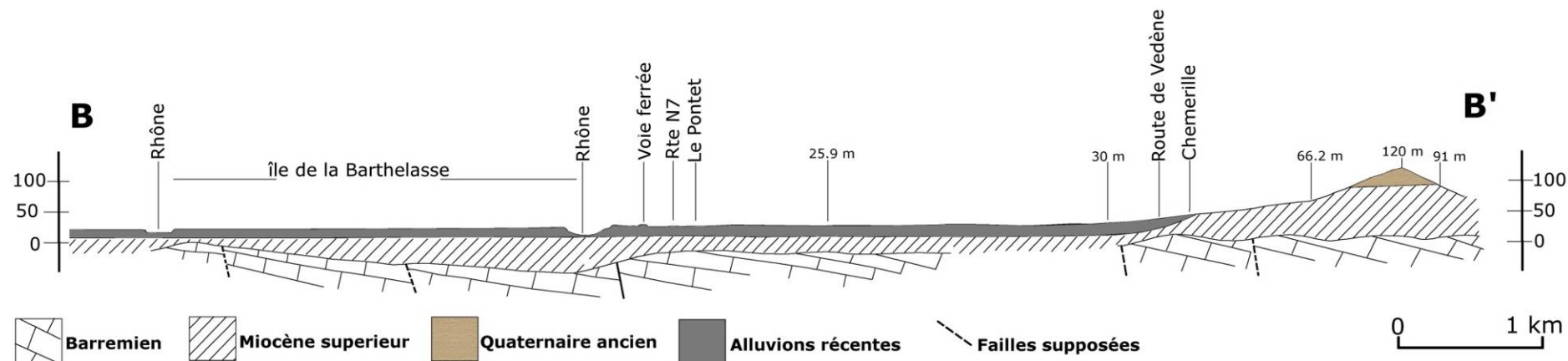


Figure 10. Coupe géologique (Durozoy et al., 1964).

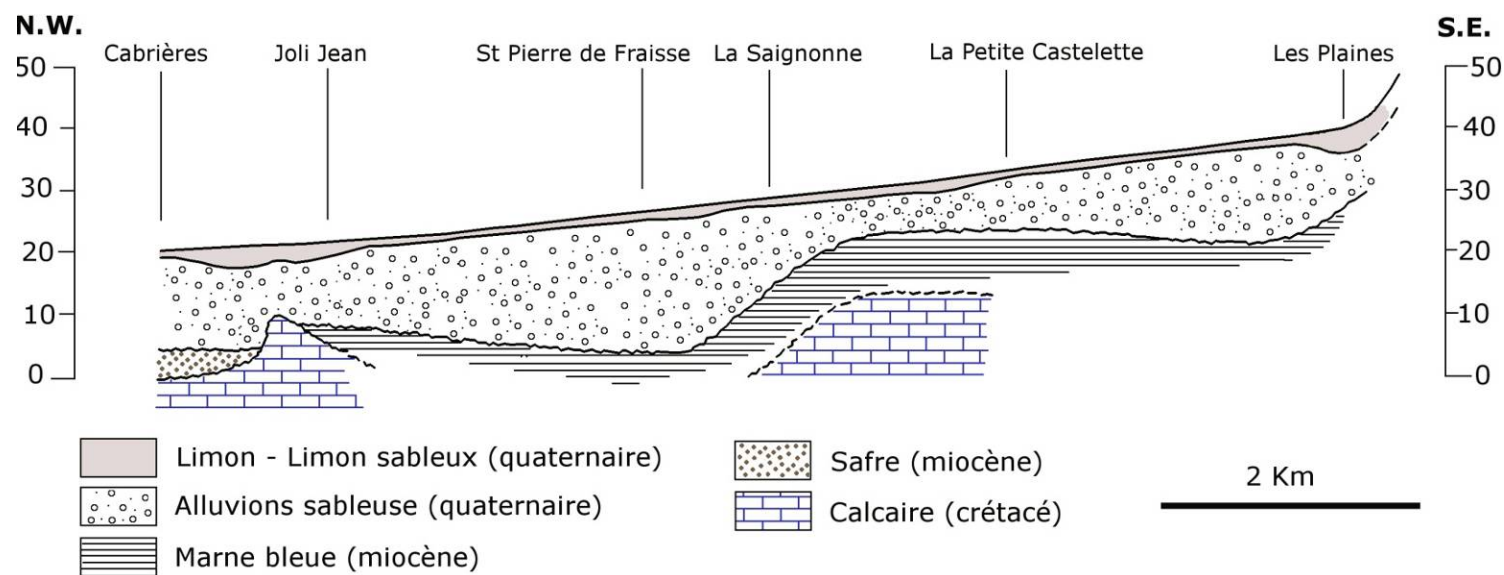


Figure 11. Répartition des sédiments dans les alluvions (Putallaz, 1972).

1.5. L'irrigation gravitaire et l'urbanisation

1.5.1. Irrigation et recharge des nappes

Depuis fort longtemps, la pente exceptionnelle de la Durance dans la basse Vallée a été utilisée par les irrigants. Il suffisait en effet de placer une prise en rivière, de préférence au voisinage d'un point singulier (resserrement de la vallée, pont), et de faire courir un canal moins pentu que la rivière en contre-haut de la plaine alluviale pour pouvoir irriguer celle-ci. Ce principe est à l'origine du développement d'un chevelu dense de canaux agricoles qui exportent l'eau de la Durance à partir du canal usinier d'EDF.

Les réseaux d'irrigation permettent de dériver les eaux de la Durance et de desservir la plupart des exploitations agricoles, palliant particulièrement le fort déficit pluviométrique estival. L'impact le plus fort, et pourtant le moins visible pour des populations ayant toujours connu ces canaux d'irrigation gravitaire, concerne le développement d'un paysage, d'une végétation, d'une faune et d'une flore exceptionnels. L'irrigation gravitaire permet en effet au fil des siècles le développement d'un paysage arboré sur des sols naturellement secs, ainsi que le développement d'écosystèmes où siège aujourd'hui une grande biodiversité, dont la faune et la flore qui l'incarnent sont souvent spécifiques aux canaux d'irrigation.

D'un point de vue environnemental, le réseau crée des écosystèmes indispensables pour la biodiversité régionale, de plus la présence de végétation peu combustible est favorable à la protection contre l'incendie.

La technique d'irrigation utilisée est l'irrigation gravitaire par submersion. Il s'agit d'inonder la parcelle avec une lame d'eau de quelques centimètres à partir d'un seul point d'alimentation. L'eau apportée sur la parcelle est destinée à reconstituer la réserve utile afin de subvenir aux besoins en eau des plantes. Durant cette phase de mise en eau, le mode d'irrigation gravitaire génère structurellement des pertes par percolation dans la nappe car le sol à l'amont de la parcelle reçoit beaucoup d'eau et atteint la capacité de rétention maximum avant que l'eau ne soit arrivée en bout de champs. Il y a donc infiltration de l'eau en excès à travers le sol avant que la plante ne puisse l'absorber. La quantité d'eau percolée dépend de la nature du sol, de la pente et de la longueur de la parcelle.

L'irrigation augmente généralement la recharge des aquifères (Cao et al., 2002 ; McMahon et al., 2003 ; Qin et al., 2011 ; Roark et al., 1998). Dans un contexte alluvial aux Etats Unis Scanlon et al. (2005) ont trouvé que la recharge varie de 130 à 640 mm/an sous les cultures irriguées et de 9 à 32 mm/an sous les cultures non-irriguées.

Des études antérieures en basse Provence montrent qu'une part non négligeable de l'eau des nappes alluviales serait de l'eau issue de l'irrigation.

Une étude a été réalisée sur la basse Durance, intitulée « Impact de l'irrigation sur un aquifère alluvial » par Lacroix (1991). D'après cette étude environ un tiers du débit annuel d'eau utilisée en irrigation gravitaire réalimente les nappes alluviales.

Une étude réalisée par Clémentz (1999) dans le périmètre irrigué du canal St-Julien présente les "effets induits de l'irrigation gravitaire sur la nappe alluviale et le système hydrographique naturel". D'après cette étude, 29% du volume annuel dérivé alimente la nappe.

On estime qu'entre 60 et 65% des eaux apportées par l'irrigation réalimentent la nappe via le processus d'infiltration commandée par le sol de la Crau qui est très caillouteux et peu profond (Chabas, 2003 ; Merot et al, 2008).

Une étude dans le secteur d'Avignon a été réalisée par Michallet (1999) sur « l'incidence des apports d'eau du Canal du Crillon sur l'alimentation de la nappe ». La méthodologie adoptée lors de cette étude pour répondre aux objectifs a été d'établir un bilan hydrique à l'échelle d'une parcelle pendant le mois d'août, et connaissant la répartition des cultures alimentées par le Canal du Crillon, d'extrapoler ce bilan à l'ensemble des cultures irriguées. Les volumes d'eaux dérivés de la Durance par le canal Crillon vers la nappe alluviale ont été quantifiés par l'analyse isotopique de ces eaux. Il a été montré que la nappe en mai 1999 était soutenue à près de 80 % par les eaux d'irrigation dans le périmètre du Canal Crillon.

Ces situations montrent que l'irrigation gravitaire en basse Provence a une place importante dans la gestion quantitative des ressources en eaux souterraine. Par contre, dans une logique d'économie d'eau, de possibles changements dans les pratiques d'irrigation pourraient mener à une gestion « plus rationnelle » de l'eau en irrigation. De cette gestion plus économe de l'eau en agriculture, exacerbée par un changement d'occupation du sol, des déprises agricoles dans certains territoire sujets à l'urbanisation pourraient résulter de profondes modifications de l'équilibre hydrodynamique des aquifères sous-jacents.

1.5.2. Urbanisation et cycle de l'eau

Il a été estimé que l'impact global de l'intervention humaine sur le cycle de l'eau (par le changement d'occupation du sol, l'urbanisation et l'industrialisation) est susceptible de dépasser celle du changement récent ou prévu du climat (Vörösmarty et al., 2004).

Plusieurs études ont été menées en particulier pour déterminer l'impact de l'urbanisation sur l'environnement et le cycle de l'eau. L'urbanisation s'accompagne d'une augmentation des surfaces imperméables. Cette imperméabilisation des surfaces joue un rôle majeur sur l'environnement et le bilan d'eau (Arnold et Gibbons, 1996 ; Shuster et al., 2005 ; Dams et al., 2013).

À cause de l'urbanisation, le sol est souvent compacté et couvert par des surfaces imperméables comme des bâtiments, des routes, des trottoirs ce qui implique une augmentation du ruissellement, les eaux de ruissellement étant évacuées par des réseaux de drainage ou d'assainissement (Schueler T, 2000 ; Lerner, 2002 ; British Geological Survey, 2003 ; Takizawa, 2008).

En Virginie aux États-Unis, Jennings et Taylor, (2002) ont montré qu'une augmentation de la surface imperméable de 3% en 1949 à 33% en 1994 a conduit à une augmentation significative du débit de ruissellement, qui s'est traduit par un changement de vitesse et de débit de l'eau de surface.

L'urbanisation affecte donc significativement le cycle naturel de l'eau, autant du point de vue quantitatif que qualitatif (Vázquez-Suñé et al., 2005).

Boggs et Sun (2011) ont d'ailleurs proposé d'augmenter la capacité d'infiltration des surfaces urbanisées (création de forêts « urbaines ») pour anticiper et atténuer les éventuelles pressions sur l'environnement pouvant résulter de l'urbanisation.

À White Clay Creek Wild près de Newark, Delaware aux États-Unis, Kauffman et al. (2009) ont montré par des mesures de terrain qu'il existe une bonne corrélation entre l'augmentation de la couverture imperméable et la diminution de flux de l'eau souterraine.

L'impact de l'élimination des zones perméables et l'extension des zones imperméables sur les processus de recharge a été mis en évidence (Gee et Hillel, 1988 ; Harvey et Sibray, 2001). Dans le bassin versant de Kleine Nete en Belgique, une augmentation de la surface imperméable de 25.4% à 29.2% entre 1986 et 2003 a provoqué une diminution de la recharge dans la zone urbaine de 1.6% (Dams et al., 2013).

Dans la plaine alluviale de Dogo au Japon, la recharge nette de la nappe provient essentiellement de l'eau d'irrigation (cultures de riz). La recharge est positive pendant la période d'irrigation (8-30 mm/jour) alors qu'elle est presque nulle ou négative pendant les périodes de non-irrigation (He et al., 2009). Les auteurs soulignent donc les changements notables à attendre sur la quantité d'eau apportée à la nappe dans un contexte d'urbanisation qui tend à faire diminuer les surfaces irriguées.

Outre une imperméabilisation des surfaces, l'urbanisation s'accompagne aussi d'une augmentation des pompages dans la nappe, conséquence de la croissance de population (Hayashi et al., 2009 ; Onodera et al., 2009 ; Morris et al., 2003 ; Takizawa, 2008).

Dans un contexte de développement urbain, il est donc nécessaire d'identifier les zones et les processus de recharge pour assurer un développement urbain durable soucieux d'une bonne gestion de la ressource en eau (Kumar et al., 2011).

1.5.3. Conclusion

Sur le secteur que nous avons étudié, à mesure que la ville d'Avignon se développe, s'agrandit et se transforme, son emprise augmente, en particulier sur les terrains situés aux limites urbaines actuelles. Or, ces espaces étaient traditionnellement occupés par des zones de cultures maraîchères, fruitières, de prairie nécessitant un apport en eau que les canaux d'irrigation assuraient. Aujourd'hui, la plaine alluviale d'Avignon s'inscrit dans un contexte majoritairement urbanisé où les territoires agricoles n'occupent plus que 30 % de la surface. Ce chiffre est le résultat d'une extension progressive de l'agglomération d'Avignon bloquée par le Rhône à l'ouest et qui s'est rapidement faite vers l'Est transformant des terres irriguées en zones résidentielles (**Figure 12**).

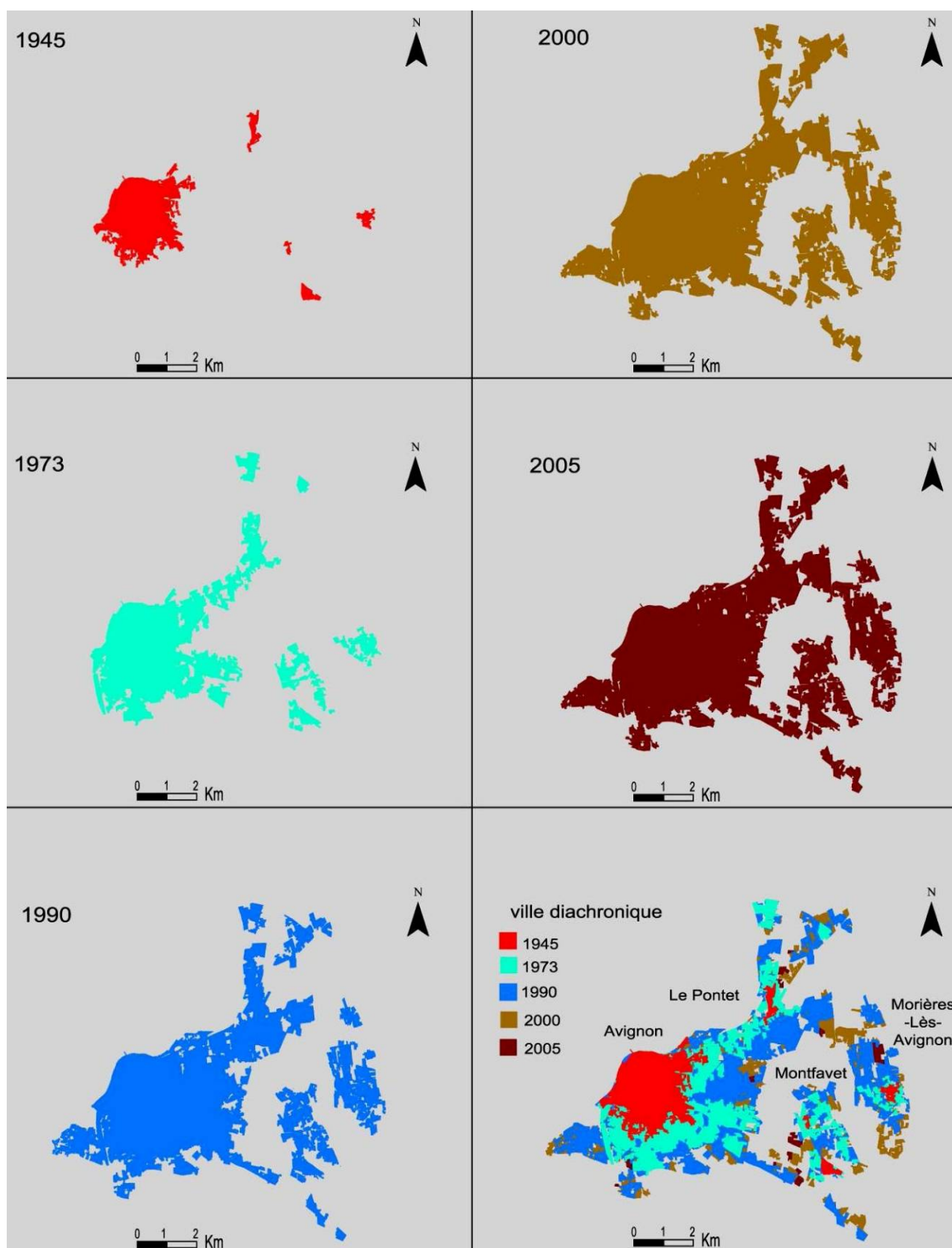


Figure 12. La zone urbaine d'Avignon et sa limite diachronique (les lacunes dans l'emprise de la ville correspondent à des espaces non-urbains) (Alkhalifeh, 2008).

1.6. Objectifs

L'objectif des travaux menés dans le cadre de cette thèse est d'apporter une connaissance plus précise du fonctionnement des nappes en contexte anthropisé et sous contraintes climatiques.

Notre zone d'étude est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par une période de déficit hydrique pouvant parfois couvrir jusqu'à six mois de l'année. Mais ce territoire est aussi fortement marqué par les activités humaines : territoire urbanisé dans certains secteurs (urbanisation historique ou récente) et essentiellement agricole hors zone urbaine.

Un point important de cette étude vise donc à préciser les différents modes de recharge (recharge naturelle ou non) et à quantifier leurs apports respectifs, notamment la part de l'eau participant à la recharge de la nappe par l'irrigation gravitaire très répandue sur les secteurs agricoles. Une attention toute particulière est portée sur les mécanismes de recharge de la nappe en lien avec l'occupation du sol, la gestion des eaux de surface.

L'ensemble des informations acquises sur le système aquifère (géométrie, hydrodynamique, recharge) alimente un outil de simulation du fonctionnement de cet aquifère apte à proposer des scénarios d'évolution en fonction des changements futurs probables.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Méthode

La démarche adoptée dans ce travail couple deux approches :

- (i) Une approche hydrodynamique qui consiste à réaliser des mesures piézométriques qui doivent permettre de déterminer le sens et la vitesse de flux dans l'aquifère, de préciser les conditions aux limites de l'aquifère alluvial et de réaliser une comparaison avec les données antérieures à ce travail.
- (ii) Une approche hydrochimique qui consiste à mesurer et à suivre les paramètres physico-chimiques de base : température, pH, conductivité, teneur en oxygène dissous et ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) ainsi que les concentrations isotopiques de la molécule d'eau (^{18}O , ^2H , ^3H) sur un réseau qui a été mis en place de manière à suivre l'évolution de l'eau depuis son infiltration jusqu'à l'exutoire de l'aquifère. Les analyses n'ont pas été réalisées de manière systématique sur tous les points. À la lumière des résultats obtenus sur les premières campagnes, des points ont été enlevés et d'autres ont été ajoutés.

Une sélection de points de mesures a été réalisée dans le sens d'écoulement de la nappe pour effectuer des suivis de la piézométrie et de la chimie des eaux. Les points de prélèvements sont répartis sur la plaine et représentatifs des différentes occupations du sol et différentes situations géographiques. Chaque compartiment hydrologique est échantillonné afin de le caractériser géochimiquement c'est-à-dire de tenter de lui associer une "signature" distincte. De manière générale, le suivi a été réalisé au pas de temps mensuel avec quelques suivis sur des réseaux plus restreints qui ont été entrepris afin de mettre en évidence l'influence de la pluie et les échanges possibles nappe-rivière. Par ailleurs, afin d'avoir une vision sur deux situations hydrologiques extrêmes, deux campagnes complètes de prélèvements ont été réalisées, une en période de basses eaux (février 2011) et une en période de hautes eaux (juillet 2011).

2.2. Données acquises

2.2.1. Descriptif des points de mesures

À l'issue de la synthèse hydrogéologique réalisée sur la plaine alluviale et des inventaires des puits, piézomètres et forages disponible sur cette zone, nous disposons en tout de 75 points de mesures piézométriques (puits et piézomètres) repartis sur la plaine alluviale. Les points de mesures comprenant les puits et piézomètres suivis dans la plaine alluviale ont fait l'objet d'un nivellement de précision afin de raccorder toutes les mesures au système NGF. La méthode utilisée est le GPS différentiel (Trimble 5800 avec TSC et soft TBC), la précision est de +/- 1 cm en X, Y et Z. L'ensemble des données collectées à cette occasion est présentée sous forme d'un tableau récapitulatif en **annexe 1**.

Les piézomètres 14, 15, 27 et 33 ont été équipés de capteur automatique de Schlumberger (Diver) permettant de mesurer en continu la pression et la température de l'eau (**Figure 13**). La pression atmosphérique a été suivie au piézomètre 27. L'acquisition des données a été réalisée au pas de 15 minutes. Des lacunes d'enregistrement apparaissent sur certains points car les appareils de mesures n'ont pas été installés à la même période. Les mesures de terrain, les relevés piézométriques et les prélèvements ont été réalisés mensuellement entre juillet 2010 et septembre 2011.

Au total 43 points de prélèvement ont été utilisés (**Figure 14**), 5 points pour les eaux de surface (canal Crillon, canal Puy, le Rhône, La Durance et le lac St-Chamand) et 38 points pour les eaux souterraines. Cet échantillonnage représente un total de 320 prélèvements répartis sur 12 campagnes. Le **Tableau 1** récapitule les caractéristiques générales des points de prélèvement.

Site No.	Lieu	Type d'échantillon	Nombre de prélèvements	Profondeur (m)	Altitude (m)
1	Rhône	Rivière	9	-	18.4
2	Durance	Rivière	10	-	40.3
3	Crillon	Canal	8	-	34.24
4	Puy	Canal	7	-	30.76
5	Lac St Chamand	Lac	10	-	21.03
6	F38	Piézomètre	2	8.13	37.38
7	F11	Piézomètre	3	7.52	35.6
8	KPA5	Piézomètre	10	20.97	30.34
9	i9	Piézomètre	12	10.2	30.75
10	F18	Piézomètre	4	7.08	26.86
	Du2	Piézomètre	3	5.2	24.5
12	Pz05	Piézomètre	3	5.14	16.98
13	PZD5	Piézomètre	2	17.25	28.3
14	T10	Piézomètre	9	6.05	20.35
15	T14	Piézomètre	11	5.83	24.79
16	PZ13	Piézomètre	10	13.99	27.17
17	Pascal	Piézomètre	10	24.15	29.9
18	EDF Sorgue	Piézomètre	7	7.54	23.67
19	T17	Piézomètre	10	5.75	20.65
20	i2	Piézomètre	11	5.52	19.87
21	i8	Piézomètre	11	5.84	23.16
22	T3	Piézomètre	10	5.4	17.81
23	T1	Piézomètre	3	5.63	17.43
24	T7	Piézomètre	4	5.8	19.99
25	A2	Piézomètre	8	5.77	19.21
26	D2	Piézomètre	10	6	20.14
27	PAG3	Piézomètre	11	8.09	32.26
28	Maurice	Puits	5	9.66	26.61
29	Rideaux	Puits	3	4.3	29.43
30	Bonheur	Forage	10	18.34	25.76
31	Roux	Forage	7	7.9	28.11
32	Valles	Forage	6	12	28.88
33	Calvino	Forage	7	14.95	25.87
34	8bis	Forage	4	8	24.49
35	P72	Piézomètre	8	7.7	16.82
36	Ikea	Piézomètre	10	10.08	29.87
37	Jonquier	Forage	9	7	31.55
38	Saad	Forage	6	16	26.85
39	Grangette	Forage	11	11.17	25.33
40	P40	Puits	5	4.62	33.2
41	Puits 83	Puits	10	15.29	35.63
42	Bérud	Puits	4	5.38	35.45
43	Noel	Puits	7	6.24	38.87

Tableau 1. Caractéristiques générales des points de prélèvement.

Pour nos campagnes de prélèvement, nous disposons d'une pompe immergée pour extraire l'eau préexistante dans le piézomètre, puis pomper véritablement l'eau de l'aquifère lorsque les paramètres mesurés dans la cellule de mesure se stabilisent (conductivité, pH, température, O₂ dissous).

La température (°C) et la conductivité électrique $\mu\text{S}/\text{cm}$ (à 25°C) ont été mesurées avec une sonde de conductivité. Le pH a été mesuré avec une sonde pHmètre étalonné entre pH 7 et pH 4 à chaque sortie de terrain.

Les prélèvements pour les ions majeurs ont été filtrés avec un filtre dont les pores présentent un diamètre de 0.45 μm .

Les anions et les cations ont été conservés séparément dans des flacons en polyéthylène de 50 ml. Une acidification à l'acide nitrique des flacons destinés au dosage des cations a été effectuée pour baisser le pH afin d'éviter la précipitation de calcite et des hydroxydes métalliques.

Pour les isotopes de la molécule d'eau, ^{18}O et ^2H , les échantillons ont été prélevés dans 2 flacons en verre transparent de 20 ml, dans un flacon en polyéthylène de 1 litre pour ^3H .

Suite au flaconnage, les échantillons ont été conservés à une température de 4° C dans un réfrigérateur pour limiter l'activité bactérienne.

2.2.2. Mesures en laboratoire

Pour les ions majeurs et les isotopes stables de l'eau, les analyses ont été réalisées dans les 3 jours suivant le prélèvement.

L'alcalinité totale a été mesurée au laboratoire directement après le retour du terrain en utilisant la titration colorimétrique à l'acide sulfurique H₂SO₄ (0.2 N). Pour les analyses dont les valeurs de pH sont proches de 7, il est supposé que l'alcalinité totale égale la teneur en ions HCO₃⁻.

Les anions majeurs (SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻) ont été analysés par chromatographie ionique en phase liquide à l'aide d'un appareil DIONEX DX 120, sur des colonnes ASSHC. Le calibrage se fait au début de chaque séquence d'analyse à partir d'étalons Merck CertiPUR à 1000 mg/L. Les échantillons peuvent contenir d'autres éléments en traces (ex : F⁻, NO₂⁻), mais les valeurs restent très proches du seuil de détection.

Les cations majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺) ont été analysés par chromatographie (DIONEX 120) sur des colonnes SC 12 A.

Les concentrations des ions majeurs sont données avec une incertitude de 3% et un indice de confiance de 5%. L'erreur obtenue sur les balances ioniques est généralement inférieure à 5%.

Les isotopes de la molécule d'eau ont été analysés par un appareil de laser spectrométrique (Los Gatos DLT-100) qui mesure les rapports isotopique directement dans l'eau. La précision de mesure est de 0.15 ‰ et 0.8 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et le $\delta^2\text{H}$ respectivement. Les résultats sont exprimés en déviation par rapport au standard de référence SMOW (*Standard Mean Ocean Water*).

Les mesures de tritium ont été réalisées à l'aide d'un compteur à scintillation liquide après enrichissement électrolytique.

2.3. Données acquises auprès d'organismes extérieurs

2.3.1. Mesures piézométriques

-Le suivi disponible sur le site de l'ADES du point, référencé 09663X0260-PA5, a été récupéré au pas de temps journalier depuis 2000.

-Le suivi de la mairie d'Avignon au pas de temps mensuel depuis 1990 (68 points)

2.3.2. Données climatiques

Les données climatiques au pas de temps horaires depuis 1990 proviennent de la station météorologique de l'INRA d'Avignon.

2.3.3. Suivi hydrodynamique de la Durance

Les données de hauteur et de débit de la Durance à la station de Bonpas, au pas de 15 minutes, ont été récupérées auprès du SPCGD (Service de Prévision des Crues du Grand Delta) depuis 1999.

2.3.4. Mesures hydrométriques

Les mesures de débits pour 7 prises sur le canal Crillon ont été récupérées auprès de l'association du Canal Crillon au pas de temps horaire depuis 2000.

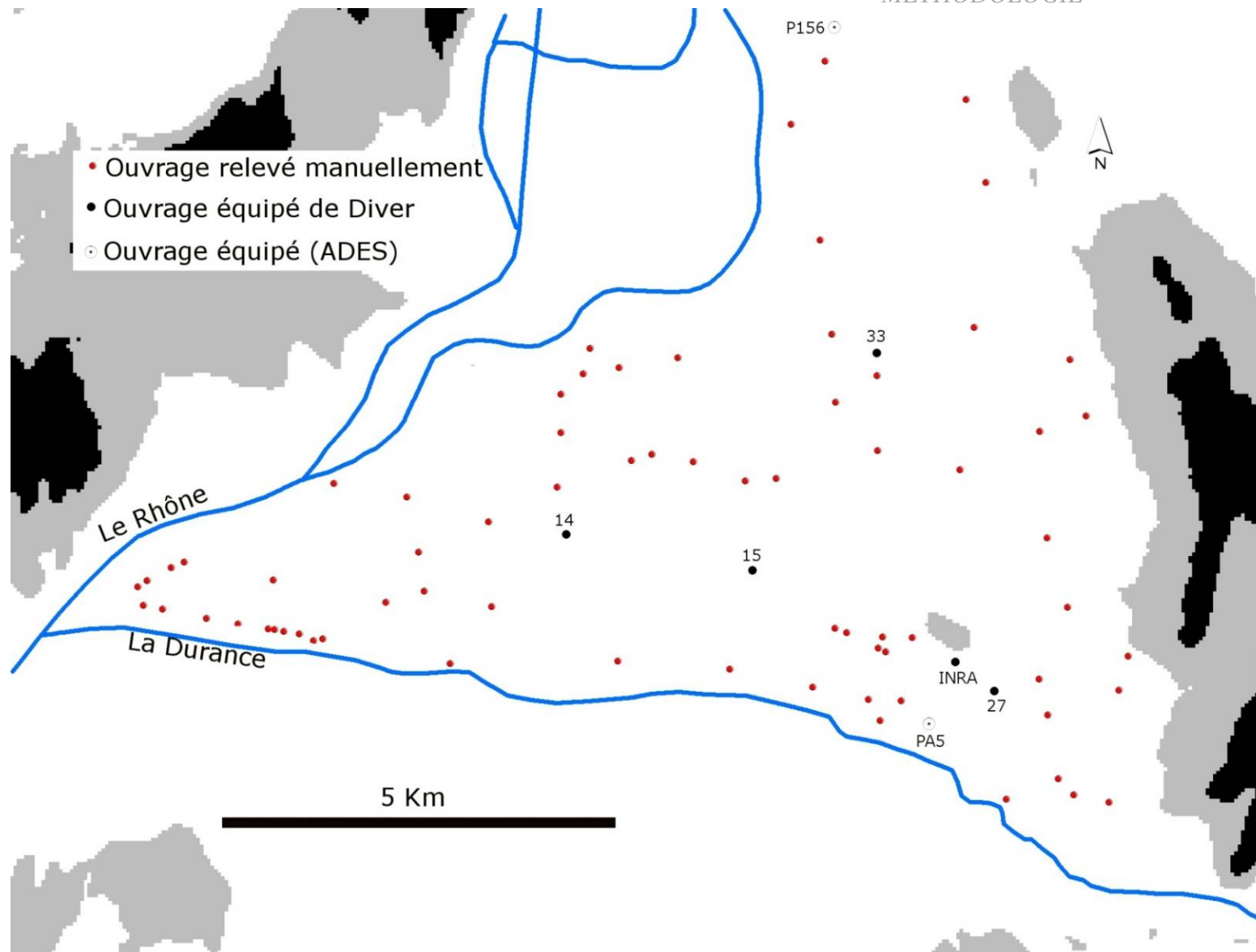


Figure 13. Réseau piézométrique de la plaine alluviale d'Avignon.

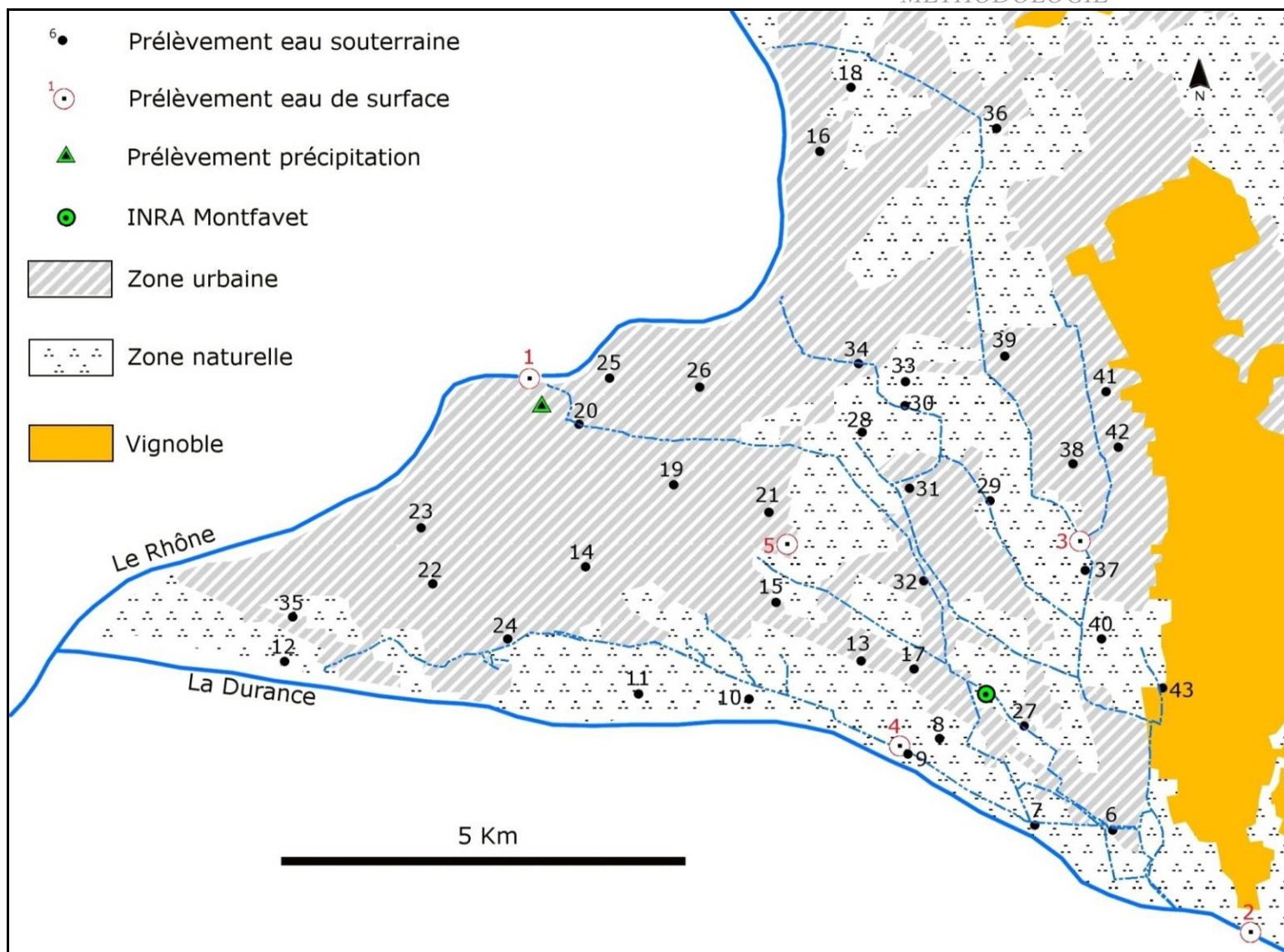


Figure 14. Localisation des points de prélèvements pour analyses dans la plaine alluviale d'Avignon.

3. HYDRODYNAMIQUE ET PIÉZOMÉTRIE

3.1. Le réservoir aquifère

3.1.1. Nature du réservoir

Le remplissage alluvial consiste en blocs et galets de roches cristallines et calcaires au sein d'une matrice sableuse plus ou moins fine, parfois consolidée (Ciron, 1992).

Ces alluvions récentes sont disposées en strates irrégulières et hétérogènes car elles ont été déposées dans un contexte fluvial à régime variable dans l'espace et dans le temps. A l'échelle de la vallée au droit de la commune d'Avignon, la répartition des dépôts récents est considérée comme assez homogène (DDEA, 1996).

3.1.2. Limites du réservoir

Une prospection géophysique par méthode électrique a été effectuée dans le passé (Cavalloni et al., 1965), suivant un profil transversal (**Figure 15**) dans la plaine d'Avignon (latitude de Réal-Panier). L'interprétation des données des sondages électriques a permis de définir nettement le substratum des alluvions (**Figure 16**), le contraste de résistivité entre les deux formations étant assez grand (15-50 ohms.m pour la première, 100-300 ohms.m pour la seconde). Ce substratum (marnes miocènes) se trouve à très faible profondeur à proximité immédiate du Rhône (5 m). Il s'approfondit très rapidement vers l'est pour se maintenir au voisinage de la côte absolue +8 m hormis au niveau du Réal-Panier où il descend à la côte -3 m. Il existe d'autres zones d'approfondissement à l'est à proximité de Morières avant la brusque remontée sur le versant ouest des reliefs de Saint Saturnin. L'épaisseur du substratum miocène est très importante (plusieurs centaines de mètres).

L'épaisseur de la zone noyée est assez grande, une quinzaine de mètres en moyenne, mais peut aller jusqu'à 22 m au niveau du Réal-Panier. Cette épaisseur diminue beaucoup à proximité du Rhône du fait du relèvement du substratum.

La résistivité des alluvions est faible, entre 80 et 300 ohms.m (moyenne 150), car elles sont en grande partie gorgées d'eau ce qui fait baisser la résistivité.

La partie superficielle n'est pas uniforme et comprend tantôt des limons argileux, tantôt des sables. Le niveau hydrostatique est très proche de la base de cette couche.

D'après (Mallessard, 1983), la couverture limoneuse diminue en s'éloignant du Rhône vers l'Est, avant qu'elle ne disparaisse totalement avec la remontée de la plaine vers sa bordure, alors qu'elle augmente vers le triangle de la Courtine (la confluence entre le Rhône et la Durance) où elle atteint 3 à 5 m.

Des reconnaissances par forage (Durozoy et al., 1964) ont été exécutées par la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) sur la vallée du Rhône et par EDF (Électricité de France) sur la vallée de la Durance. Elles ont abouti à une évaluation de l'épaisseur des alluvions en cohérence avec celles estimées à l'étude des sondages électriques (**Figure 17**). Sur les profils de sondage a été reporté le niveau piézométrique de la nappe des alluvions ; les indications lithologiques sont celles figurant sur les coupes établies par les entreprises de sondages.

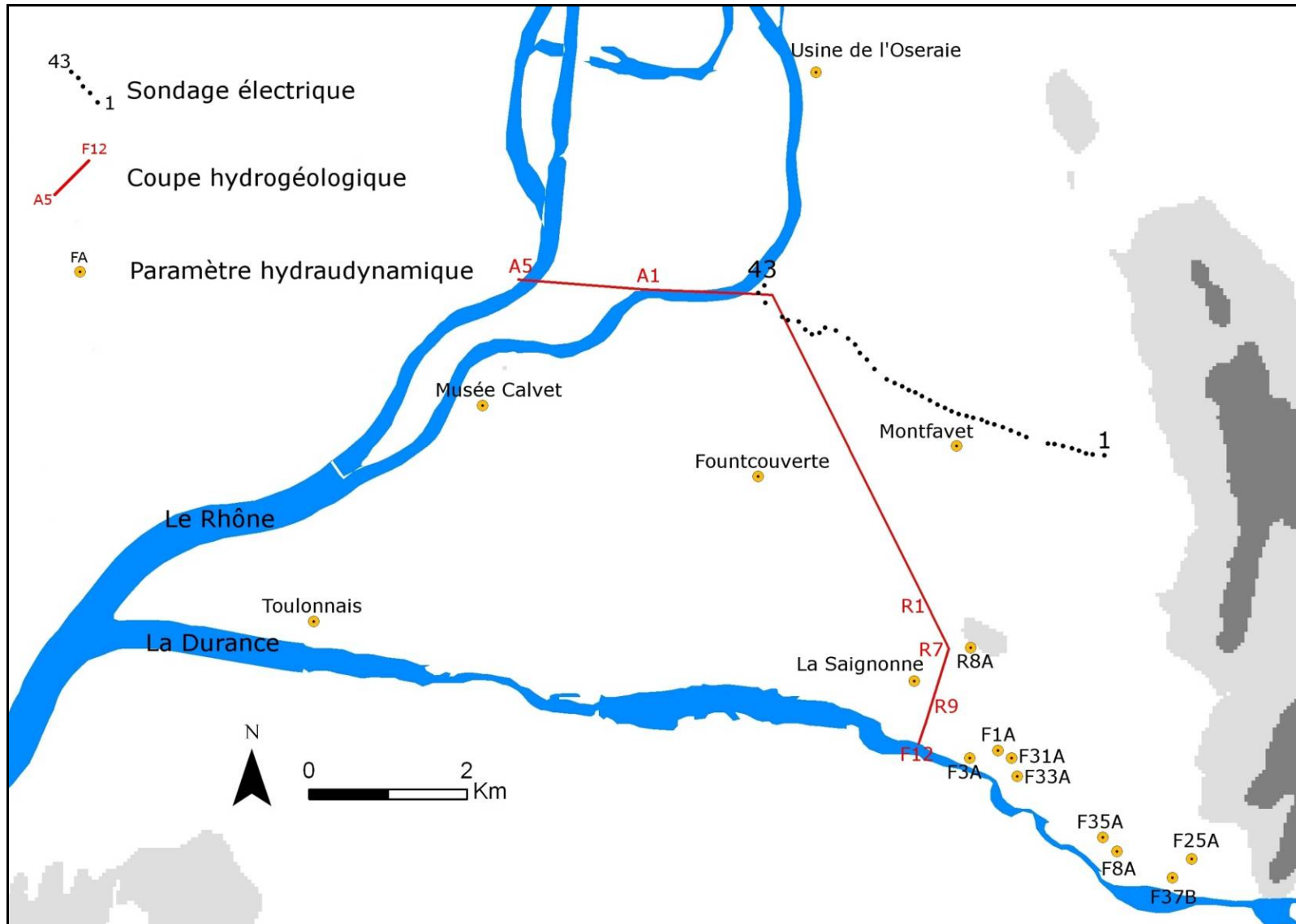


Figure 15. Localisation du profil de sondage électrique, de la coupe hydrogéologique et les mesures des paramètres hydrodynamiques.

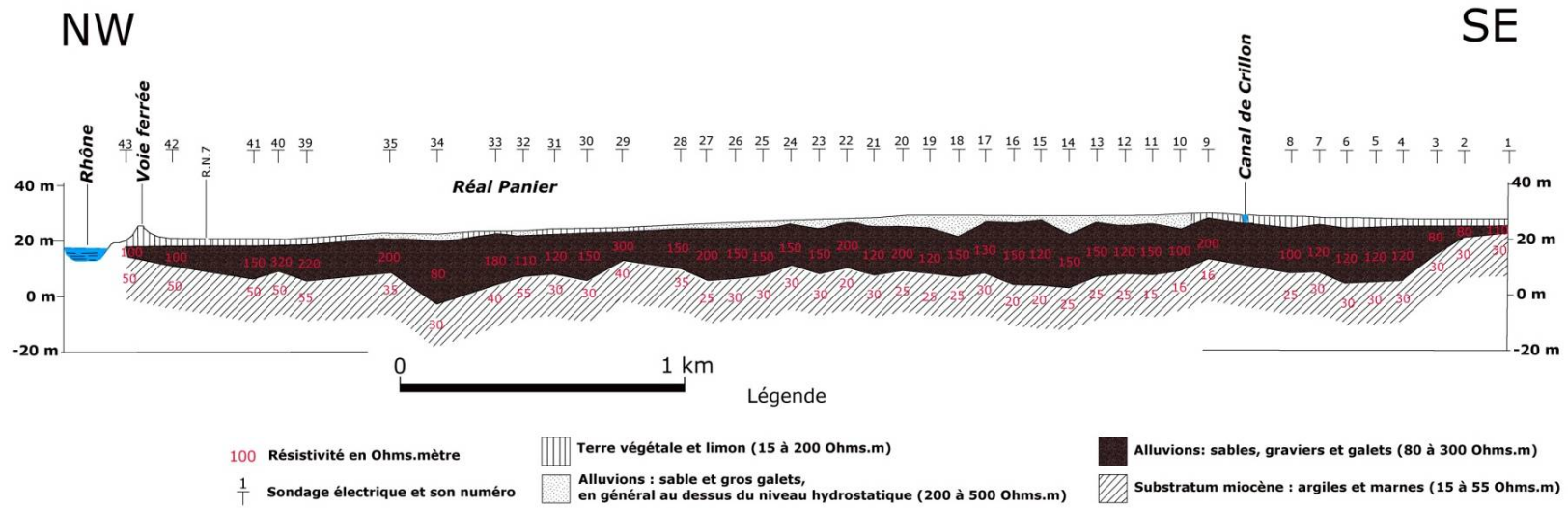


Figure 16. Coupe interprétative d'après les sondages électriques (Cavalloni et al., 1965).

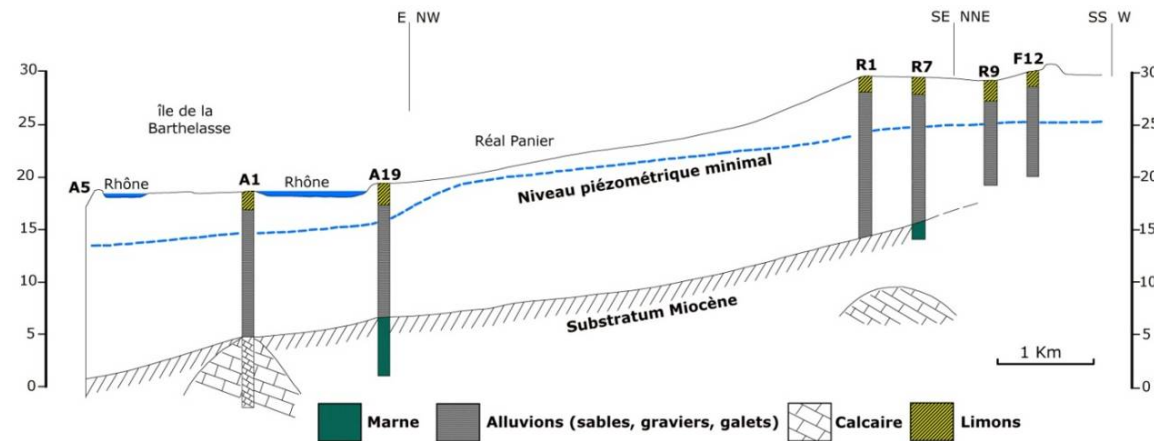


Figure 17. Profil de sondage CNR-EDF (Durozoy et al., 1964).

3.1.3. Caractéristiques hydrodynamiques

3.1.3.1. *Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère*

Nous avons rassemblé dans le tableau ci-dessous (**Tableau 2**) quelques valeurs de paramètres hydrodynamiques obtenus à partir de plusieurs pompages d'essai réalisés sur la nappe alluviale. La localisation des forages concernés est indiquée sur la **Figure 15**. L'aquifère est assez transmissif et perméable en général (perméabilité de l'ordre de 10^{-3} m/s).

Les alluvions dites grossières car riches en galets et en graviers ont une porosité moyenne de 5% (Burgeap, 1995) qui localement peut atteindre 15% (DDEA, 1996).

	Perméabilité (m/s)	Transmissivité (m ² /s)	Coefficient d'emmagasinement	Source
Champ de captage de la Saignonne	3.10^{-3} à 8.10^{-3}	5.10^{-2} à 1.10^{-1}		(Ciron, 1992)
Montfavet		$4,9.10^{-2}$		(Dellery et Garnier, 1982)
Musée Calvet	5.10^{-3}	5.10^{-2}	5.10^{-4}	(Garnier, 1988)
Usine de l'Oseraie	7.10^{-2}			(Mallessard, 1983)
Fontcouverte		5.10^{-2}		(Ciron et Vadon, 1986)
Toulonnais		2.10^{-1}		Infoterre (B.R.G.M)
F25A		$9,2.10^{-1}$		(Bossy, 1965)
F37B		$1,6.10^{-1}$		
F8A		10^{-2}		
F35A		$1,6.10^{-1}$		
F33A		$4,6.10^{-1}$		
F31A		$2,6.10^{-1}$		
F1A		6.10^{-2}		
F3A		5.10^{-2}		

Tableau 2. Paramètres hydrodynamiques de la nappe d'Avignon.

3.1.3.2. *Caractéristiques hydrodynamiques des formations superficielles*

Les alluvions du réservoir sont recouvertes par un sol peu perméable. De nombreux essais d'infiltration réalisés par la COGA (Communauté d'Agglomération du Grand Avignon), montrent une perméabilité verticale qui varie entre 10^{-5} m/s et 10^{-6} m/s sur la plaine d'Avignon. L'épaisseur de ce recouvrement qui est de nature limoneuse argileuse et sableuse varie de manière hétérogène dans l'espace entre 1 m et 3 m.

Des essais d'infiltration dans le lit majeur de la Durance montrent des valeurs de perméabilité qui varient entre 4.10^{-5} m/s et 7.10^{-5} m/s (Garnier, 1987).

3.2. Régime de la nappe

Plusieurs régimes piézométriques opposés s'observent sur quelques points de mesure répartis sur la zone d'étude et suivis entre 2010 et 2011 (**Figure 18**) (localisation des ouvrages en **Figure 20**). Le niveau piézométrique montre qu'en zone irriguée (31, 33, 36, 37), le niveau maximal de la nappe s'observe en été (juin, juillet, août) et le niveau minimal en hiver (décembre, janvier, février). La période des hautes eaux coïncide avec la période de pointe des irrigations, tandis que l'étiage de la nappe coïncide avec la période de chômage des canaux. Ce comportement singulier met en évidence le caractère artificiel de la réalimentation de la nappe sur le périmètre irrigué, que l'on peut attribuer sans conteste aux pertes de l'irrigation gravitaire.

Par contraste, les points situés en amont de la zone alimentée sur les coteaux de l'est (42 et 43) montrent des variations corrélées avec les précipitations. L'influence des irrigations gravitaires sur la nappe n'apparaît donc pas au niveau de ce périmètre avec de hautes eaux en hiver et au printemps, et un étiage d'été, conséquence de la sécheresse.

Plus les piézomètres sont proches de la Durance et moins leurs variations sont régulières et amples (7, 8, 9, 10).

Concernant les piézomètres situés en zone urbaine à l'ouest (14, 19, 25, 26), leur niveau est plus ou moins stable durant la période étudiée.

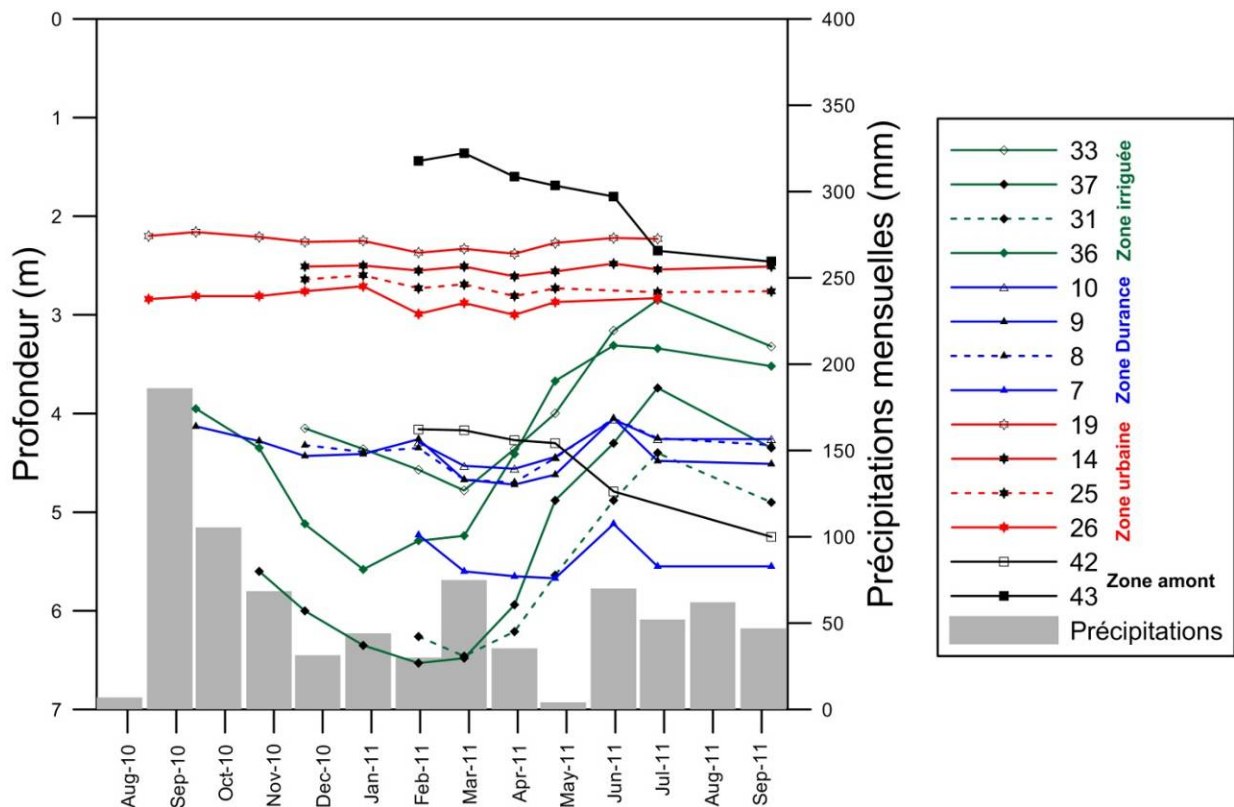


Figure 18. Évolution de la piézométrie (2010-2011).

Les données que nous avons acquises sur le site ont permis de dresser les cartes piézométriques actuelles de la plaine alluviale d'Avignon en basses eaux (**Figure 19**) et en hautes eaux (**Figure 20**). Pour les basses eaux, un point de contrôle situé dans la zone irriguée (29) a fait défaut, car du fait de sa profondeur insuffisante, il s'est trouvé asséché par la baisse de la nappe. Ces cartes ne présentent pas de différences fondamentales à l'échelle de la plaine alluviale. Bien que la densité des points de mesures soit, dans certains secteurs, un peu faible, ces deux cartes montrent un écoulement général E.SE-W.NW dans la partie sud-est de la plaine. Plus au nord, les écoulements sont nettement de l'est vers l'ouest.

Le gradient hydraulique varie de l'amont vers l'aval. Une zone à gradients élevés se situe à la périphérie orientale au pied des reliefs miocènes (environ 4‰). La transmissivité y est probablement faible. Vers l'ouest, dans une zone de topographie uniforme, la nappe montre une pente de plus en plus faible (entre 2 et 1.3‰). Ce qui implique une vitesse d'écoulement variant entre 10 m/jour et 20 m/jour (vitesse réelle estimée avec une porosité efficace de 0.05).

Les isopièzes indiquent généralement une alimentation par la Durance, surtout dans sa partie amont ce aussi bien en période de hautes eaux qu'en période de basses eaux. À une échelle plus locale, l'alimentation par la Durance en sa bordure, est accentuée aussi par les importants pompages du champ captant de la ville d'Avignon qui n'est éloigné que de 600 m de la Durance. L'influence des prélèvements se traduit par une déformation des isopièzes disposées de manière convexe autour du cours d'eau. Cela est plus net en période de basses eaux où le rôle de la Durance est plus important même en amont du champ captant, alors qu'en période de hautes eaux, les isopièzes (de 30 m NGF à 27 m NGF), en amont du champ captant, sont presque perpendiculaires à la Durance, indiquent un échange inférieur. La proportion d'eau en provenance de la rivière et qui participe au débit de la nappe doit donc varier au cours de l'année. Les isopièzes en aval de la Durance, sont bien espacées et disposées de manière presque perpendiculaire à la rivière. Cela est dû à la présence des contres-canaux installés au bord de la partie aval de la Durance. Par ailleurs, la présence de seuils peut entraîner des modifications des échanges nappe/ rivière. En effet, la mise en place d'un seuil sur une rivière a pour conséquence une infiltration d'une partie de l'eau de la rivière vers la nappe en amont du seuil et un drainage de la nappe accentué en aval de ce même seuil (Couvert et al., 1999). À l'échelle de la nappe d'Avignon et avec le maillage piézométrique à notre disposition il n'est pas possible de mettre en évidence ces phénomènes locaux.

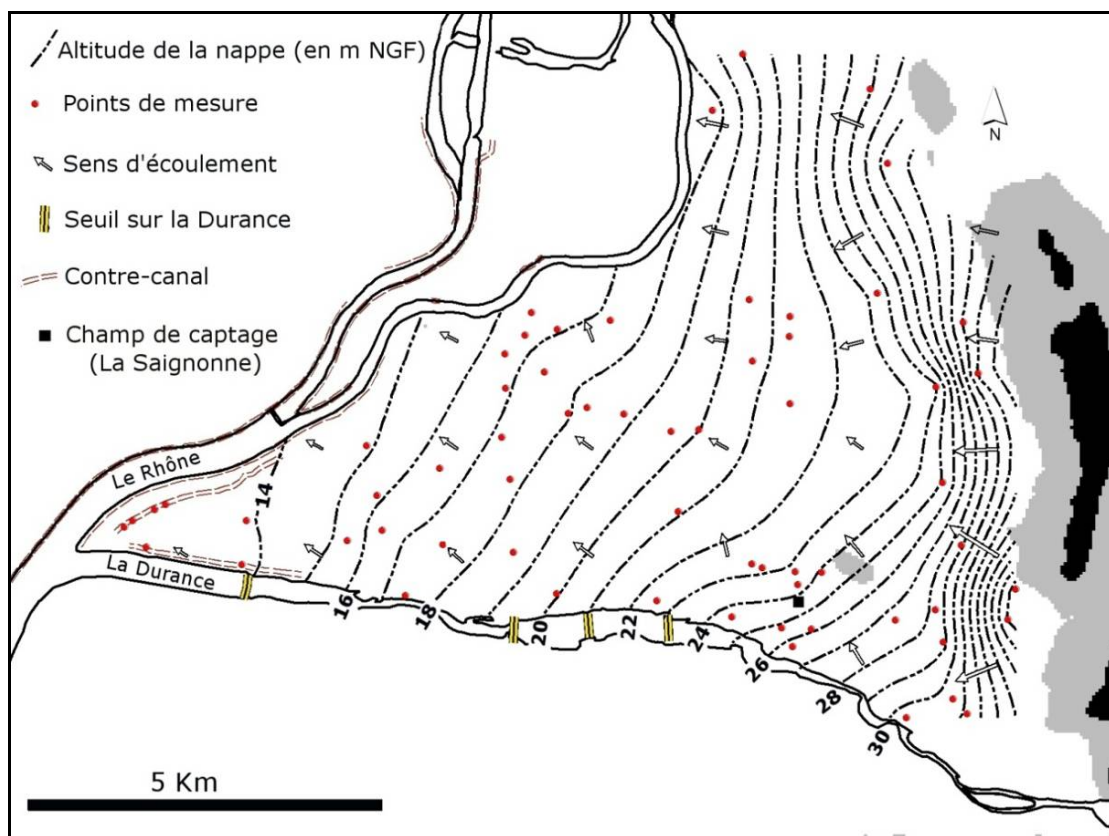


Figure 19. Carte piézométrique de la plaine d'Avignon en basses eaux (m NGF) (14.02.2011).

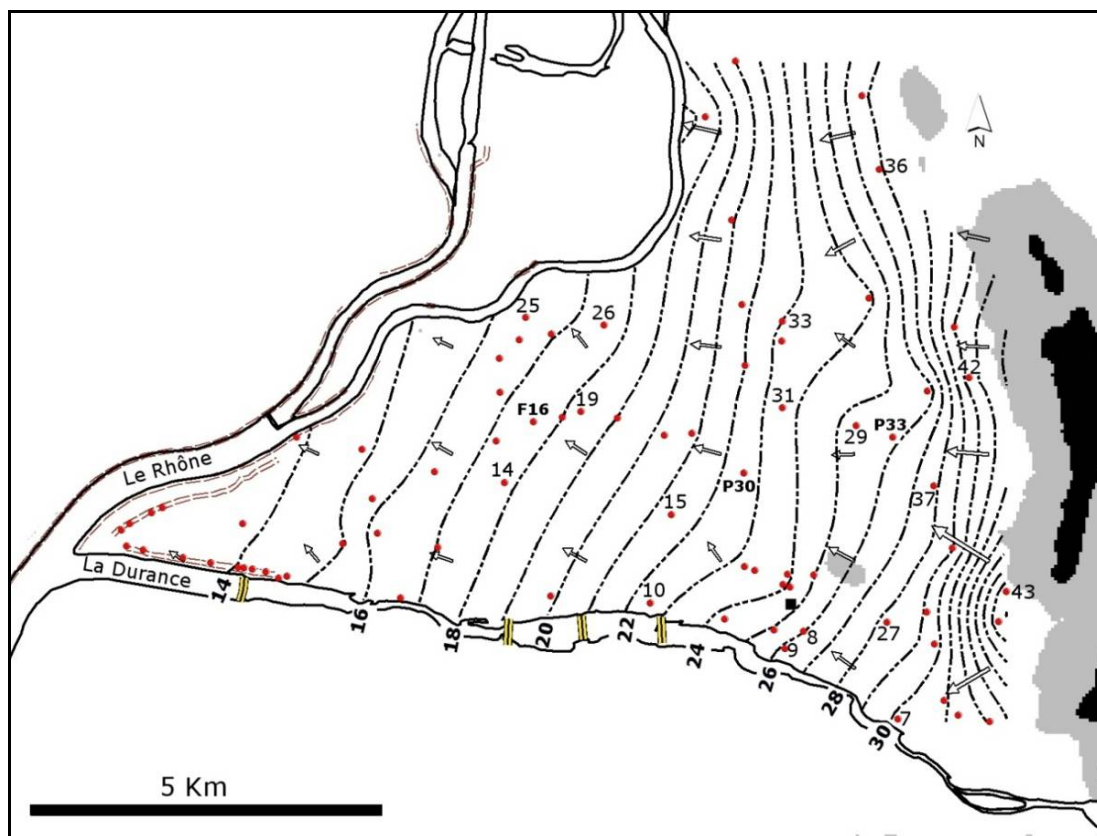


Figure 20. Carte piézométrique de la plaine alluviale d'Avignon en hautes eaux (m NGF) (15.07.2011).

Entre les niveaux piézométriques de hautes eaux et ceux de basses eaux, les différences les plus importantes (de l'ordre de 0.5m à 2.5m) sont localisées à l'est d'Avignon et correspondent à la zone d'influence des irrigations sur la réalimentation de la nappe (**Figure 21**).

Cependant, le manque d'informations piézométriques utilisables dans la partie nord du périmètre irrigué ne nous permet pas d'apprécier dans cette zone l'influence des irrigations sur la nappe.

Le battement maximal s'atténue lorsque l'on se rapproche de la Durance qui au cours de ces deux périodes a tendance à réguler le niveau de la nappe. Le Rhône quant à lui, joue aussi le rôle de régulateur par son action directe ou indirecte via les ouvrages associés (contre-canaux).

La carte de battement indique aussi peu de fluctuations de la nappe vers la ville d'Avignon, en même temps que l'urbanisation devient plus dense et réduit l'infiltration depuis la surface vers la nappe.

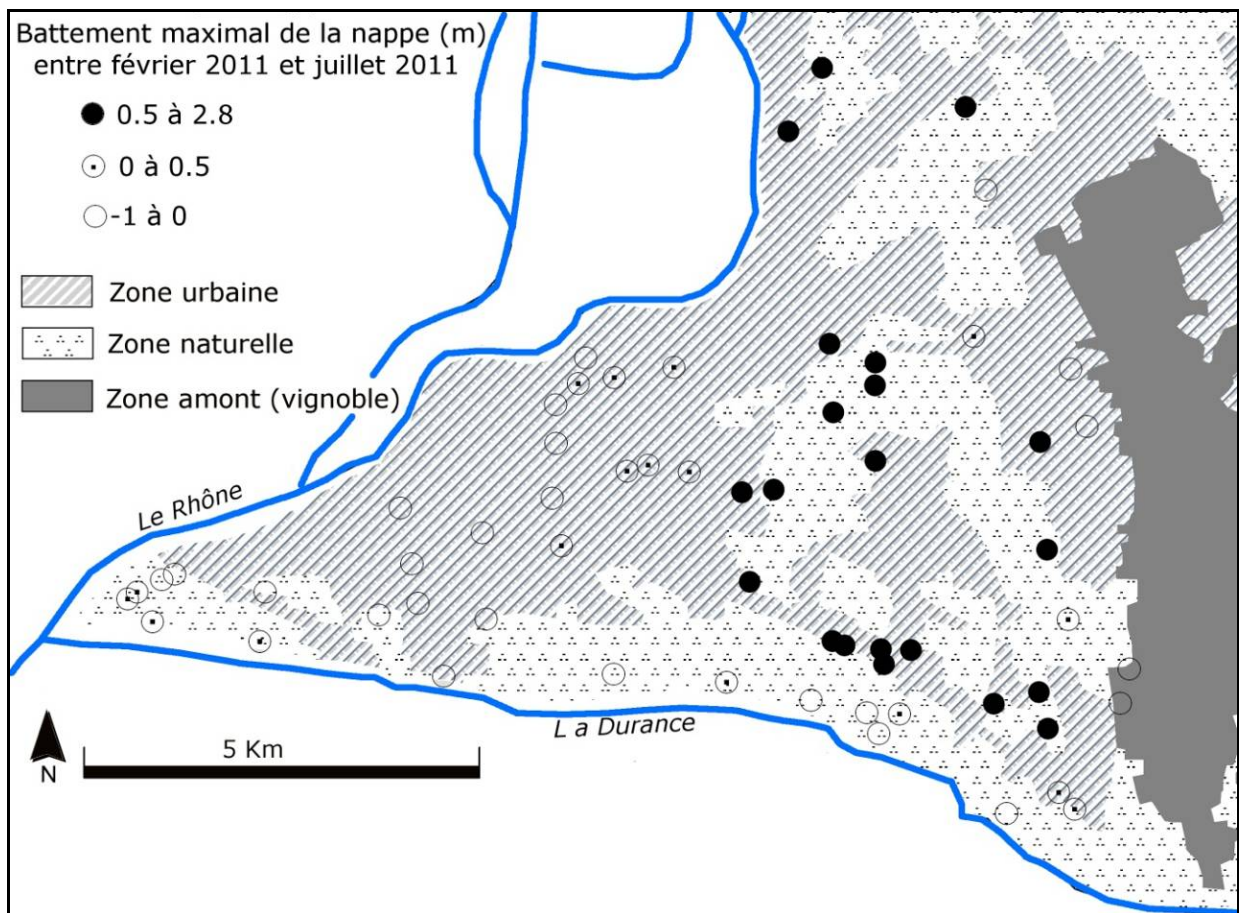


Figure 21. Battement maximal de la nappe (en m) pour l'année 2011.

L'augmentation du niveau piézométrique Δh entre la période de basses eaux et la période de hautes eaux peut être utilisée pour estimer la variation de stock ΔS :

$$\Delta S = \Delta h \cdot n_e \quad (n_e : \text{Porosité efficace})$$

Pour la période entre février 2011 et juillet 2011 et avec une porosité de 5% :

$$\Delta S = 2.2 \text{ millions de m}^3.$$

3.2.1. Changement de long terme du niveau piézométrique

Des anciennes données de mesures piézométriques ont été retrouvées grâce aux suivis de différents organismes (DREAL et BRGM). Ces mesures disponibles sur un demi-siècle (depuis les années 50) pour trois piézomètres repartis sur la zone d'études (**Figure 20**) montrent que généralement le niveau piézométrique de la nappe a eu tendance à baisser (**Figure 22**). Cependant cette baisse est relativement faible pour le piézomètre P33 (de l'ordre de 30 cm) alors qu'elle est plus élevée pour les piézomètres P30 et F16 (de l'ordre de 1 à 1.5 m). Cette différence de degré de la baisse piézométrique d'un piézomètre à un autre peut être expliquée par différents facteurs, notamment les changements d'occupation du sol à proximité du point de mesure.

Toutefois, la baisse piézométrique observée au niveau du point F16 et P30 a eu lieu principalement dans les années 60. Les niveaux piézométriques semblent relativement stables à partir des années 80.

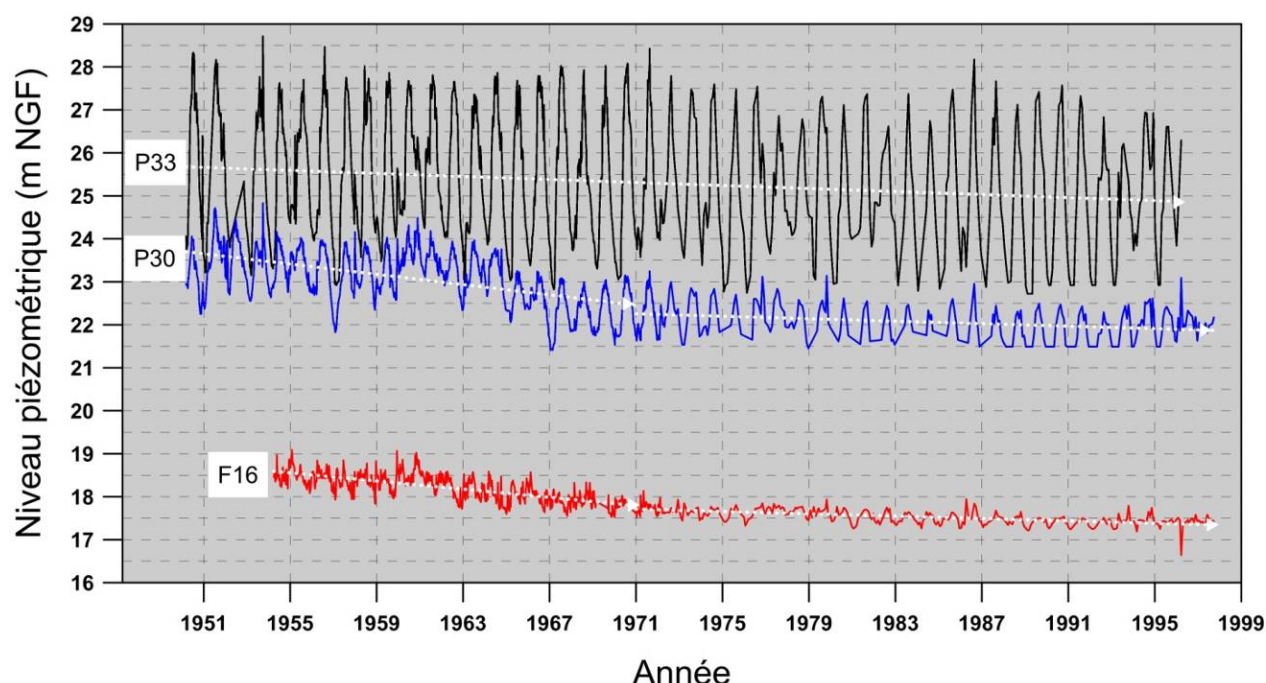


Figure 22. Changement du niveau piézométrique en P33, P30 et F16 et leurs tendances à long terme.

3.2.2. Sources d'alimentation de la nappe

Les principales sources d'alimentation de la nappe sont l'irrigation, la Durance et les précipitations. Les crues de la Durance peuvent alimenter la nappe en automne et au printemps. L'effet de ces apports se fait surtout ressentir en bordure de rivière. Les excédents d'irrigation, quant à eux, contribuent très largement à la réalimentation de la nappe puisque le régime des variations inter-saisonnières suit celui des arrosages : hautes eaux du printemps à l'automne, basses eaux en hiver.

3.2.2.1. Influence des précipitations

À l'échelle annuelle

L'évolution annuelle de la nappe sur des points équipés des sondes mesurant automatiquement le niveau piézométrique (14, 15, 27) (localisés sur la **Figure 14**) montre une fluctuation sinusoïdale de la nappe avec une tendance inverse du comportement à celle liée à la recharge par les précipitations. Le niveau de la nappe va donc être maximum pendant l'été et minimum pendant l'hiver (**Figure 23**). L'amplitude de variation diminue de l'amont vers l'aval de la nappe (vers la zone urbaine) en partant du point N° 27 à N° 15 et à N° 14 (l'amplitude ≈ 1.7 , 1, 0.5 m respectivement).

L'amplitude de la température de la nappe diminue également dans ce sens avec des variations brutales au niveau du point N° 27 lors des événements pluvieux (**Figure 24**). Alors que ces variations sont plus faibles au point N° 15 et absentes au point N° 14 ce qui peut être corrélé à la couverture du sol qui devient globalement plus imperméable dans la zone urbaine (point N°14) ce qui réduit l'infiltration directe de la pluie à travers le sol suivie par une percolation jusqu'à la nappe.

À l'échelle d'un événement pluvieux

L'analyse des événements pluvieux (soit 83 événements entre 2011 et 2013) montre que le temps de réponse moyen de la nappe suite aux épisodes pluvieux est assez court ; le niveau de la nappe commence à monter quelques heures après la pluie. Une telle augmentation de la piézométrie est plus visible au point N° 14 situé en zone urbaine et non-irriguée que celle aux points N° 15 et 27 qui sont proches de la zone irriguée. En effet, la remontée de la nappe par la pluie est souvent masquée au niveau des points N° 27 et 15 où le taux d'augmentation/baisse de la nappe est contraint par l'irrigation et surtout par rapport aux événements pluvieux inférieurs à 10 mm par jour. Cependant, le fait que pendant un événement pluvieux, les agriculteurs ont tendance à arrêter l'arrosage, la réponse de la nappe à la pluie devient parfois plus visible sur les chroniques piézométriques. Au niveau du point N°14, la nappe semble avoir réagi à tous les événements pluvieux supérieurs à 0.5 mm par jour même pendant une période sèche (**Figure 25**). Plusieurs réponses de la nappe à la pluie sont effectivement visibles sur les chroniques piézométriques. On notera, en particulier, celle du 3 au 7 novembre 2011 (période de descente de la nappe) correspondant à 160 mm de pluie en 5 jours avec 70 mm pour le seul 5 novembre (**Figure 26**). Le graphique à l'échelle horaire peut laisser penser qu'il existe une réponse rapide de la nappe à la pluie avec 1 à 2 heures de retard (**Figure 27**). Le niveau de la nappe avant la pluie du 3 novembre était à 4,38m (N° 27), 3,45 (N° 15) et 2,47 (N° 14) par rapport au sol. À la suite de l'épisode pluvieux le niveau est monté de 0,4 m (N° 27), 0,746 m (N° 15) et 0,88 m (N° 14).

L'évolution de la température montre une augmentation de 1.18 °C pour le point N° 27, ce qui indique une quantité d'eau importante arrivée jusqu'à la nappe (**Figure 28**). En N° 15 la variation de la température était moins importante et en N° 14 la température restait stable alors que les mesures piézométriques automatiques montraient une augmentation importante, phénomène qui peut être expliqué par une absence d'infiltration locale.

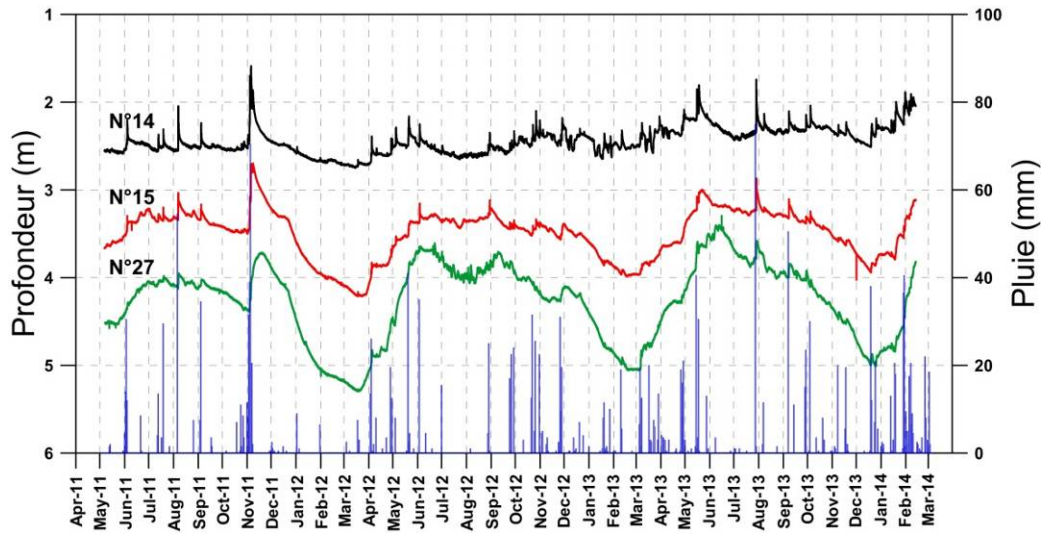


Figure 23. Piézométrie mesurée par sondes automatiques à pas de temps de 15 minutes et pluie journalière.

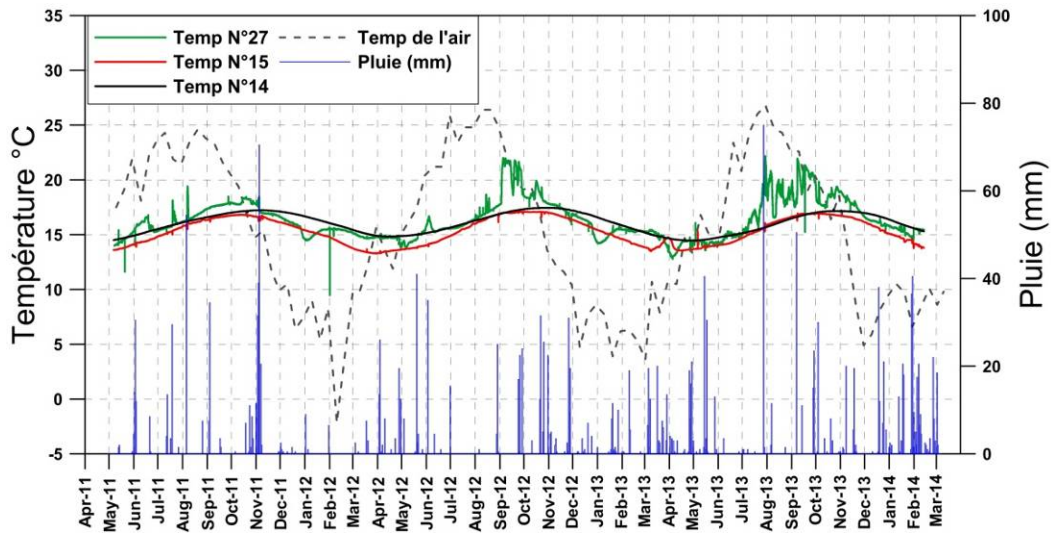


Figure 24. Température de la nappe en points 27, 15, 14 et température de l'air avec la pluie.

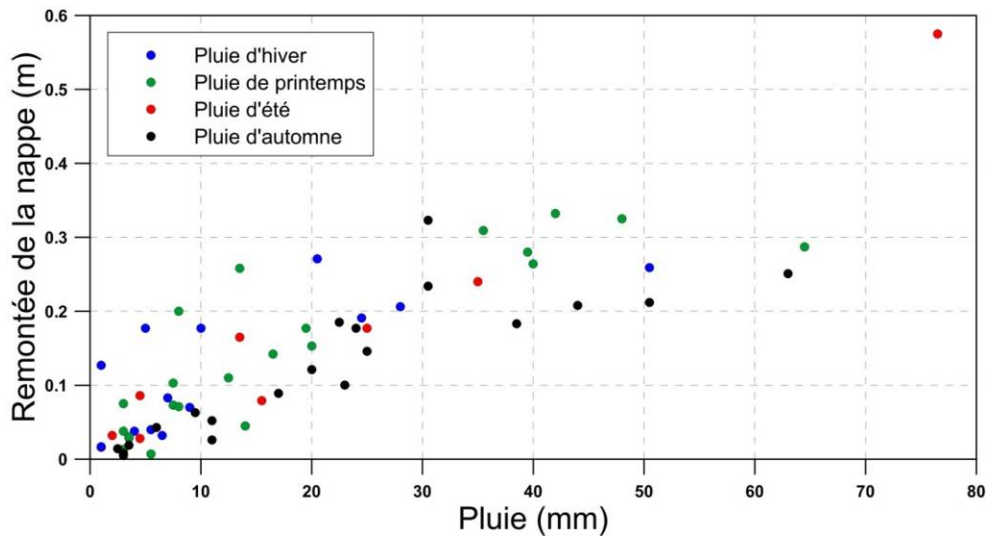


Figure 25. Relation entre la pluie (mm) et la remontée de la nappe (m) suite aux épisodes pluvieux au point 14.

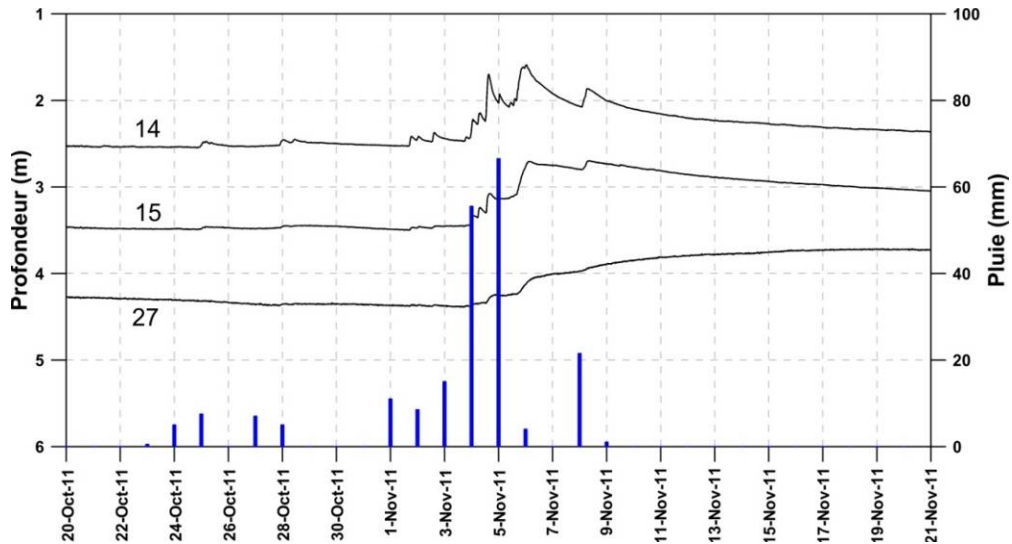


Figure 26. Variation de la piézométrie lors d'un événement pluvieux (3 novembre 2011) avec une pluie journalière.

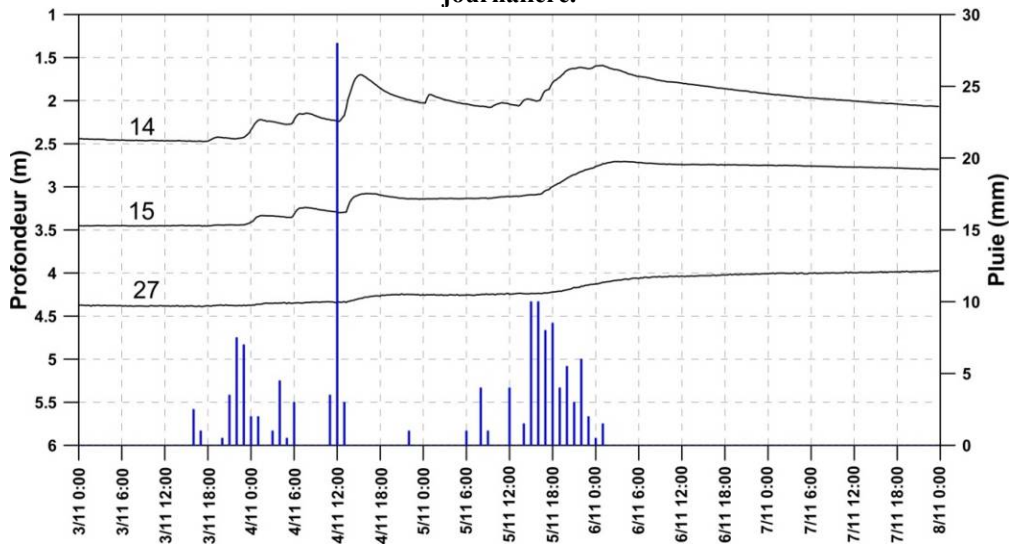


Figure 27. Évolution de la piézométrie et des pluies (au pas de temps horaires) du 1 au 6 novembre 2011.

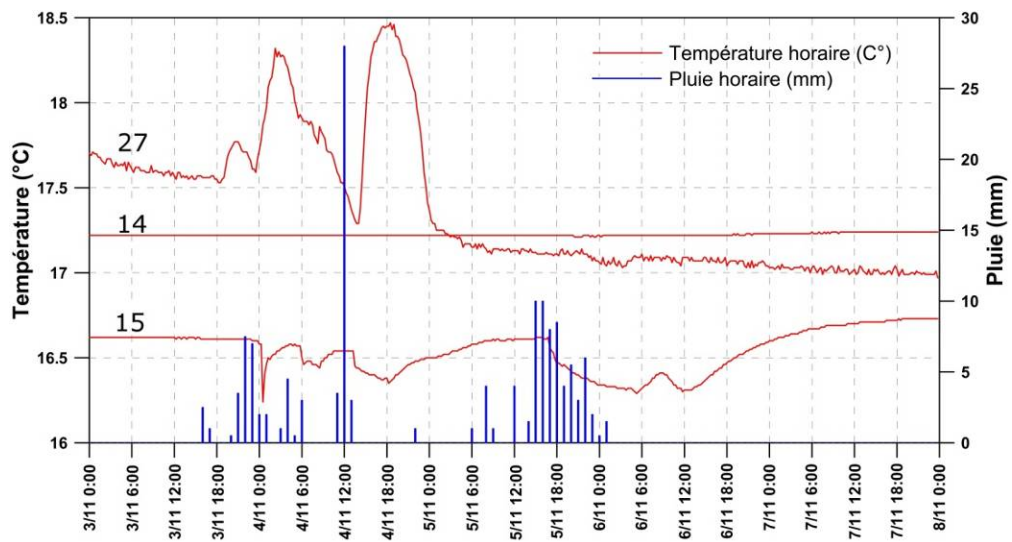


Figure 28. Variation de la température lors de l'événement pluvieux du 3 novembre 2011.

Estimation de la recharge par les précipitations

Estimation par bilan hydrique au pas mensuel

Les calculs du bilan hydrique visent à estimer la recharge verticale de la nappe par les eaux apportées en surface.

Ici la pluie est considérée comme la seule entrée. Le bilan est donc représentatif du fonctionnement du système hors irrigation et permet d'estimer la part "naturelle" de la recharge verticale (recharge par les précipitations).

Pour ce bilan on suppose que :

- Les paramètres climatiques utilisés mesurés à la station de l'INRA d'Avignon sont représentatifs de toute la zone étudiée.
- L'année hydrologique commence en août avec une réserve utile qui atteint normalement son zéro au début de ce mois-ci.
- L'excédent en eau de ce bilan est composé d'une partie qui ruisselle et d'une autre partie qui s'infiltre. Vus les reliefs de la zone d'étude qui sont peu marqués, on peut supposer que le ruissellement est négligeable et que l'excédent est égal à la recharge de la nappe par la pluie.
- La RU (la réserve utile) a été fixée à une valeur moyenne de 83 mm.

Le calcul de cette valeur de RU est basé sur des mesures de teneurs en eau volumiques à la capacité au champ (Θ_{cc}) au point de flétrissement permanent (Θ_{PFP}) en considérant la profondeur d'enracinement (Z) selon le type de culture en place.

$$RU = (\Theta_{cc} - \Theta_{PFP}) \times Z$$

Avec Θ_{cc} et Θ_{PFP} exprimées en cm^3/cm^3 , Z et RU en mm.

La détermination de Θ_{cc} et de Θ_{PFP} du sol a été faite à partir des prélèvements effectués dans cinq parcelles distribuées sur la plaine d'Avignon. Trois prélèvements ont été réalisés sur chaque parcelle. Le **Tableau 3** résume les calculs ayant abouti à la valeur moyenne de RU retenue pour le bilan hydrique de la pluie.

Parcelle	Type de culture	Profondeur d'enracinement Z (mm)	Θ_{cc} moyen	Θ_{PFP} moyen	RU moyenne (mm)
A	Prairie	450	0.32	0.16	74
B	Vigne	1000	0.23	0.13	99
C	Vigne	1000	0.28	0.18	102
D	Prairie	450	0.37	0.19	83
E	Prairie	450	0.29	0.16	62
					Moyen = 83 mm

Tableau 3. Détermination de la Réserve Utile moyenne (RU).

Le bilan hydrique a été réalisé suivant la méthode de Thornthwaite (Thornthwaite et Mather, 1955) en utilisant l'évapotranspiration potentielle mensuelle de Penman.

Le pas de temps mensuel a été utilisé afin de simplifier les calculs et les rendre compatibles avec le pas de temps de prélèvement pour l'étude hydrochimique. Toutefois, ce pas de temps ne prend pas en compte le caractère "extrême" du climat de notre zone d'étude où les précipitations d'un mois tombent sur quelques jours. Nous avons donc effectué un calcul avec un pas de temps décadaire pour étudier la sensibilité des calculs au pas de temps choisi.

L'excédent annuel augmente de 22% lorsque le pas de temps passe du mois à la décade.

Pour la période entre 1989 et 2011, l'excédent moyen annuel est très variable d'une année à l'autre avec une valeur moyenne de 135 mm/an pour le pas de temps mensuel (représentant 20% environ de la pluviométrie moyenne annuelle) et de 164 pour le pas de temps décadaire mm/an (soit 24. % de la pluviométrie moyenne annuelle) (**Figure 29**).

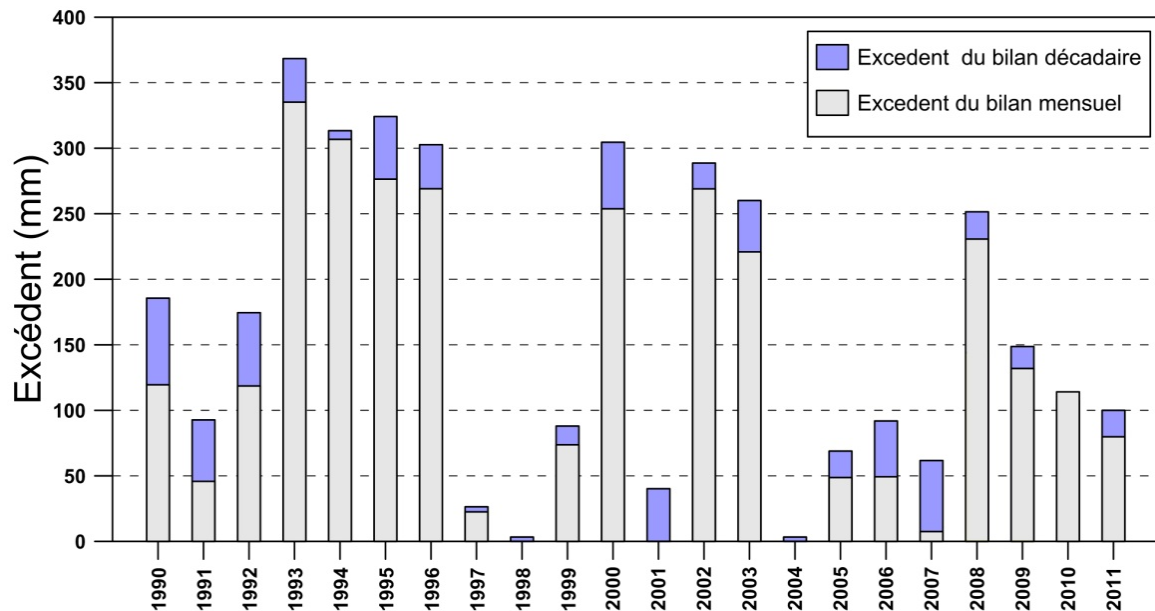


Figure 29. Excédent annuel calculé par le bilan hydrique.

Mesures débitométriques sur le lysimètre

Afin de vérifier l'importance de l'infiltration par la pluie, nous allons utiliser les mesures effectuées au sein d'un lysimètre installé à l'INRA Avignon à 600 m en aval du point N°27.

Le lysimètre, implanté au début des années 2000 dans le site atelier Fontanille à l'INRA d'Avignon, est constitué d'un monolithe de sol non remanié de 4.75m^2 de surface et de 2.20 m de haut isolé de l'extérieur par des murs en béton projeté sur une armature en acier. Un géotextile isole le sol du béton. Des palplanches, introduites en force, étanchéifient le fond du lysimètre (**Figure 30**).

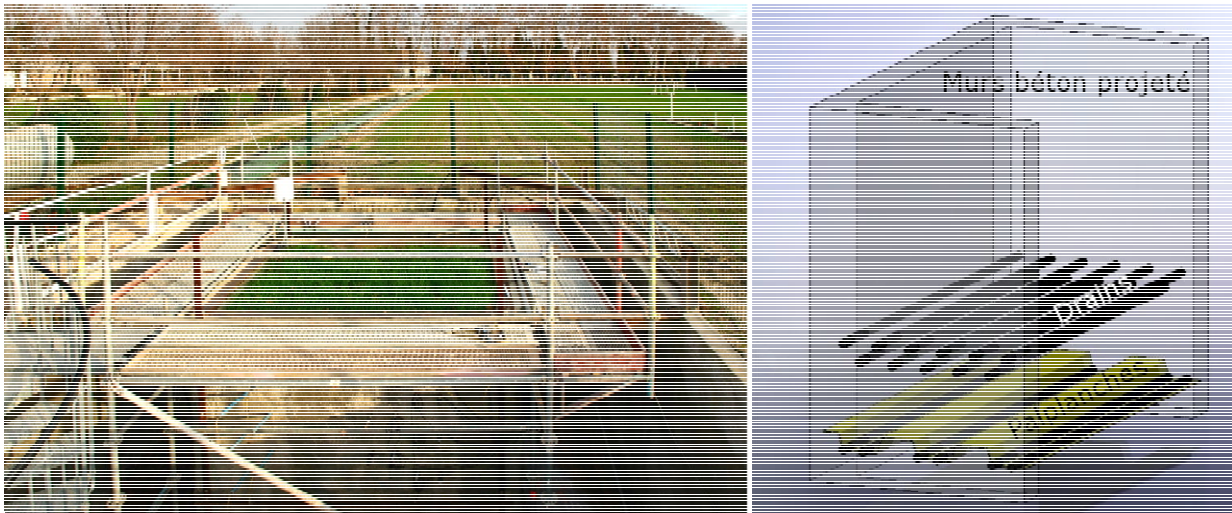


Figure 30. Le lysimètre du site atelier Fontanille (Tison et al., 2008).

Deux séries de drains récupèrent les eaux interceptées dans le sol et accumulées sur les palplanches. Un pluviographe est disposé en surface. Sept cannes de prélèvement à bougies poreuses pénètrent le sol à partir de la façade ouest. Deux groupes de dix tensiomètres et dix capteurs capacitifs sont implantés sur les façades est et ouest. Une centrale d'acquisition coordonne et enregistre les mesures de tous les capteurs.

À l'échelle de l'année, une période de non-drainage peut être identifiée ; cette période couvre les mois de juillet et d'août pour la période 2008-2011 (**Figure 31**). Le volume de drainage cumulé pour un événement pluvieux n'est pas proportionnel à l'importance de la pluie correspondante. Pour la même fourchette de quantité de pluie, les volumes de drainage en hiver sont plus importants que ceux de l'été et de l'automne (**Figure 32**). Cela peut être relié à l'état hydrique du sol qui est, en effet, plus humide pendant l'hiver et le printemps. Pour exemple, nous présentons l'année 2009 où nous disposons de mesures de stock d'eau dans le sol sur toute l'année (**Figure 33**).

Année	Pluie (mm)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2011	643	.		...	.		.	.		.		...	
2010	739	...	...	...	...	...	...	...		.	.	...	...
2009	647	...	...	.	...	...	...			.	.	.	...
2008	950	.	...	...	...	...	...	.		...	...	...	...

Figure 31. Durée du drainage du lysimètre (2008-2011).

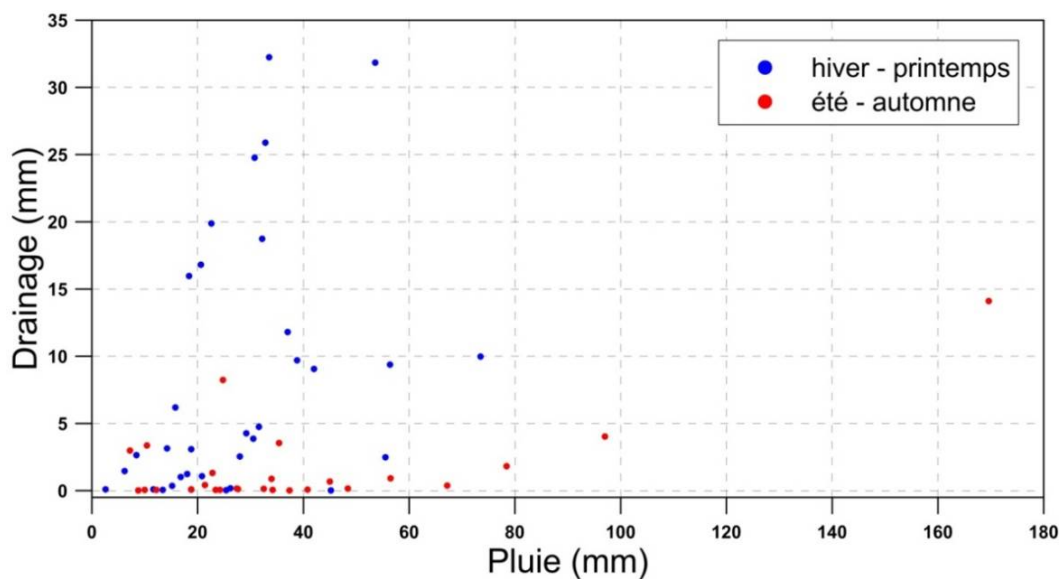


Figure 32. Relation pluie/drainage cumulés pour chaque évènement pluvieux (2008-2011).

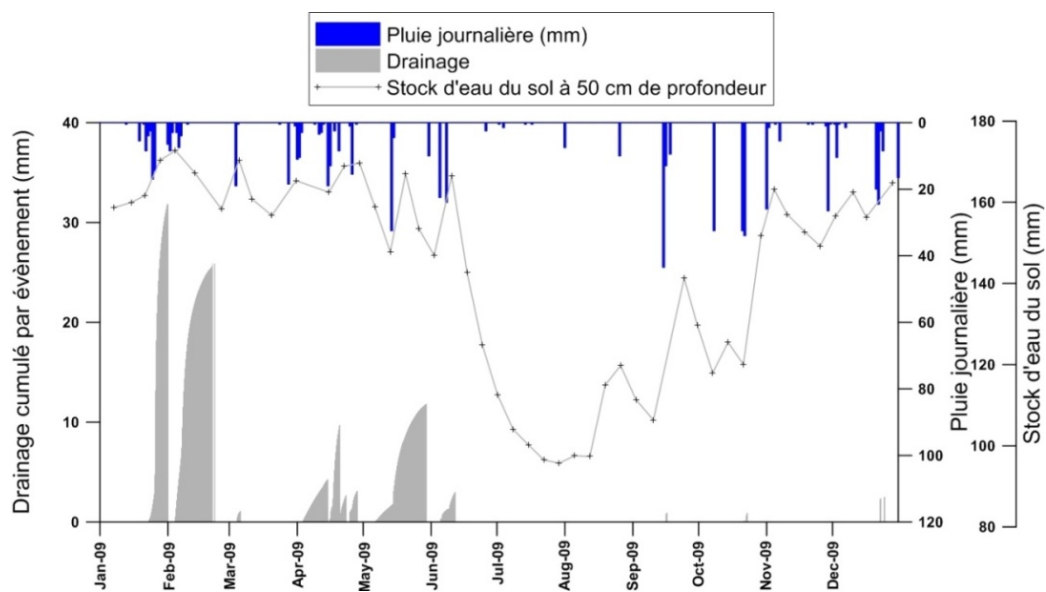


Figure 33. Évolution de la pluie journalière et le drainage cumulé sur les évènements et le stock du sol à 50 cm de profondeur.

Après des saisons généralement sèches entre juillet et août, la date de début de drainage varie notablement d'une année à l'autre selon le régime de pluie observé à l'automne. En 2008-2009, le drainage commence en novembre (**Figure 34**) alors qu'en 2009-2010, il commence en janvier (**Figure 35**).

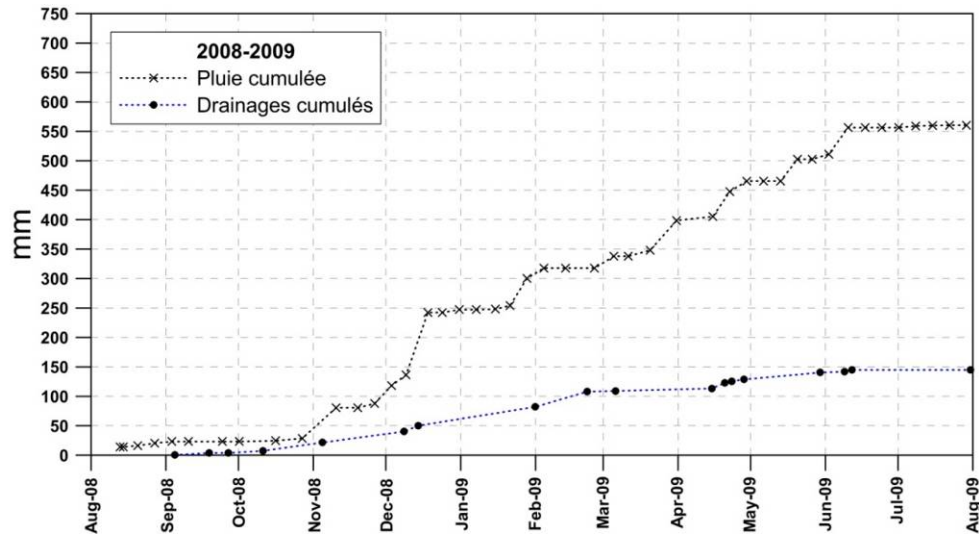


Figure 34. Évolution des précipitations et des drainages cumulés (2008 -2009).

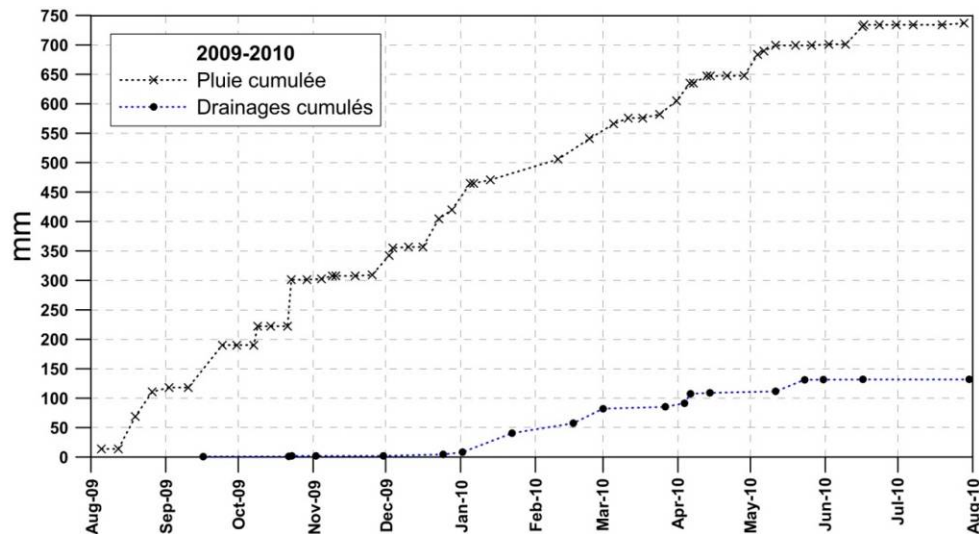


Figure 35. Évolution des précipitations et des drainages cumulés (2009-2010).

Le volume total d'eau drainé est de 144 mm pour l'année 2008-2009 et 132 mm pour l'année 2009-2010. Si ces quantités d'eau drainées sont comparées à l'excédent évalué par le bilan hydrique mensuel, (231 mm pour l'année 2008-2009 et 123 mm pour 2009-2010), on constate que l'ordre de grandeur de la recharge par les pluies estimé par les deux approches est cohérent pour l'année 2009-2010 alors qu'il y a un écart assez important en 2008-2009.

Il faut tout de même noter que l'information fournie par le lysimètre reste locale et n'est pas représentative de l'intégralité de la zone d'étude.

3.2.2.2. Influence des crues de la Durance

Sur les cartes piézométriques, il semble que la nappe soit alimentée par la Durance. Les crues de la rivière peuvent alimenter la nappe mais il faut aussi prendre en compte que la Durance est une rivière dont le régime d'écoulement est fortement contraint par l'homme. Le long de son cours, on rencontre de nombreux aménagements (**Figure 36**) :

- La retenue de Serre-Ponçon a pour triple objectif de réguler le cours d'eau de la Durance (écrêtement des crues), d'assurer la production d'électricité et d'assurer des apports d'eau pour l'irrigation.
- Des seuils qui transforment le lit de la rivière en escalier ont été mis en place afin de maintenir un niveau plus haut de l'eau et de ralentir la vitesse d'écoulement. En effet, l'exploitation des graviers dans le lit de la Durance risquait d'abaisser la ligne d'eau de la rivière non seulement au droit de l'exploitation mais également à l'amont par le phénomène d'érosion régressive.
- Les contre-canaux en bordure du Rhône et de la Durance qui permettent de contrôler les niveaux de la nappe pour éviter une remontée trop importante de la nappe suite à l'élévation de cote du niveau du Rhône par effet des barrages (Mallessard, 1983). Ces contre-canaux jouent le rôle d'intermédiaire entre la nappe et le fleuve et communiquent avec la nappe soit directement par les alluvions dans lesquels ils sont creusés, soit par des massifs de graviers filtrants ou des forages de décompression (D'Apolito, 1972). Les eaux collectées sur Avignon et de sa périphérie convergent vers une station de relevage qui refoule les eaux dans le Rhône. Au niveau de la confluence Rhône-Durance, l'exhaure de l'ensemble de débits des contre-canaux se fait par un siphon souterrain passant sous la Durance.

Les fluctuations de la nappe phréatique ont été suivies par un réseau de piézomètres, situés le long de la Durance (**Figure 36**), de façon à localiser l'écoulement souterrain (qui est à peu près perpendiculaire à la rivière). Cela a permis de préciser la relation Durance-nappe notamment le sens d'écoulement. La comparaison entre le niveau d'eau de la Durance et des niveaux piézométriques mesurés à proximité de la rivière pour différentes situations hydrologiques montre que la Durance alimente toujours la nappe dans sa partie amont même alors que la nappe, contrainte par le niveau des contre-canaux, a tendance à être drainée dans la partie aval (**Figure 37**).

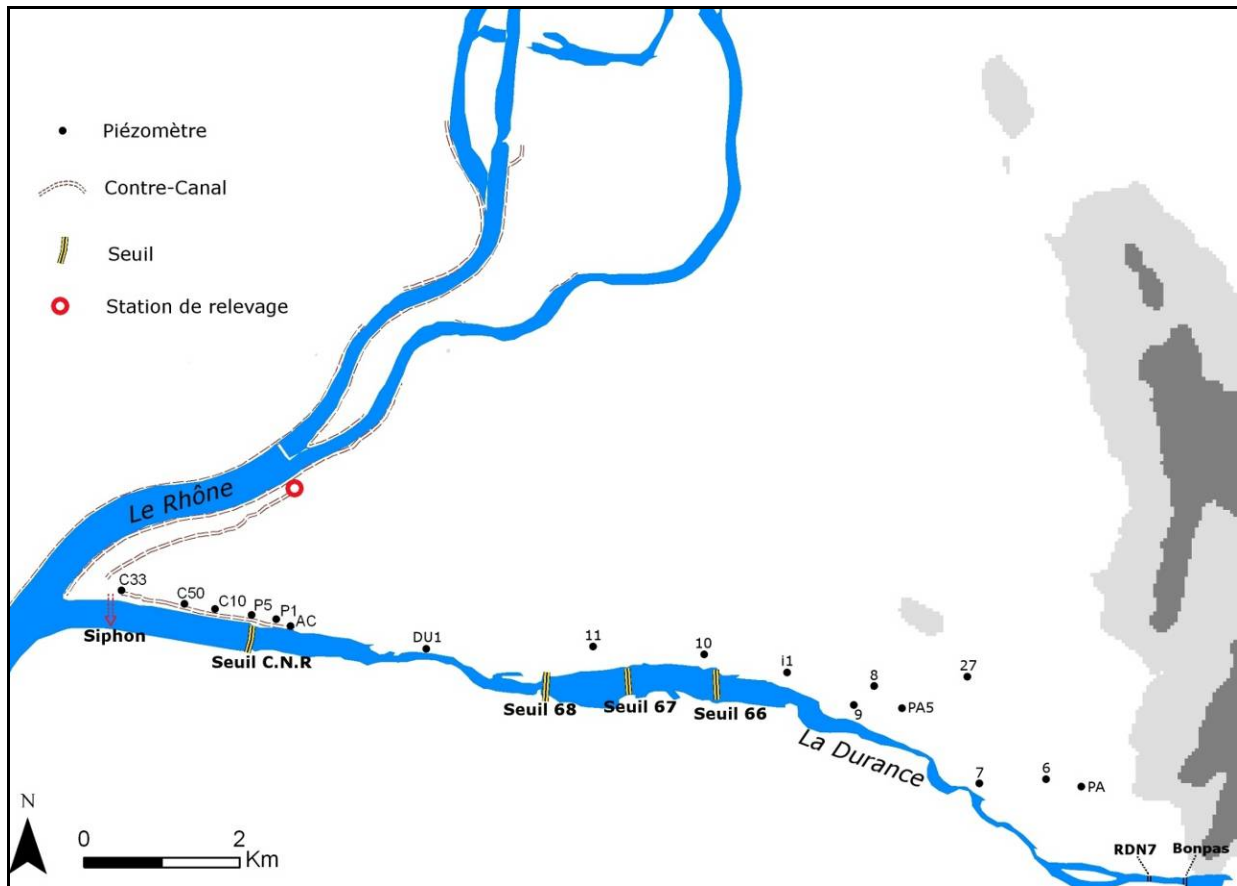


Figure 36. Aménagements hydrauliques sur la Durance et sur le Rhône et localisation des points de mesures.

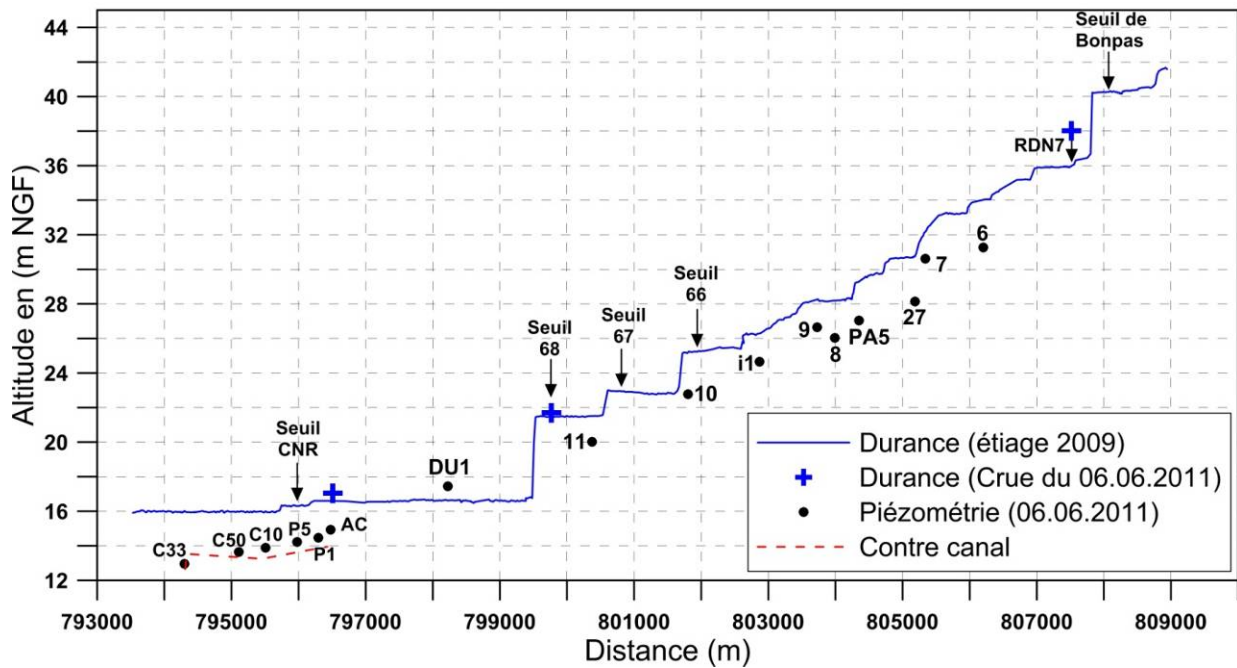


Figure 37. Relation Durance-nappe par comparaison des niveaux piézométrique mesurés pendant la crue du 06.06.2011 à la ligne d'eau de la Durance en été 2009 (source SMAVD).

L'examen de l'influence des crues permet de mieux cerner les zones d'alimentation par la rivière et de mieux caractériser la relation entre la rivière et sa nappe d'accompagnement et ainsi modéliser cette relation (crue). Pour répondre à cette tâche outre le suivi des piézomètres il a aussi fallu être très attentif aux relevés des hauteurs de chaque seuil de la Durance, notamment le seuil de Bonpas afin de relativement anticiper une crue suffisamment importante et pouvant donc influencer significativement la nappe.

Le site www.vigicrues.ecologie.gouv.fr nous a permis de suivre en temps réel l'évolution du niveau d'eau et du débit de la Durance (relevés tous les ¼ d'heure), au niveau du seuil de Bonpas, mais aussi sur des stations situées en amont. Nous avons ainsi pu suivre l'évolution de certaines crues et effectuer les mesures nécessaires couvrant entièrement l'évènement.

Ainsi le dimanche 11 Novembre 2012, une crue d'une ampleur suffisamment importante pour influencer la nappe fût enregistrée sur les différents seuils (débit de pointe de 1100 m³/s mesuré à la station de Bonpas le 11/11/2012 à 17h45). Les hauteurs d'eau des différents piézomètres les plus proches de la rivière, et donc les plus représentatifs pour étudier la relation entre la Durance et la nappe, ont été mesurés entre le 12 et le 23 novembre. La ligne d'eau de la Durance a été estimée à partir de hauteur au niveau du seuil de Bonpas (seuil EDF, suivis Vigicrues), au niveau du pont RN7 et des seuils 66 et 68 (lecture directe des hauteurs sur les échelles limnimétriques). À partir de ces données nous avons tenté d'établir un modèle d'échange rivière/nappe.

Toutefois, il faut noter qu'il n'y avait pas de précipitations pendant la période de mesures et les apports issus des pertes d'irrigation ne sont pas pris en compte par le modèle puisque il n'y a pas d'irrigation en novembre et que la zone qui est étudiée ne se situe pas dans les parties contraintes par l'irrigation.

Un modèle analytique unidimensionnel a été utilisé afin de suivre la réponse de la nappe lors de la crue de la Durance pour essayer de mieux comprendre l'influence de la Durance sur la nappe et pour permettre d'évaluer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

Principe du modèle

Le modèle unidimensionnel est piloté par l'équation pilotant les écoulements en milieu poreux (loi de Darcy et conservation de la masse) :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \alpha \frac{d^2 H}{dx^2} + \frac{W}{S}$$

Où :

- α est la diffusivité hydraulique ($\alpha = K \times E / S = T / S$; où E est l'épaisseur moyenne de l'aquifère et K est la conductivité hydraulique)
- H est la charge hydraulique (m)
- W représente les précipitations nettes (W= 0 pour le cas simulé ici)

- x est la distance suivant l'axe X (distance par rapport à la rivière en fonction des lignes d'écoulement)
- S est le coefficient d'emménagement de l'aquifère libre.

Les hypothèses ci-dessous ont été formulées en vue de résoudre l'équation précédente pour un aquifère non captif, qui a une limite à potentiel imposé d'une part (niveau d'eau de la rivière) et est considéré comme infini lorsque l'on s'éloigne de la rivière. Notons que, même s'il doit y avoir une deuxième limite, pour des raisons pratiques, elle serait placée suffisamment loin pour pouvoir négliger son effet sur le champs d'écoulement à proximité de la Durance (**Figure 38**).

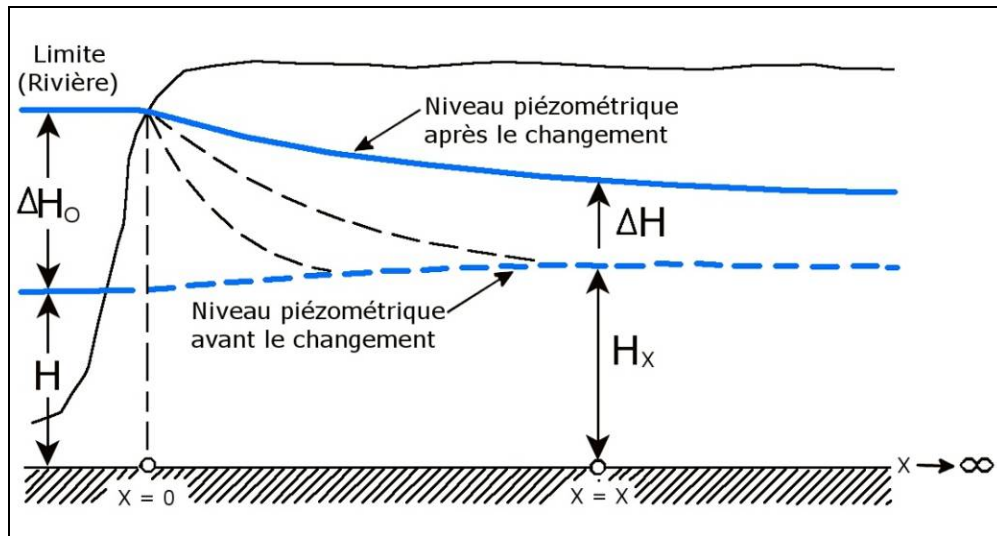


Figure 38. Conditions aux limites pour un régime transitoire 1D avec un changement soudain à la limite (Kresic, 1997).

- Lorsqu'on l'observe des changements de hauteur soudains à l'interface nappe rivière ($X=0$), on note à tout instant la variation de hauteur d'eau dans la rivière :

$$\Delta H(0,t) = \Delta H_0 \text{ (Pour } X=0 \text{ et } t = t)$$

- Lorsque le champ d'écoulement n'est pas perturbé de l'autre côté (où il n'y a aucune limite) et que la variation du niveau de la nappe d'eau est

$$\partial \left(\frac{\Delta H(x,t)}{\partial x} \right) = 0, \text{ pour } X \rightarrow \infty \text{ et } t = t$$

- Lorsqu'il n'y a aucune recharge de l'aquifère par infiltration d'une précipitation nette et par un phénomène de drainance verticale :

$$w = 0$$

Pour simuler la crue, la solution de l'équation est "empruntée" de la théorie du transfert de chaleur (modifiée par LEBEDEV, 1968) :

$$\Delta H(x,t) = \Delta H_0 \cdot \text{erfc}(\ddot{e})$$

Où :

- $\Delta H(x,t)$ représente la variation de hauteur piézométrique en fonction de l'abscisse X (distance à la rivière) et du temps
- $\text{erfc}(\ddot{e})$ est la fonction d'erreur complémentaire donnée par : $\text{erfc}(\ddot{e}) = 1 - \text{erf}(\ddot{e})$

La fonction d'erreur (*erfc*) est une intégrale de probabilités, dont les valeurs sont connues via des tables. Pour la solution de l'écoulement transitoire 1D avec un changement soudain à la limite, elle a la forme suivante :

$$\text{erfc}(\ddot{e}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\ddot{e}} e^{-\ddot{e}^2} d\ddot{e}$$

Où :

$$\ddot{e} = \frac{x}{2\sqrt{at}}$$

Mise en œuvre du modèle

Les entrées du modèle

Le modèle de simulation est contraint en entrée par les variations de hauteur d'eau en Durance.

Les hauteurs d'eau en Durance n'étant enregistrées en continu par capteur automatique qu'au niveau du seuil de Bonpas, non connues sur toute sa longueur, une approximation de ces hauteurs a été réalisée en aval de ce seuil par comparaison des hauteurs d'eau observées au seuil de Bonpas et celles observées au même moment lors de déplacement sur le terrain au niveau du pont de la RN7 et du seuil 68 (**Figure 39**).

Ainsi, nous avons pu mettre en évidence des corrélations linéaires très significatives entre ces hauteurs, et ainsi déduire de manière satisfaisante les variations de hauteurs d'eau en aval de la station de mesure en temps réel de Bonpas, à l'aplomb de chaque piézomètre de contrôle

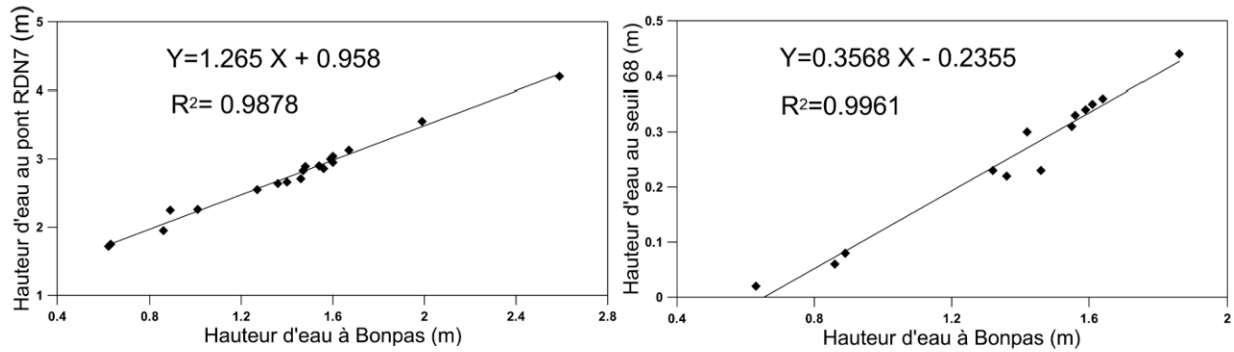


Figure 39. Relation entre les hauteurs d'eau en Durance (en m). Hauteurs observées à l'échelle limnimétrique du pont de la RN7 et au seuil 68 vs hauteur observée par capteur au seuil de Bonpas.

Calage du modèle

Le modèle utilisé ici ne possède qu'un seul paramètre, la diffusivité α .

Afin de déterminer la valeur de ce paramètre, nous avons réalisé les calculs de variations de hauteurs piézométriques en nappe pour des distances X correspondant à la distance séparant les piézomètres de la Durance. Ces distances ont été déterminées perpendiculairement aux lignes de courant, à partir des cartes piézométriques.

Les variations de hauteur piézométrique calculées par le modèle ont été comparées aux variations observées à l'aide du critère comparaison la moyenne des moindres carrées.

Et nous avons retenu pour chaque point la valeur de la diffusivité pour laquelle l'ajustement entre calcul et mesure était le meilleur (**Tableau 4**).

Point de mesure	Distance à la rivière (m)	Diffusivité α (m ² /s)	Critère d'ajustement (m ²)
PA	930	0.6	0.00026
6	635	0.4	0.00008
7	90	0.51	0.0285
27	1000	0.4	0.00005
8	590	0.58	0.0021
9	270	0.51	0.00047
10	210	0.5	0.00026
11	290	0.48	0.00004
PA5	400	0.37	0.0025

Tableau 4. Diffusivités calculées par le modèle à différents endroits (localisation sur la Figure 36).

Résultats :

La valeur moyenne de la diffusivité (T/S) obtenue avec ce modèle est de $0.5.m^2/s$ avec une valeur moyenne sur ce secteur de $0.15 m^2/s$ pour la transmissivité mesurée sur le terrain au bord de la Durance (cf **Tableau 2**), on obtient un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 0.3. Cette valeur est beaucoup plus grande que celle mesurée sur le terrain ou des valeurs attendues pour ce type d'aquifère.

Cette surestimation du paramètre S peut s'expliquer par un phénomène de drainance. En effet, le modèle fait l'hypothèse d'un contact hydraulique direct entre la Durance et la nappe, alors qu'il existe une couche de limon au contact entre la nappe et la rivière.

Cette surestimation viendrait compenser cette hypothèse erronée. Ce résultat nous conduira lors de notre démarche de modélisation à prendre en compte ce phénomène de drainance dans les échanges entre la Durance et la nappe.

Les variations de hauteurs de la nappe simulée semblent bien restituées globalement par le modèle (**Figure 40**). Le décalage de la réponse de la nappe dans le temps par rapport à la crue de la rivière s'explique par le temps de transfert de l'onde de crue qui dépend à la distance (X) séparant le piézomètre de la rivière. En effet, les piézomètres proches de la rivière sont plus sensibles aux variations du niveau de l'eau dans la rivière.

En exemple, le niveau piézométrique du point 9 éloigné de 270 m environ, atteint son niveau maximal moins de 24h plus tard que le pic de la crue (on ne sait pas le temps exact par manque de mesures piézométriques continues) avec une remontée de 60 cm contre 1.5 m dans la rivière. La nappe semble aussi influencée par la crue plus loin de la rivière ; le point 27, situé à une distance de 1 km et sur la même interface que le point 9, montre une réponse à la crue décalée de 6 jours environ de la date de la crue avec une augmentation de quelques centimètres par rapport à son niveau piézométrique initial.

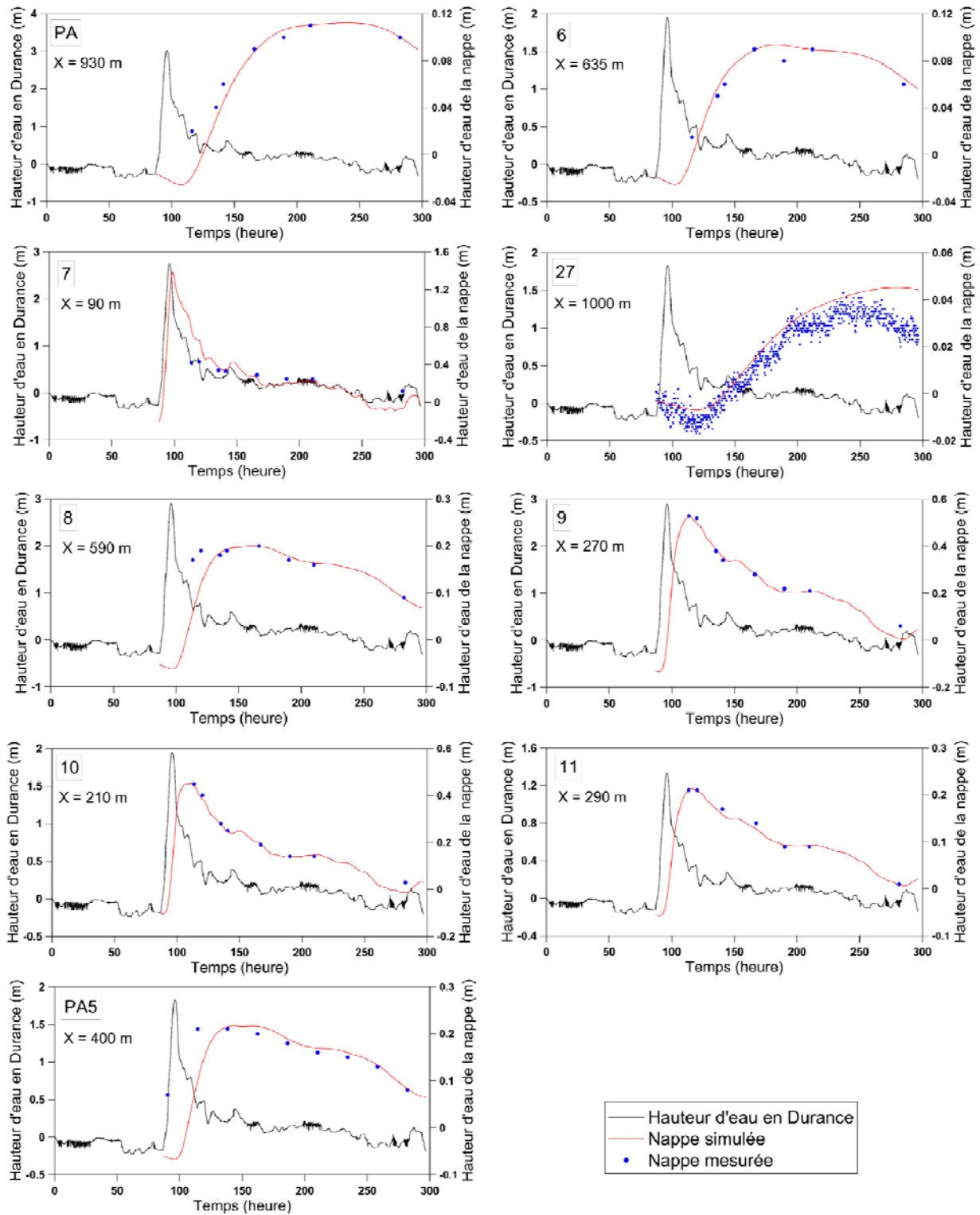


Figure 40. Comparaison entre les hauteurs de la nappe mesurées (points bleus) et calculées par le modèle de transfert (courbe rouge).

3.2.2.3. Influence des irrigations

Le bilan hydraulique sur le périmètre du canal Crillon

La mise à disposition des données de débits horaires sur une dizaine d'années (2000-2011) nous a permis d'effectuer une première approche de la notion d'infiltration due à l'irrigation. Ces données nous ont été fournies par l'Association Syndicale du Canal Crillon. Les débits sont mesurés à 7 endroits distincts du réseau :

- La prise du Canal Crillon située à Bonpas (Avignon Sud-Est)
- L'aval du Canal Crillon (exutoire du canal vers l'Ouvèze)
- L'amont du Canal Saint Martin, filiole du Canal Crillon
- L'aval du Canal Saint Martin (exutoire du canal vers le Rhône)
- L'amont du Canal Vallon, filiole du Canal Crillon
- L'aval du Canal Vallon
- L'amont du Canal Montfavet, filiole du Canal Crillon.

Une partie des eaux du Canal Crillon se jette dans le Canal Saint Martin, une autre partie semble servir à l'irrigation ou être perdue par infiltration. Les points de mesures des débits horaires par l'association syndicale du Canal Crillon sont reportés sur (**Figure 41**).

À partir des valeurs de débits horaires mesurés nous avons estimé des débits mensuels moyens pour chacun des points de mesures et les volumes moyens entrant et sortant pour ensuite calculer les volumes utilisés par le syndicat du Canal Crillon correspondant à la différence entre les volumes entrants et les volumes sortants. Nous considérons comme volumes utilisés tous les volumes qui entrent sur le périmètre et qui ne ressortent pas dans le milieu hydraulique superficiel (fossés d'écoulement, drain, Rhône, ...). Il s'agit de l'ensemble de l'eau qui est prélevée par le syndicat pour pourvoir à l'irrigation des cultures.

Devenir des volumes utilisés :

Sur le périmètre du Canal Crillon en millions de m³ par an :

- Le volume entrant est de 35 Mm³/an
- Le volume sortant est de 9.7 Mm³/an
- Le volume utilisé est de 25.4 Mm³/an

Une partie des volumes utilisés est consommée par les plantes et le reste disparaît par infiltration sur le réseau et les parcelles.

Précisons donc ces différents volumes :

Volumes consommés par les plantes :

L'estimation du besoin net en eau des plantes fait intervenir 4 paramètres :

- La répartition culturale et la superficie irriguée
- La consommation des plantes (évapotranspiration)
- L'apport dû à la pluie
- La contribution du sol (la réserve utile).

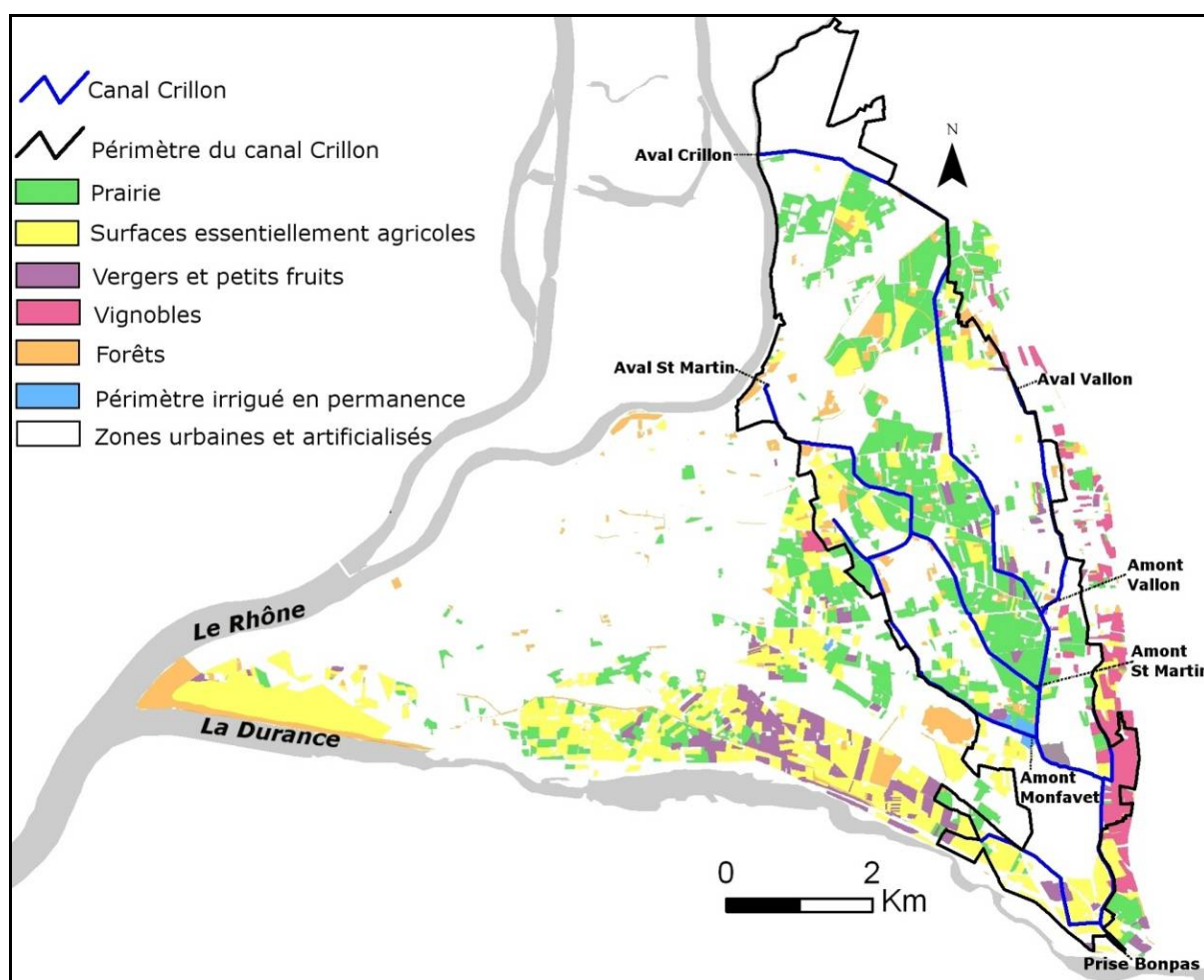


Figure 41. Le réseau du Canal Crillon et ses principales filiales avec l'occupation du sol en fond de la carte.
Source : Communauté d'Agglomération du Grand Avignon (COGA).

Type d'occupation	Surface (en Km ²)	Répartition culturelle (en %)
Prairies	7.54	69.3
Vignobles	0.48	4.4
Vergers et petits fruits	0.47	4.3
Oliveraies	0.01	0.1
Surfaces essentiellement agricoles	2.38	21.9
Totaux	10.88	100

Tableau 5. La répartition des cultures dans la plaine d'Avignon estimée utilisant Arcgis 10.2 .

Pour calculer la consommation des plantes (ETR_m), nous ne considérerons pas les vignes car elles ne sont pas arrosées gravitairement. La superficie considérée irriguée est donc de 10.4 km² sur le périmètre du Canal Crillon.

$$ETR_m = K_c \times ETP$$

Où :

- ETR_m : Évapotranspiration réelle maximale
- ETP : Évapotranspiration potentielle
- K_c : Coefficient cultural (considéré égale à 1)

$$B_n = ETR_m - P_e$$

Où :

- B_n : Besoins nets des plantes
- ETR_m : Évapotranspiration réelle maximale
- P_e : Précipitations efficaces

Sur la période 2000-2011, le volume annuel consommé par les cultures est de 11.7 Mm³.

Volumes infiltrés (annexe 2) :

Ils sont égaux aux volumes utilisés par le syndicat moins les volumes consommés par les plantes. Il y a donc une moyenne annuelle environ 15 millions de m³ qui s'infiltrent et rejoignent la nappe. On considère que ces volumes englobent les volumes infiltrés sur les parcelles agricoles et les pertes en lignes. Les volumes infiltrés atteignent leur maximum durant l'été (**Figure 42**).

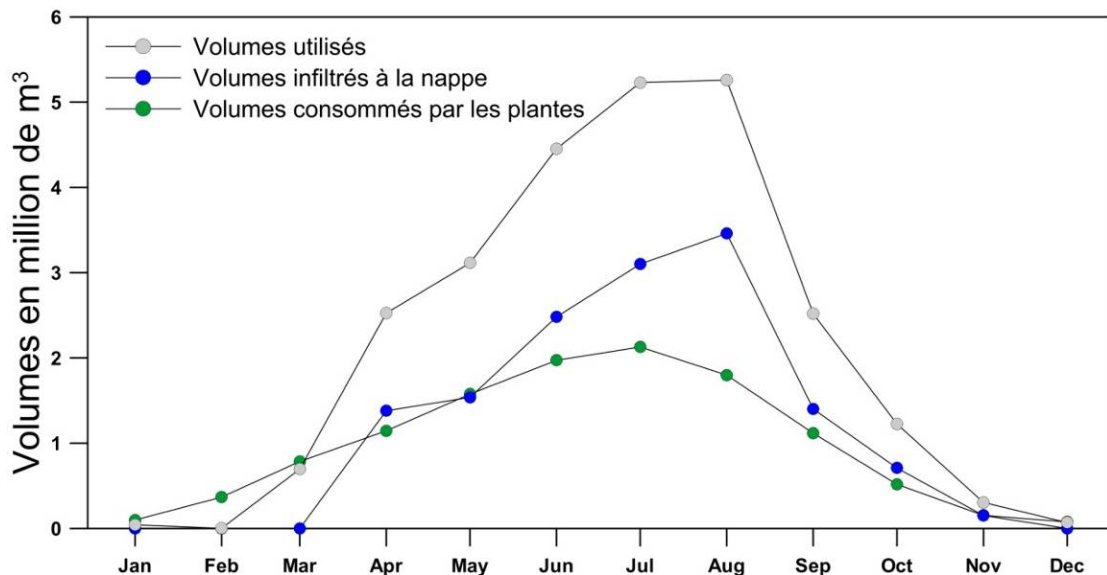


Figure 42. Répartition des volumes d'eau moyens en million m³ dans le périmètre du Canal Crillon sur la période (2000-2011).

Le bilan hydraulique sur le périmètre du Canal Puy et du Canal Hôpital

Les mesures de débits n'existent que pour les volumes entrants sur le Canal Puy (pour l'année 2010) et sur le Canal Hôpital (entre 2004 et 2007). Les volumes sortants ont été estimés à partir des résultats obtenus par une étude réalisée en 2003 par Hydrosol Ingénierie (Hydrosol Ingénierie, 2004) sur une filiole test en supposant que le ratio volumes sortant / volumes entrants reste le même. Ces volumes entrants et sortants ont été utilisés pour calculer les volumes infiltrés sur les périmètres irrigués du Canal Puy et du Canal Hôpital d'après le même principe de calcul utilisé précédemment pour le périmètre du Canal Crillon (**Tableau 6**).

	Surface irriguée (Km ²)	Volumes utilisés (Mm ³)	Volumes consommés par les plantes (Mm ³)	Volumes infiltrés (Mm ³)
Périmètre du Canal Puy	2.76	5.28	3.2	2.08
Périmètre du Canal Hôpital	3.12	5.63	3.6	2.03

Tableau 6. Volumes (en Millions de m³) écoulés et infiltrés sur les périmètres du Canal Puy et du Canal Hôpital.

4. HYDROCHIMIE

4.1. Intérêt de l'approche hydrochimique

4.1.1. Généralités

Dans le milieu naturel, l'eau en nappe libre circule sous l'influence de la gravité au sein des formations géologiques pour se frayer un chemin vers son exutoire. Ce faisant, elle interagit avec les minéraux des roches à travers une série d'équilibres chimiques qui la poussent soit à les dissoudre, soit au contraire à précipiter de nouveaux minéraux à partir de ses éléments dissous.

Le contenu en éléments dissous, obtenu par l'analyse chimique, est la base de l'hydrochimie. En effet, c'est à partir de la composition chimique que nous allons chercher à retracer l'histoire de l'eau. Hors influence anthropique, cette composition chimique constitue la signature d'un environnement naturel incluant les zones de recharges et le réservoir aquifère.

Par exemple, le séjour dans un milieu calcaire chargera l'eau en calcium et en bicarbonate, produits de la dissolution de la calcite. Dans le sol, elle entraînera dans son trajet une partie du CO₂ produit par l'activité biologique. Ainsi, nous pouvons à travers la composition chimique d'une eau caractériser les environnements dans lesquels elle a séjourné.

L'application à l'hydrogéologie consiste à individualiser les signatures des différents réservoirs dans lesquels l'eau a circulé et les mécanismes qui contrôlent leur évolution. Si l'on peut ainsi les distinguer, on pourra reconnaître, à l'exutoire, l'origine et le parcours des eaux qui émergent, même si elles se mélangent entre elles. On peut dire qu'une partie de l'application de l'hydrochimie consiste à faire un traçage naturel des différents milieux. Tout comme on utilise des colorations à partir de produits artificiels, les différentes matrices rocheuses marquent les eaux qu'elles contiennent et l'on peut interpréter les indications obtenues.

De plus, ces traçages naturels donnent des indications sur les temps de résidence de l'eau et sur l'influence plus ou moins grande des niveaux de production. Ces éléments sont particulièrement importants en terme de définition de la vulnérabilité des aquifères étudiés.

4.1.2. Informations apportées par les espèces majeures

4.1.2.1. Le chlorure (Cl⁻)

Les minéraux comportant du chlore en tant que constituant dans leur matrice sont peu nombreux. Il s'agit essentiellement des minéraux évaporitiques (Na Cl, K Cl, Mg Cl...). Ils sont très solubles et nécessitent de très fortes concentrations avant de précipiter (300 g/l par exemple pour Na Cl dans l'eau pure). On en trouve aussi mais avec une solubilité bien moindre dans les roches magmatiques et métamorphiques (feldspath et apatite par exemple).

Les environnements évaporitiques étant très localisés, l'anion Cl^- est souvent d'origine atmosphérique et va évoluer essentiellement sous l'effet d'un processus physique : l'évaporation (ou l'évapotranspiration) qui conduit à une augmentation des concentrations en chlorure. À l'exception de ce phénomène, dans un environnement tel que celui de la plaine d'Avignon, les variations observées ne sont généralement dues qu'à des mélanges ou une variation des teneurs d'entrée du système (pluie, eau de surface), ou apport d'eaux usées (pollution anthropique).

4.1.2.2. Le sodium (Na^+)

Dans le milieu naturel, les variations des teneurs en sodium peuvent être liées soit à des phénomènes d'hydrolyse de minéraux silicatés (feldspath essentiellement) ou dissolution de minéraux évaporitiques (essentiellement la halite et il est alors associé à Cl), soit à des phénomènes d'échange de cation avec la matrice argileuse. Les feuillets argileux contiennent des éléments à charge électrique positive qui peuvent être échangés facilement avec ceux de la phase aqueuse.

4.1.2.3. Les sulfates (SO_4^{2-})

La source principale de sulfate dans le milieu naturel provient des minéraux évaporitiques de type gypse ou anhydrite. Ces minéraux sont communs dans les formations triasiques et certains étages du Tertiaire (Oligocène par exemple).

L'oxydation des sulfates et en particulier de la pyrite peut également constituer une source de sulfates non négligeable. L'influence anthropique peut aussi être importante en zone rurale du fait de l'absence d'assainissement collectif et des traitements phytosanitaires en particulier en domaine viticole.

4.1.2.4. Les espèces du système calco-carbonique

Dans une région entourée de massifs calcaires, comme la plaine d'Avignon, les espèces Ca^{2+} , Mg^{2+} , et HCO_3^- sont quasi exclusivement liées au système carbonaté. Le gaz carbonique dissous par la circulation de l'eau va apparaître dans les analyses chimiques principalement sous forme de bicarbonate et carbonate. Dans les formations carbonatées où on est en présence de dolomies, le système carbonaté est à même de fournir non seulement du calcium (Ca^{2+}) et du bicarbonate (HCO_3^-) mais également du magnésium (Mg^{2+}). Cependant la calcite et la dolomie présentent des solubilités et des cinétiques de dissolution différentes et l'acquisition du magnésium signe généralement des temps d'interaction plus importants.

4.2. Caractérisation de la nappe alluviale de la plaine d'Avignon à partir des éléments chimiques et isotopiques

4.2.1. Distribution géographique de la chimie de l'eau

Dans un premier temps, nous utilisons la carte de la conductivité moyenne afin d'approcher la distribution de la minéralisation de l'eau de la nappe dans l'espace (**Figure 43**). Une relation entre la charge minérale de l'eau et la dynamique de la nappe est mise en évidence. Les fortes conductivités se situent à l'extrémité est avec des valeurs qui varient entre 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans cette zone les isopièzes sont relativement serrées ce qui peut être lié à une faible perméabilité engendrant un contact relativement prolongé entre la nappe et le terrain mais ils peuvent aussi traduire une pente plus forte du substratum. Les plus fortes valeurs de la conductivité pourraient ainsi être aussi liées au ruissellement sur les versants couverts de vignobles. La conductivité diminue nettement plus à l'ouest, dans une zone essentiellement irriguée, avec des valeurs qui varient entre 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'irrigation pratiquée sur ces terrains engendre une recharge vers la nappe et permet de diluer l'eau de la nappe, l'eau de l'irrigation présentant une plus faible conductivité (530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ). Les plus faibles valeurs de la conductivité sont observées au bord de la Durance dont l'eau présente également une faible conductivité (500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ) marquant son influence sur la nappe en cet endroit. La conductivité dans les zones urbaines plus à l'ouest reste relativement faible. La nappe semble être diluée par un écoulement préférentiel en provenance de la Durance, ce que confirme la piézométrie. La conductivité augmente ensuite vers la confluence du Rhône avec la Durance, où les isopièzes plus espacées traduisent un écoulement plus lent et un temps de résidence plus important pour l'eau de la nappe mais peut être aussi une absence d'alimentation depuis la Durance.

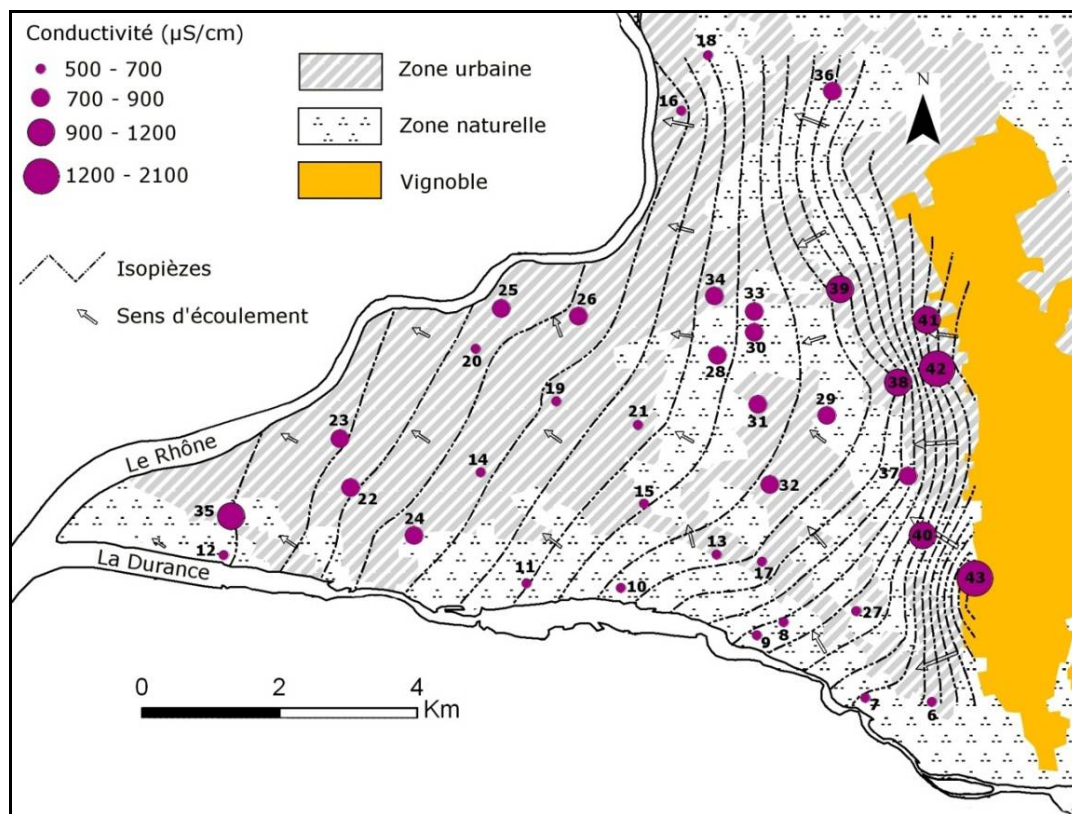


Figure 43. Carte des isopièzes avec les valeurs de la conductivité moyenne de la nappe (2010-2011) ; la taille du point représente la conductivité et le chiffre représente le numéro du point de prélèvement.

Si on considère l'ensemble des analyses acquises pendant la période de suivi mensuel, on n'observe pas d'évolution temporelle notable. Par contre, les teneurs en éléments majeurs varient dans l'espace et individualisent globalement les mêmes zones que la carte de la conductivité avec des concentrations plus fortes dans la zone amont (en amont de la zone irriguée); elles diminuent ensuite vers l'ouest en passant par la zone irriguée et puis une zone urbaine suivant le sens général d'écoulement de la nappe (**Figure 44**). Tous les éléments n'évoluent cependant pas de la même façon. Au bord de la Durance (zone Durance), l'eau de la nappe subit les effets de la dilution par les apports du cours d'eau et on observe les concentrations les plus faibles pour tous les éléments. Une diminution assez régulière des teneurs en Ca^{2+} et HCO_3^- de l'amont vers l'aval avec une évolution inverse du pH est observée et semble surtout commandée par la pCO_2 . On peut noter une évolution légèrement différente entre Ca^{2+} et HCO_3^- dans la zone irriguée, mais une interprétation plus fine ne pourra être réalisée qu'après avoir déterminé les Indices de Saturation, en particulier vis-à-vis de la calcite. Les autres éléments, Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et Cl^- sont relativement plus élevés dans la zone de recharge amont et varient ensuite assez peu dans la plaine.

La distribution des paramètres physico-chimiques est moins nette. On observe cependant, une température relativement basse en amont et dans la zone de Durance. Dans les zones irriguées on trouve généralement des teneurs plus élevées en oxygène dissous. L'élément NO_3^- relativement élevé dans la zone amont, conserve des concentrations significatives dans la zone irriguée. Elles baissent en s'éloignant vers les zones urbaines et deviennent fortement diluées par les eaux de la Durance.

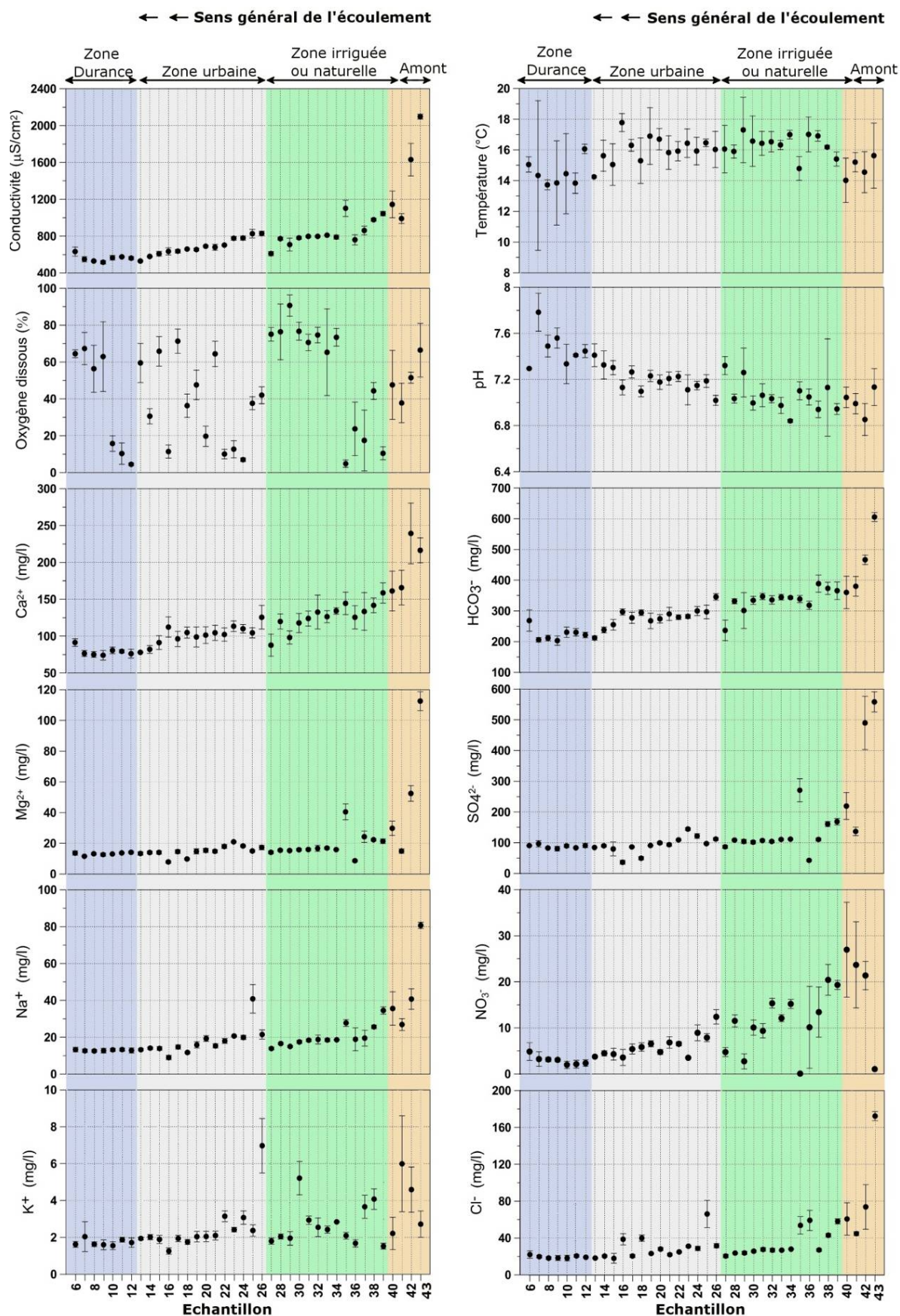


Figure 44. L'évolution spatiale des éléments chimiques et des paramètres physico-chimiques et leurs écarts type.

En reportant sur des histogrammes de fréquences les différents éléments chimiques et les paramètres physico-chimiques, une distribution spatiale de la concentration des points analysés, par rapport aux 4 zones préalablement définies, peut être obtenue (**Figure 45**).

Cette approche confirme et précise les observations précédentes :

- Les plus faibles teneurs en ions majeurs pour l'ensemble des points se situent près de la Durance qui a aussi des faibles teneurs.
- La zone amont du secteur irrigué s'individualise aussi assez bien avec de plus fortes teneurs pour l'ensemble des ions, à l'exception de K^+ . Un point se distingue des autres, il s'agit du puits (point 43) localisé dans une vigne à la limite est de la nappe alluviale qui présente à la fois de fortes teneurs en sulfate et chlorure et une très faible teneur en nitrate.
- Les deux zones intermédiaires (zone urbaine dense et zone irriguée) sont essentiellement différenciées par des concentrations moyennes et décroissantes en Ca^{2+} , HCO_3^{2-} et NO_3^- .

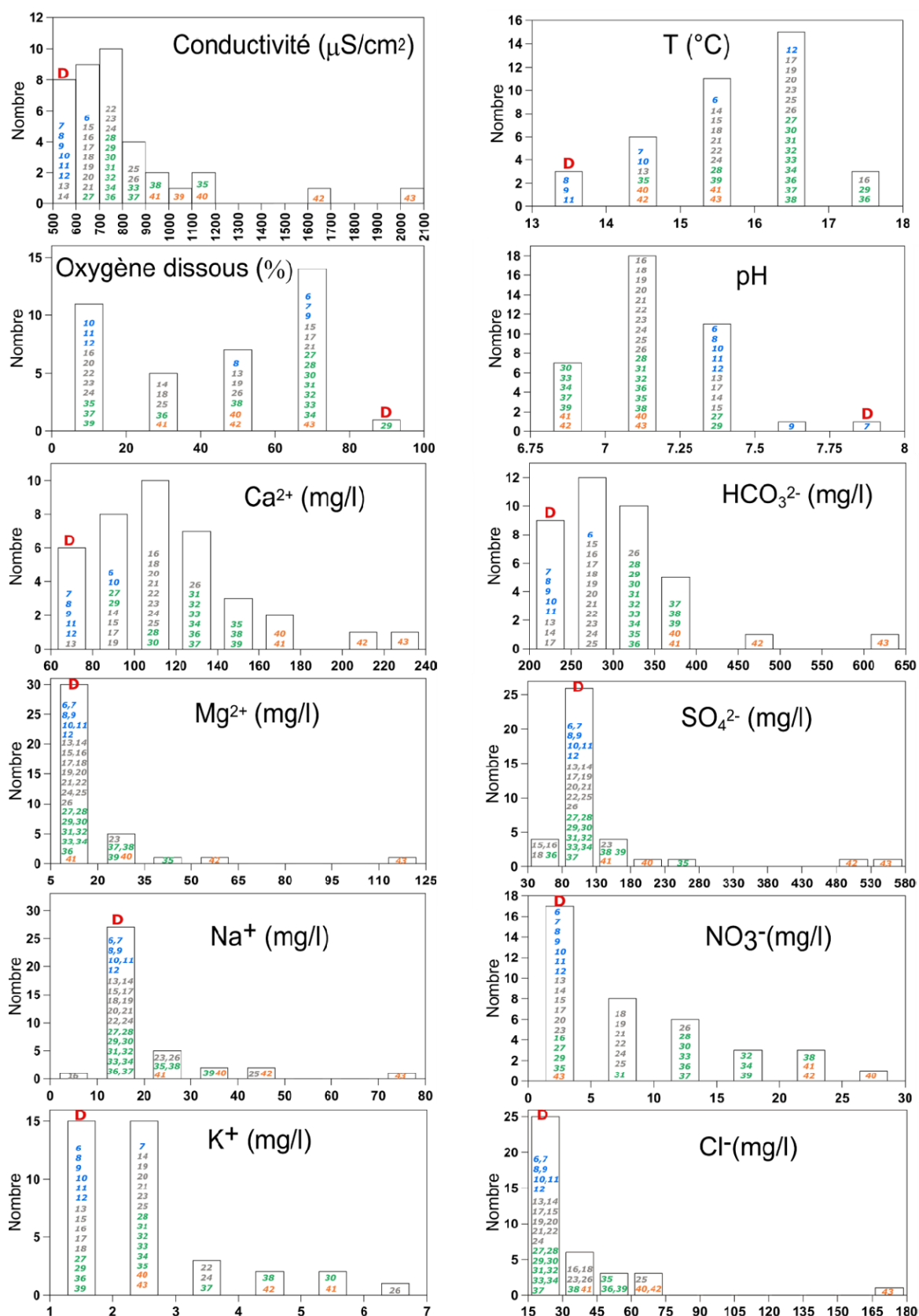


Figure 45. Histogrammes de fréquence des éléments chimiques et des paramètres physico-chimiques moyens de la nappe. Les couleurs représentent la localisation géographique des échantillons où : bleu représente la zone proche de la Durance, gris est la zone essentiellement urbaine, vert est la zone essentiellement irriguée et orange est la zone amont à l'est. L'eau de la Durance est représentée par la lettre D de couleur rouge.

4.2.2. Faciès chimique des eaux

Les analyses des ions majeurs des eaux de surface et des eaux souterraines sont représentées dans un diagramme de Piper. Cette dernière reflète ainsi l'occupation du sol et les écoulements de la nappe qui se fait à partir de la zone amont à l'est vers la zone urbaine dense à l'ouest.

Les eaux de surface (le Rhône, la Durance et les canaux d'irrigation) sont toutes de type bicarbonaté calcique et la Durance et ses canaux sont très près l'un de l'autre sur le diagramme, ce qui est logique. Par contre, le Rhône apparaît légèrement plus bicarbonaté calcique que la Durance (**Figure 46**). Les différences entre le Rhône et la Durance sont plus nettes pour les ions Mg^{2+} et SO_4^{2-} , la Durance étant relativement plus concentrée que le Rhône pour ces éléments. Ces différences peuvent provenir de la nature des terrains traversés par les deux fleuves et leurs affluents. Des terrains dolomitiques et des terrains gypseux sont probablement à l'origine des teneurs en Mg^{2+} et SO_4^{2-} de la Durance. D'un autre côté, le nitrate apparaît plus concentré dans le Rhône.

Les eaux de la nappe sont calciques, la majorité des points sont concentrés vers le pôle Ca^{2+} (**Figure 47**). Du côté anions, les eaux sont surtout bicarbonatées mais quelques-unes d'entre elles tendent vers le pôle sulfate, il s'agit des points : 43, 42, 40 et 35.

Les cations suivent généralement l'ordre de décroissance $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$ avec une dominance pour le Ca^{2+} . Concernant les anions, HCO_3^- est dominant par rapport aux autres anions $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$. Le fait que Ca^{2+} et HCO_3^- dominent suggère que la mise en solution des minéraux carbonatés est le processus dominant de la minéralisation des eaux.

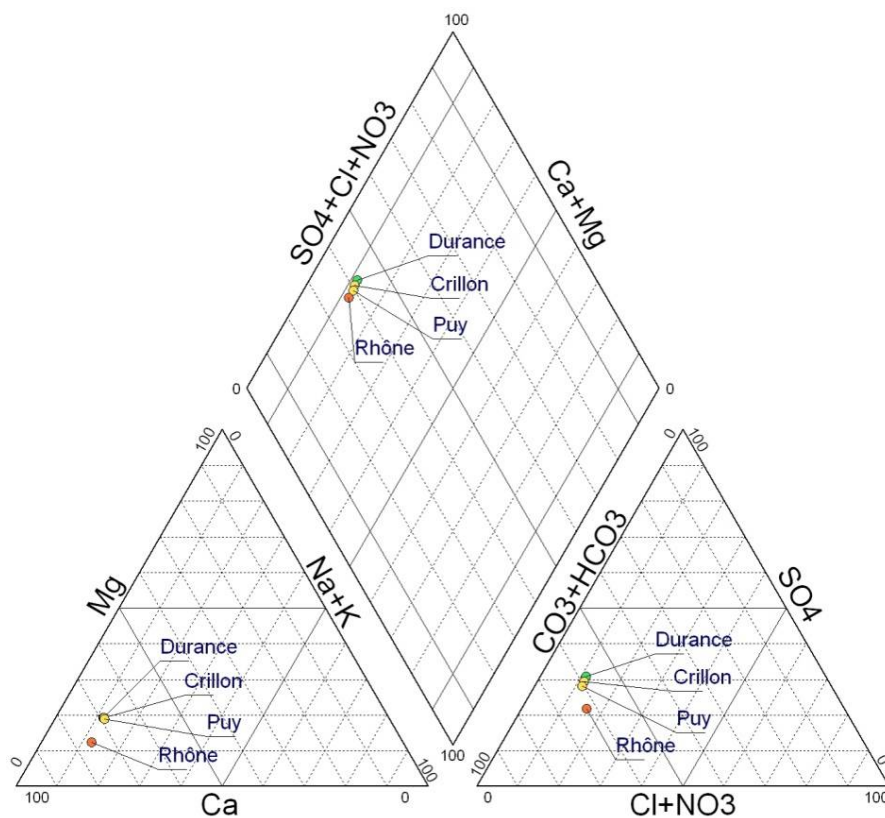


Figure 46. Diagramme de Piper pour les eaux de surface fait avec le logiciel Diagramme de R. Simler.

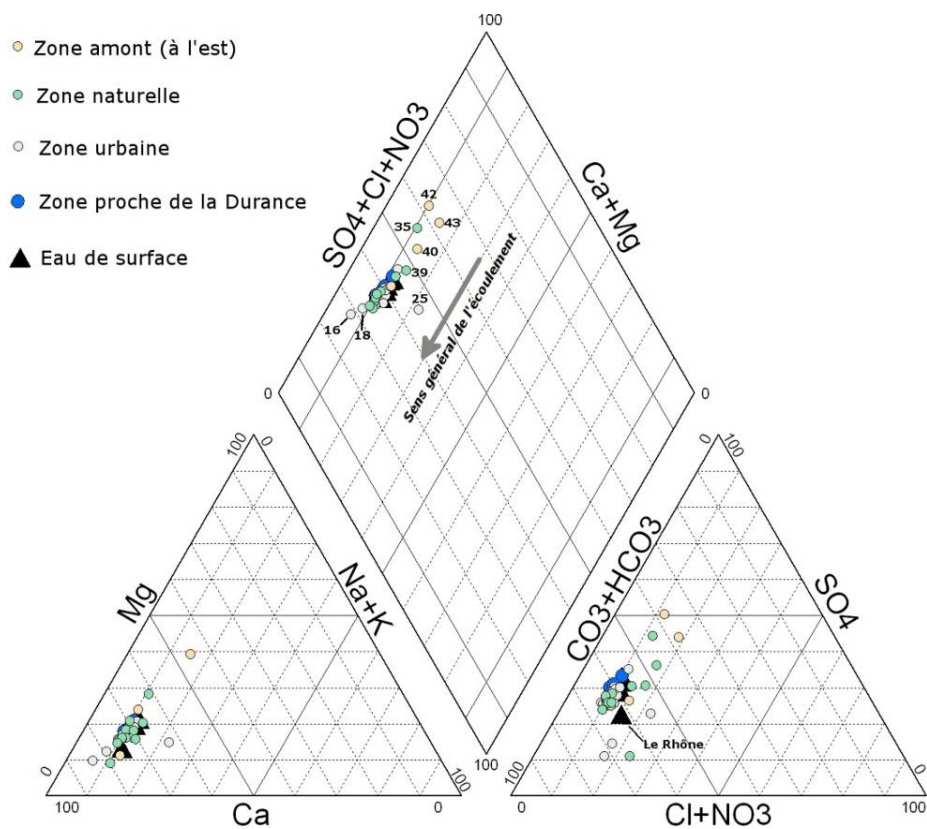


Figure 47. Diagramme de Piper pour l'eau de la nappe fait avec le logiciel Diagramme de R. Simler.

4.2.3. Analyses en Composantes Principales

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les variables suivantes : pH, conductivité et ions majeurs. Les deux axes factoriels 1 et 2 expliquent environ 86% de la variance des données. En particulier, le premier axe explique près de 68%, soit la majorité de la variance des données (**Figure 48**).

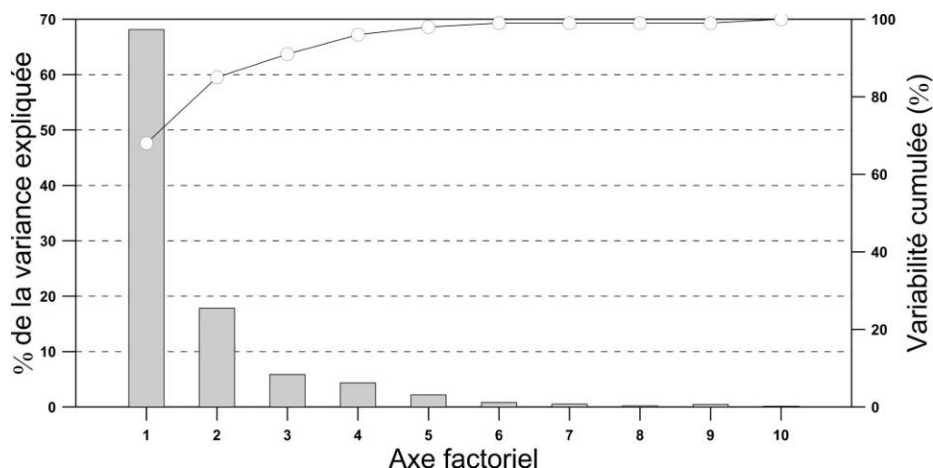


Figure 48. Pourcentage de variance expliquée en fonction des axes factoriels.

L'analyse en composantes principales des axes 1 et 2 (**Figure 49**) montre que la conductivité est classiquement corrélée positivement avec l'ensemble des ions majeurs. Elle met en évidence la forte corrélation entre Ca^{2+} et HCO_3^- qui correspond au faciès carbonaté calcique des eaux. On constate aussi un petit groupe formé de K^+ et NO_3^- qui semble indépendant du pH.

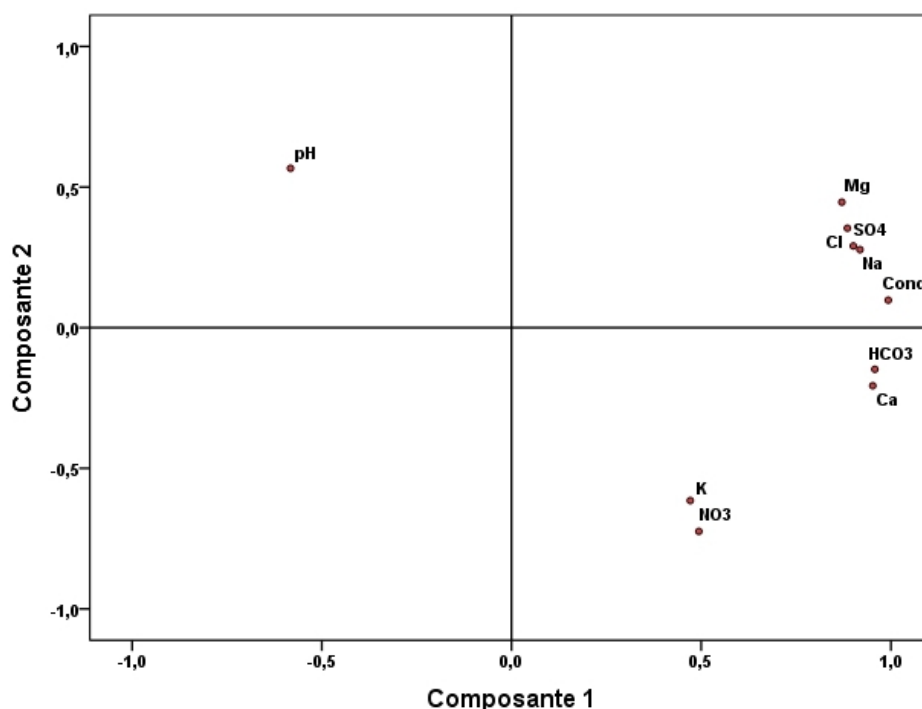


Figure 49. Analyse en Composantes Principales (ACP) pour les données de 2010 et 2011.

4.2.4. Relation inter-éléments

La majorité des éléments sont bien corrélés entre eux et la conductivité est très bien corrélée aux ions HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} (>0.9) (**Tableau 7**). Ces fortes corrélations indiquent que ces différents paramètres ont tendance à évoluer concomitamment, soit parce qu'ils sont issus des sources communes, soit parce qu'ils sont influencés par des processus de dilution ou d'évaporation. Les variations de concentration des ions dissous sont entièrement ou en partie en relation avec des variations de teneurs de ces différents ions. Ca^{2+} est généralement bien corrélé avec tous les ions et surtout avec HCO_3^- et SO_4^{2-} (>0.8). HCO_3^- est bien corrélé aux cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ (>0.75). Cl^- est très bien corrélé avec Na^+ et très peu corrélé avec NO_3^- (0.2). Le pH est inversement corrélé aux autres variables notamment les bicarbonates et Ca^{2+} .

Dans le contexte de la plaine d'Avignon, il semble que l'on puisse évoquer deux processus majeurs : minéralisation progressive le long des axes d'écoulement et surtout influence des dilutions par les eaux de la Durance, directement ou via l'irrigation.

Variable	pH	Conductivité	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
pH	1									
Conductivité	-0.52	1								
HCO_3^-	-0.71	0.93	1							
Cl^-	-0.34	0.91	0.82	1						
NO_3^-	-0.66	0.38	0.49	0.16	1					
SO_4^{2-}	-0.31	0.94	0.79	0.82	0.21	1				
Na^+	-0.36	0.93	0.83	0.95	0.26	0.86	1			
K^+	-0.47	0.35	0.46	0.14	0.53	0.26	0.24	1		
Mg^{2+}	-0.24	0.91	0.79	0.89	0.03	0.94	0.90	0.17	1	
Ca^{2+}	-0.73	0.93	0.93	0.76	0.62	0.83	0.78	0.47	0.72	1

Tableau 7. Matrice de corrélation du pH, de la conductivité et des ions majeurs de la nappe.

Dans le détail, les ions Ca^{2+} et HCO_3^- sont les ions les plus abondants dans l'eau résultant de l'altération des minéraux carbonatés. Par ailleurs, les rapports $\text{HCO}_3^- / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ montrent que les eaux de la nappe ainsi que l'eau de la Durance présentent un excès en $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ (**Figure 50**). Ceci indique d'autres sources pour la minéralisation en plus de l'altération des minéraux carbonatés. Les concentrations en sulfates sont généralement moyennes et peuvent compenser la majorité d'excès en alcalino-terreux par rapport aux bicarbonates.

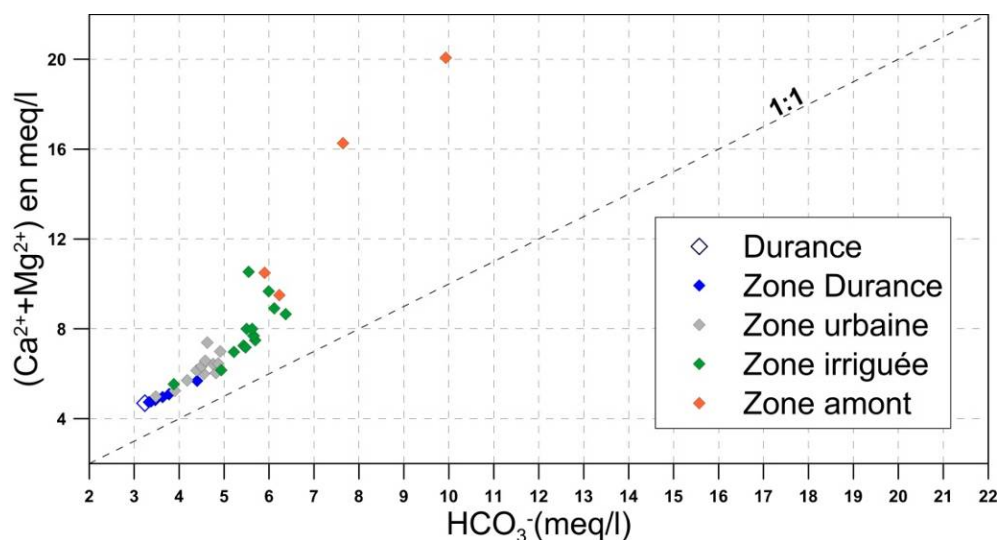
La **Figure 51** montre que dans la totalité des eaux de la nappe, les rapports $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ sont très proches de 1. Les teneurs de sulfates peuvent provenir de la dissolution de gypse, de la concentration par évaporation ou de pollutions éventuelles.

Le rapport HCO_3^- / Σ anions permet de distinguer les réactions d'altération des apports d'ions dissous issus de la surface au niveau des zones de recharge (Griffioen, 2004). 91% des échantillons ont des rapports supérieurs à 0.5, soit des teneurs en HCO_3^- supérieures à 50% de

la somme des anions. 4 échantillons ont des rapports inférieurs à 0.5, il s'agit des échantillons N° 35, 40, 42 et 43. Ces échantillons ont par contre un excès en sulfate par rapport à la somme d'anions ce qui indique une pollution à partir de la surface. En effet, les échantillons N° 40, 42 et 43 sont situés en amont de la zone d'étude vers la colline de Morières où se trouvent des champs de vignes traité au sulfate. Quant au point 35, il se situe en aval d'une décharge industrielle.

Les eaux de la nappe sortant de la zone amont et la zone irriguée sont relativement les plus abondantes en Ca^{2+} et HCO_3^- par rapport aux eaux de la zone urbaine et la zone Durance (**Figure 52**). Cette différence est due à l'augmentation de HCO_3^- résultant de la mise en solution le CO_2 en eau qui s'infiltré à partir des surfaces naturelles et irriguées, ce qui conduit à l'acidification (baisse du pH). En effet, la nappe dans la zone amont et irriguée présente généralement des valeurs de pH les plus faible (**Figure 53** et **Figure 54**).

Il y a une bonne corrélation entre Na et Cl. La plupart des points de prélèvements sont presque alignés sur la droite (1 :1). Cependant, quelques points présentent un excès en chlorure (**Figure 55**). Il s'agit surtout des points situés en amont qui présentent une plus forte conductivité (**Figure 56**). Trois points possèdent des rapports faibles de Na/Cl et des valeurs faibles de conductivité. Ceci peut être dû à l'échange cationique.



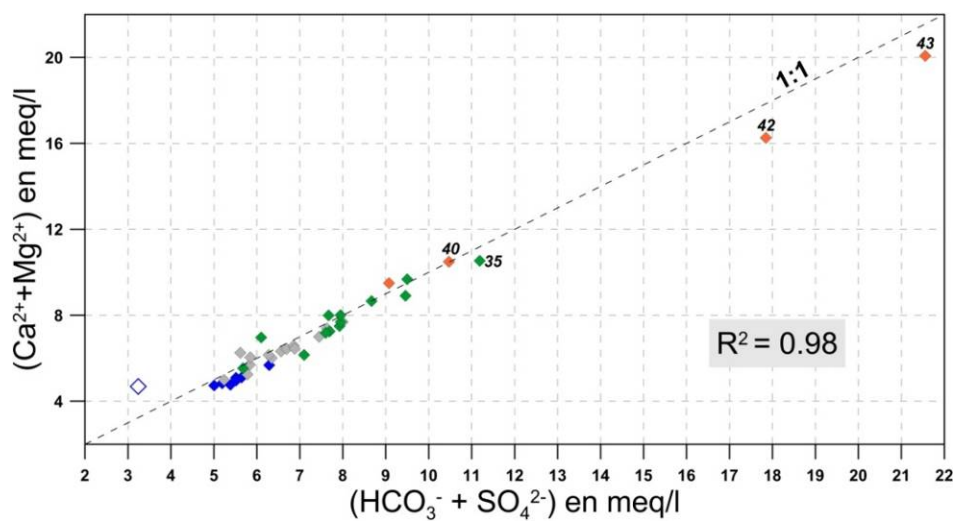


Figure 51. Relation entre $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ et $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$.

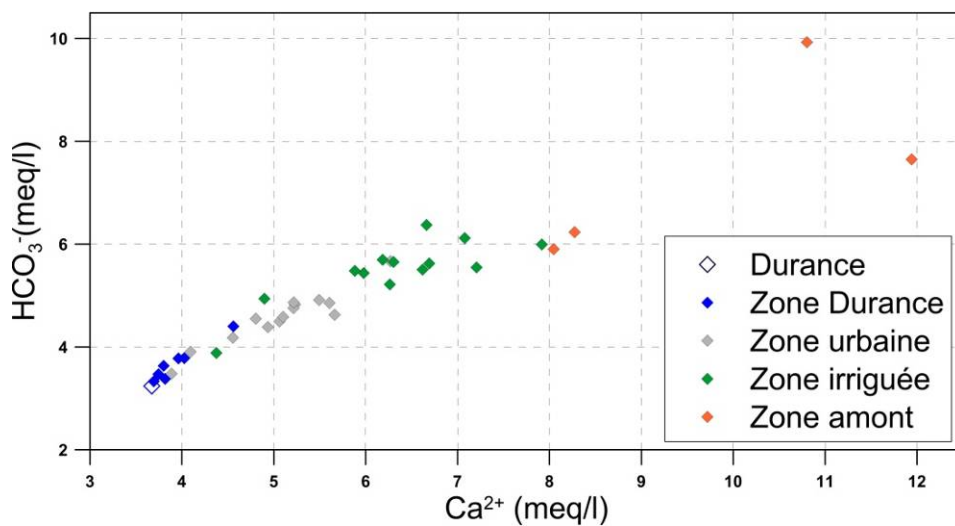


Figure 52. Relation entre HCO_3^- et Ca^{2+} .

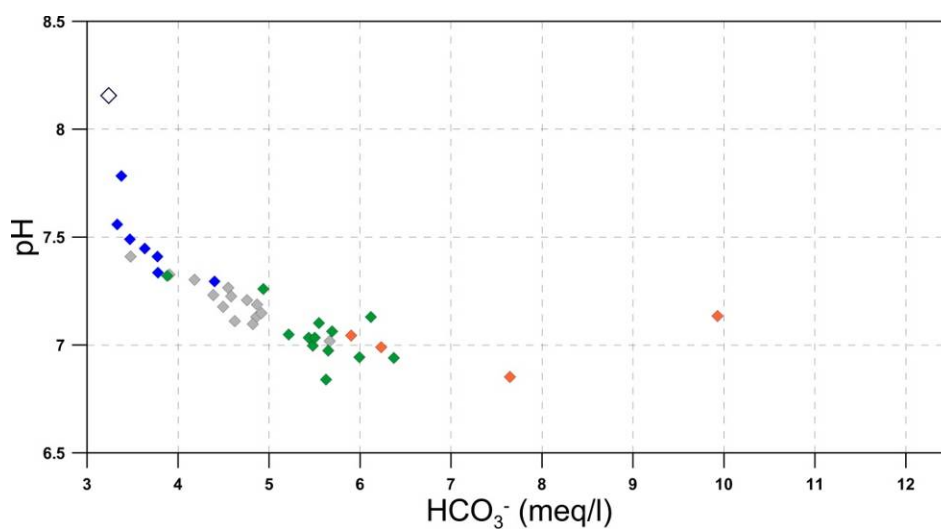
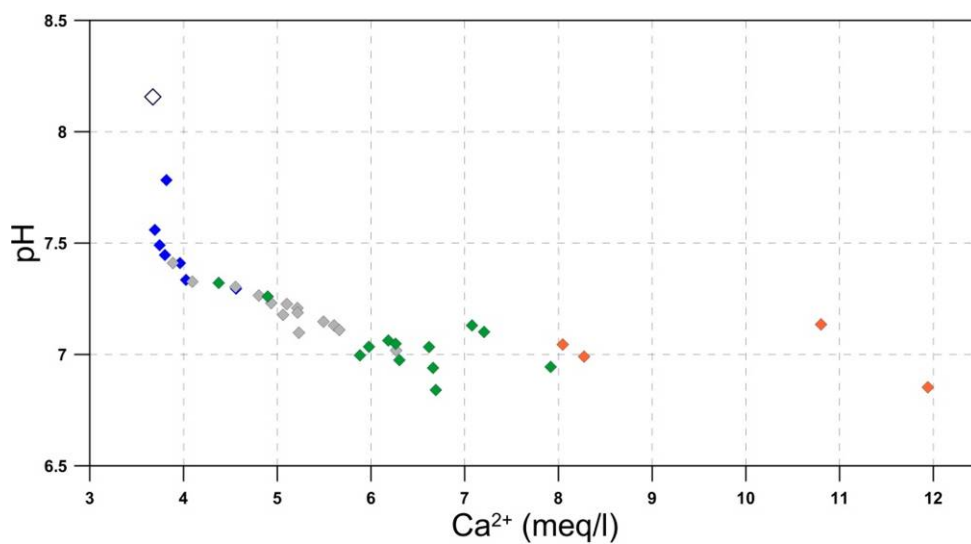
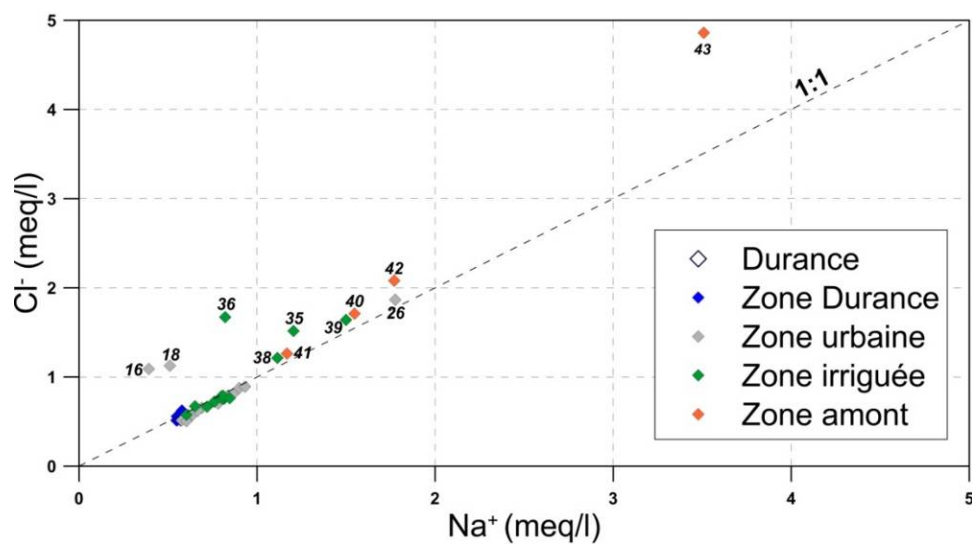
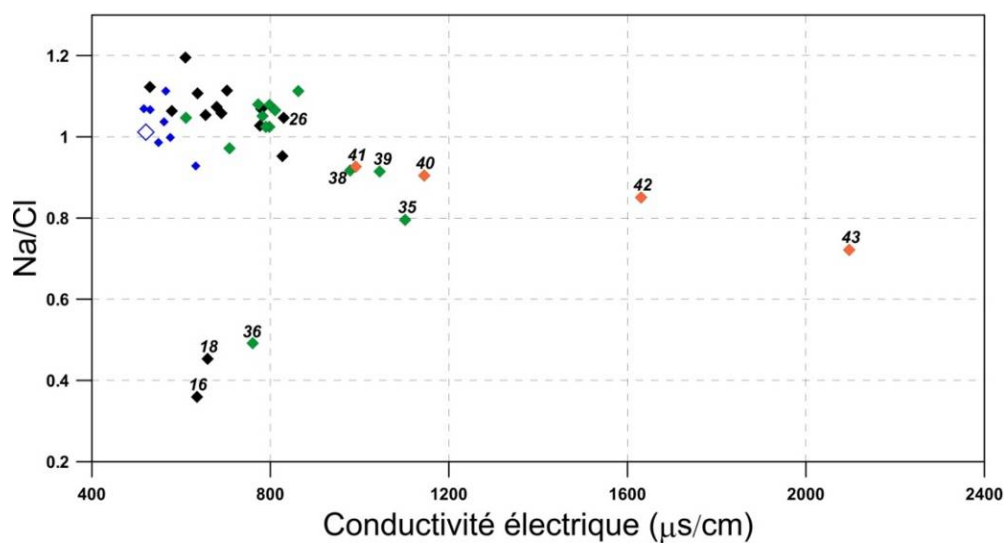


Figure 53. Relation entre pH et HCO_3^- .

Figure 54. Relation entre pH et Ca^{2+} .Figure 55. Relation entre Cl^- et Na^+ .Figure 56. Relation entre Na/Cl et la conductivité électrique.

4.2.5. Indices de Saturation (IS)

Différents indices de saturation (IS) ont été calculés afin de déterminer la balance chimique entre la phase solide et les minéraux dissous (**Tableau 8**).

N°	Période de basses eaux (février 2011)			Période de hautes eaux (juillet 2011)		
	IS Calcite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Calcite	IS Dolomite	IS Gypse
2 (Durance)	0.66	0.62	-1.54	0.86	1.4	-1.6
6	-0.01	-0.67	-1.56	0.09	-0.42	-1.54
7	0.1	-0.5	-1.59	0.56	0.52	-1.51
8	0.06	-0.46	-1.62	0.11	-0.34	-1.65
9	0.14	-0.35	-1.61	0.14	-0.27	-1.58
11	0.02	-0.56	-1.6	0.00	-0.58	-1.62
14	-0.02	-0.62	-1.57	0.02	-0.5	-1.62
15	-0.03	-0.72	-1.58	0.04	-0.52	-1.57
16	-0.06	-1.06	-1.8	0.02	-0.84	-1.93
17	-0.02	-0.65	-1.57	0.08	-0.42	-1.57
18	-0.08	-1.03	-1.78	-0.07	-0.93	-1.69
19	-0.03	-0.7	-1.53	-0.03	-0.61	-1.57
20	-0.04	-0.68	-1.48	0.01	-0.55	-1.53
21	-0.02	-0.7	-1.52	0.07	-0.47	-1.52
22	0.02	-0.51	-1.44	0.02	-0.5	-1.47
24	-0.03	-0.64	-1.35	0.02	-0.49	-1.4
25	0.06	-0.5	-1.49	-0.02	-0.64	-1.54
26	-0.01	-0.69	-1.35	-0.03	-0.69	-1.44
27	-0.02	-0.67	-1.56	0.14	-0.27	-1.54
28	0.01	-0.68	-1.37	-0.01	-0.67	-1.43
30	-0.15	-0.98	-1.37	-0.03	-0.69	-1.45
31	-0.03	-0.74	-1.4	0.07	-0.52	-1.4
33	-0.15	-0.98	-1.35	-0.04	-0.72	-1.41
34	-0.15	-0.98	-1.37	0.01	-0.64	-1.41
35	0.08	-0.17	-0.96	0.06	-0.24	-1.11
36	0.00	-0.97	-1.79	-0.04	-0.99	-1.82
37	-0.17	-0.87	-1.39	0.06	-0.39	-1.44
38	-0.15	0.9	-1.19	0.14	-0.3	-1.23
39	0.04	-0.57	-1.11	-0.01	-0.66	-1.19
40	0.22	-0.12	-0.99	0.03	-0.47	-1.23
41	-0.01	-0.88	-1.24	0.03	-0.75	-1.29
43	0.35	0.58	-0.71	0.48	0.91	-0.75

Tableau 8. Calcul de l'indice de saturation à la Calcite, la Dolomite et le Gypse.

L'Indice de Saturation (IS) calculé vis-à-vis de la Calcite était positif pour l'eau de la Durance, l'eau de la nappe au bord de la Durance (zone Durance) et l'eau de la zone amont ce qui indique une tendance de la Calcite de ces eaux à précipiter. Une augmentation relative de (IS)

Calcite est observé en période de hautes eaux (juillet 2011) pour la plupart des eaux de la nappe par rapport à la période de basses eaux (février 2011). La nappe est sous-saturée par rapport à la dolomite et le gypse, sauf le point de prélèvement N° 43 qui est sursaturé en dolomite.

Conclusion :

En dehors de la zone amont agricole fortement influencée par la recharge issue des ruissellements sur les versants agricoles (collines de Saint Saturnin/Morières), l'eau de la nappe est essentiellement marquée par les entrées de la Durance, directes ou via l'irrigation, dans la zone plus en aval, qui imposent leur signature chimique dominée par le système $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$, mais influencée par la dissolution des évaporites en amont du cours de la Durance. L'évolution dans la nappe, surtout marquée dans la zone irriguée, est contrôlée par la Pco_2 , comme le montre la stabilité du pH et de HCO_3^- et la baisse des teneurs en Ca^{2+} dans des eaux saturées en calcite.

4.3. Les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$)

4.3.1. Généralités

Les isotopes stables (^{16}O et ^1H) et lourds (^{18}O et ^2H) sont les isotopes environnementaux les plus utilisés en hydrogéologie.

L'abondance en ces isotopes s'exprime par le rapport R entre l'isotope lourd sur l'isotope léger (ex : $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) et la composition isotopique est exprimée en δ ‰ par rapport à un standard d'une composition connue :

$$\delta \text{ ‰} = \left(\frac{R_x}{R_s} - 1 \right) \times 1000$$

Où les indices x et s font référence respectivement à l'échantillon et au standard. Pour les isotopes de la molécule d'eau, le standard de référence est le VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) de rapport $\delta \text{ ‰} = 0 \text{ ‰}$ par définition (Coplen, T.B, 1996).

Sous des conditions normales de température dans le cycle de l'eau, la modification des rapports isotopiques, encore appelée « fractionnement », intervient essentiellement lors des changements de phase, principalement lors des phénomènes de condensation ou d'évaporation. Pendant les changements de phases, les taux de diffusion sont différents à cause de la différence de la force de liaisons entre les isotopes légers et les lourds de la molécule d'eau.

Les liaisons moléculaires entre les isotopes légers (H_2^{16}O) sont plus faciles à casser que celles des isotopes lourds (H_2^{18}O) ce qui résulte en évaporation supérieure pour les isotopes légers. Par exemple, lorsque l'eau s'évapore à partir de l'océan, la vapeur devient appauvrie en isotopes lourds (ou enrichie en isotopes légers) par rapport à l'eau de l'océan (**Figure 57**).

Par contre, lorsque la vapeur d'eau se condense pour former les précipitations (pluie ou neige), les isotopes lourds ont tendance à passer préférentiellement dans la phase liquide, qui va être enrichie en isotopes lourds par rapport à la vapeur d'eau résiduelle.

Les phases de condensation successives, dont l'intensité est commandée par les baisses de température, appauvrissent la composition isotopique de la vapeur des nuages et donc par voie de conséquence la composition isotopique des précipitations. Il existe ainsi un lien étroit entre température et variation isotopique (Dansgaard, 1964).

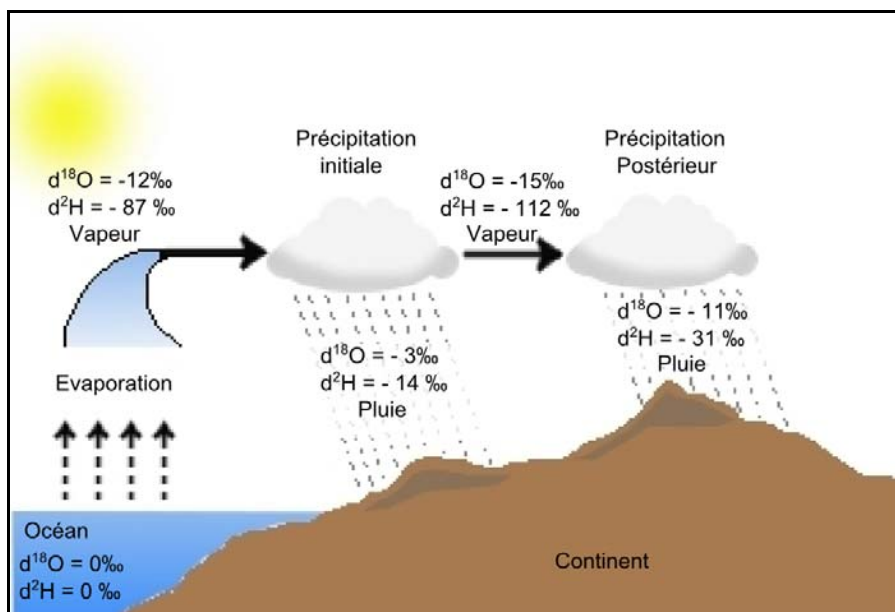


Figure 57. L'effet des changements de phase et des précipitations sur les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de la molécule d'eau. (Basé sur (Coplen, T.B et al., 2000 ; Hoefs, J, 1997).

Le degré d'appauvrissement est ainsi souvent associé à des paramètres géographiques ou saisonniers :

L'effet de latitude est associé aux circulations atmosphériques générales et les basses températures en hautes latitudes (Yurtsever, Y et Gat, J.R, 1981).

L'effet de l'altitude est très important en région montagneuse. De manière systématique la composition isotopique des précipitations devient de plus en plus appauvrie en ^{18}O et ^2H lorsque les masses nuageuses s'élèvent accompagnées de précipitations plus intenses.

Pour ^{18}O il varie entre -0.15 et -0.5‰ pour une augmentation de 100m de l'altitude et entre -1 et -4‰ pour le ^2H (Clark I.D et Fritz P, 1997). Ceci a rendu possible une des applications les plus utilisés en hydrologie isotopique, à savoir, identifier l'altitude des aires de recharge des eaux souterraines (Travi, 2008).

L'effet saisonnier est directement lié aux variations saisonnières de température (Fricke et O'Neil, 1999 ; Yurtsever, Y, 1975). Ainsi en Europe, les pluies d'hiver sont plus négatives que celles d'été.

L'effet continental qui correspond à l'effet de la distance à partir de la côte, est difficilement observable et son importance dépend probablement plus de la direction dominante des masses d'air que simplement de la distance à l'Océan. Celle et al. (2000) ont examiné la typologie de 118 événements pluvieux qui affectent les régions de méditerranée occidentale, et mis en évidence que les masses d'air générées par l'atlantique du nord et celles de la méditerranée ont des compositions isotopiques et quantités de pluie très différentes.

Les évènements pluvieux de l'Atlantique nord ont un effet continental très fort vu que les masses d'air passent au-dessus de l'Espagne avant d'arriver sur les stations de mesures situées à la côte occidentale de la méditerranée.

En zone méditerranéenne, les faibles précipitations sont souvent isotopiquement enrichies par rapport aux fortes précipitations à la même époque. Cet effet est dû à l'évaporation et l'échange isotopique entre les gouttes de la pluie descendante avec l'humidité atmosphérique qui joue un rôle majeur dans le cas de faible pluie (Dansgaard, 1964).

Les teneurs en deutérium ^2H des précipitations à l'échelle globale sont liées aux teneurs en oxygène-18 par la relation suivante, couramment appelée la droite météorique mondiale (GMWL) et établie par Craig (1961) :

$$\delta^{10}\text{H} = 8 \times \delta^{10}\text{O} + 10$$

Cette droite a été établie à partir de 400 échantillons environ représentant l'eau non évaporée des précipitations, des rivières et lacs de différents pays (**Figure 58**). Elle met en évidence l'évolution commune des deux isotopes lors de la condensation et les conditions d'évaporation océaniques (excès en deutérium). Très souvent utilisée comme référence, elle a été précisée à partir des mesures effectuées sur le réseau de l'AIEA (GNIP), (Rozanski et al., 1993) (**Figure 59**).

Les droites météoriques locales (LMWL), basées sur des mesures des précipitations locales, sont très utiles dans des multiples applications. Elles reflètent les variations climatiques et les effets d'évaporation. Les déviations entre la droite météorique mondiale (GMWL) et la droite météorique locale (LMWL) sont généralement liées aux conditions variables des sources de vapeur (excès en deutérium) et à l'évaporation (pente de la droite).

Comme indiqué précédemment, les variations des compositions isotopiques de l'eau dans le cycle hydrologique résultent essentiellement des changements de phase (évaporation, condensation). Une fois que l'eau s'est infiltrée et se trouve hors influence de l'évaporation, les isotopes stables de l'eau sont conservatifs et leur évolution traduit des mélanges. Il s'ensuit que la composition isotopique d'un mélange d'eaux issues de deux sources différentes dépend seulement des proportions de ces deux sources qui ont conservé leurs empreintes de leur origine. Cette spécificité des isotopes stables de l'eau est utilisée dans le but d'identifier l'origine spatio-temporelle des eaux souterraines et éventuellement leurs proportions de mélange (Fontes, 1980).

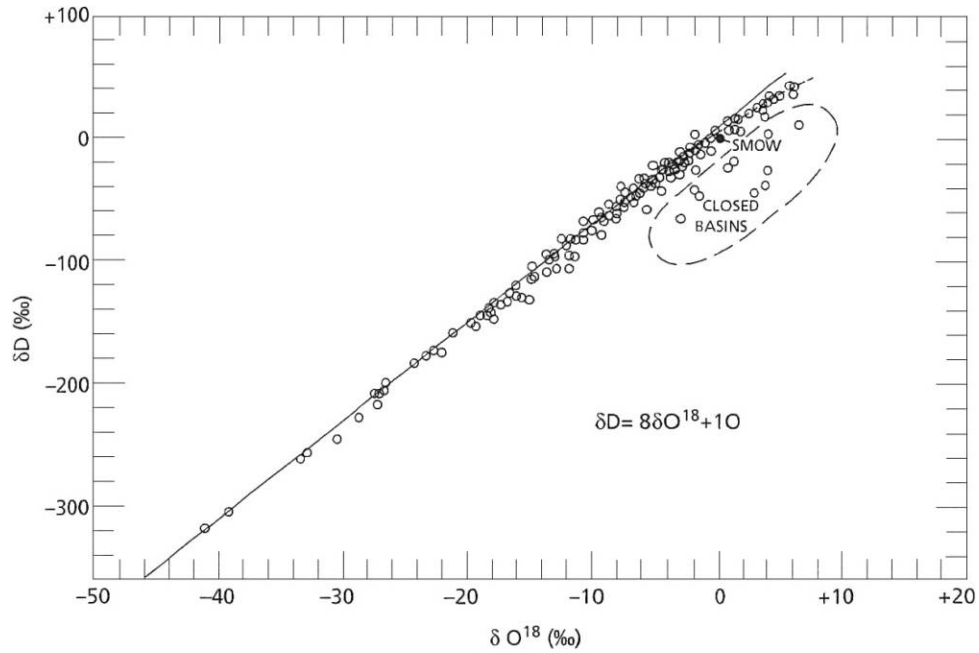


Figure 58. Relation météorologique globale entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de la pluie, neige, rivières et lacs (Craig, 1961). D'après (Mc Guire et Mc Donnell, 2008).

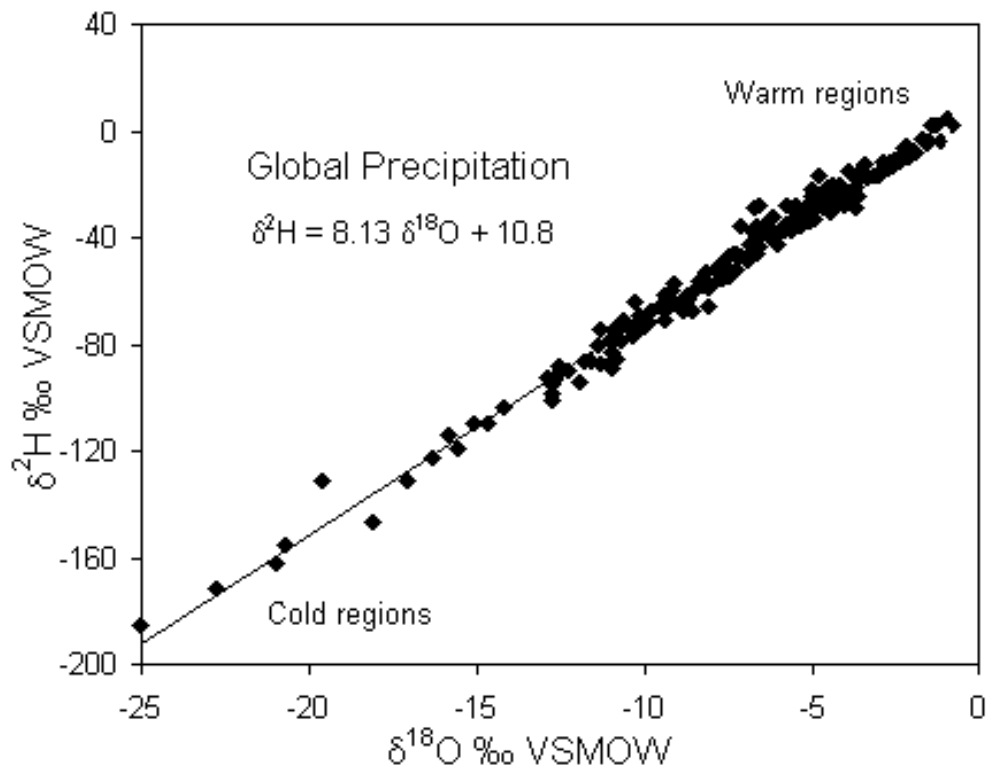


Figure 59. Relation ^{18}O et ^2H dans les précipitations. Moyennes annuelles pondérées pour les précipitations du réseau AIEA (GNIP) Rozanski et al. (1993).

Les précipitations et l'eau de l'irrigation/eau de la Durance, constituent les entrées de l'aquifère alluvial d'Avignon. L'étude de leurs teneurs isotopiques est donc fondamentale pour interpréter leur devenir dans les eaux souterraines.

4.3.2. Signal pluie

À partir de 1997, un suivi mensuel des précipitations a été mis en place au niveau de la faculté des sciences au centre-ville d'Avignon. Un échantillon d'eau est prélevé à la fin du mois, sur la globalité de la pluie, en vue d'une analyse isotopique.

La teneur isotopique mensuelle des pluies varie entre 0.6 et -14.87 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ et entre 5.7 et -105 ‰ $\delta^2\text{H}$ (**Figure 60**). La valeur moyenne pondérée par les hauteurs de la pluie collectée entre 1997 et 2011 est de -6.5 pour l'oxygène 18 et -42 pour le deutérium. Les valeurs de deutérium sont corrélées linéairement aux valeurs de l'oxygène-18. La droite météorique locale (LMWL) définie pour l'ensemble des valeurs moyennes mensuelles pour la période 1997-2011 est donnée par l'équation : $\delta^2\text{H}=7.22\delta^{18}\text{O} + 3.91$ avec une pente plus faible par rapport à la pente de 8 de la droite météorique mondiale définie par Craig (1961). Celle et al. (2000) avaient établi une droite météorique locale pour Avignon en utilisant les valeurs mensuelles mesurées en 1997-1998 : $\delta^2\text{H}=7.6\delta^{18}\text{O} + 6.4$. La différence entre la pente de la droite météorique locale et de la droite météorique mondiale peut être expliquée par l'évaporation des gouttes de pluie en cours de chute notamment lors des pluies estivales (Celle et al., 2000) ou l'évaporation dans ce collecteur lorsque l'échantillon n'a pu être recueilli immédiatement après la pluie. En effet, la période d'été est caractérisée par une évaporation intense ce qui rend possible une évaporation secondaire de la pluie. Cela peut être plus marqué pour des pluies de faible quantité.

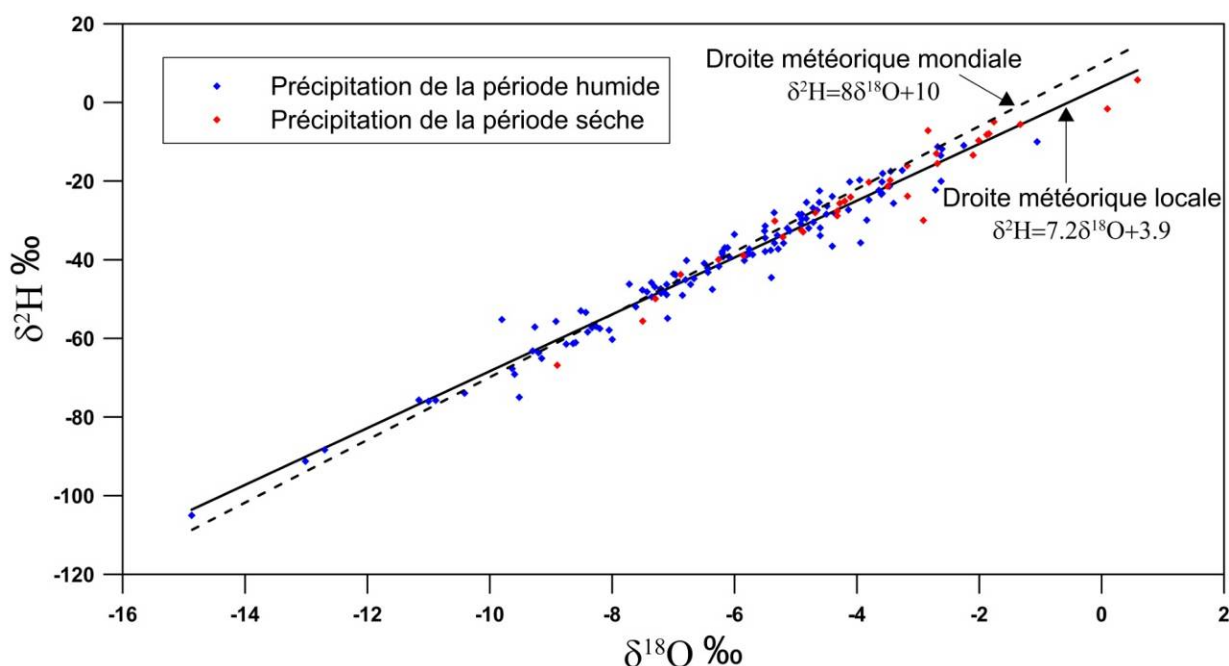


Figure 60. La teneur isotopique des précipitations des périodes humides (mois : 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12) et des périodes sèches (mois : 6, 7, 8). Les valeurs sont des moyennes mensuelles de pluie calculées pour la période 1997-2011 à Avignon.

4.3.3. Les eaux de surface

La Durance

Au cours de l'année 2010-2011, la composition isotopique mesurée mensuellement en oxygène-18 de la Durance varie entre -8.7 ‰ et -11.24 ‰ vs SMOW et entre -62.59 ‰ et -79.35 ‰ vs SMOW concernant le deutérium. Les valeurs les plus enrichies sont atteintes en avril-mai. Pendant le reste de l'année, les eaux sont plus appauvries en isotopes lourds (**Figure 61**). (Lacroix, 1991) a indiqué auparavant que le signal isotopique de la Durance n'est pas stable dans le temps (-9.5 ‰ en hiver ; -10.9 ‰ en été) (fonte des neiges, lâchers EDF sur la Durance ou sur le Verdon).

Les canaux d'irrigation

La composition isotopique des canaux d'irrigation varie dans la même gamme de variation isotopique que la Durance, résultat attendu puisque les canaux sont alimentés par une prise d'eau en Durance à Bonpas, à l'entrée amont de la plaine d'Avignon. Pour la période 2010-2011 elle varie entre -8.93 ‰ et -11.18 ‰ vs SMOW pour l'oxygène-18 et entre -60.55 ‰ et -76.82 ‰ vs SMOW pour le deutérium.

On notera l'enrichissement relatif de la composition isotopique observé en avril 2011 dans la Durance et dans les canaux si on le compare à la série de mesures plus longue (2006-2013) effectuée sur un des canaux (Canal Durançole au niveau de l'INRA Saint Paul). La composition isotopique à cette époque varie entre -9.02 ‰ et -12.07 ‰ vs SMOW pour l'oxygène-18 et entre -53.7 ‰ et -86.51 ‰ vs SMOW (**Figure 62**). Les variations mensuelles ne sont pas régulières d'une année sur l'autre sur la série de mesures du Canal Durançole. La moyenne est de $-10.13^{\pm 0.6}$ ‰ vs SMOW pour l'oxygène-18 et de $-71.36^{\pm 5.5}$ ‰ pour le deutérium.

Les eaux de la Durance et celles des canaux sont globalement soumises à une légère évaporation comme le montre la (**Figure 63**) (localisation au-dessous de la droite météorique locale).

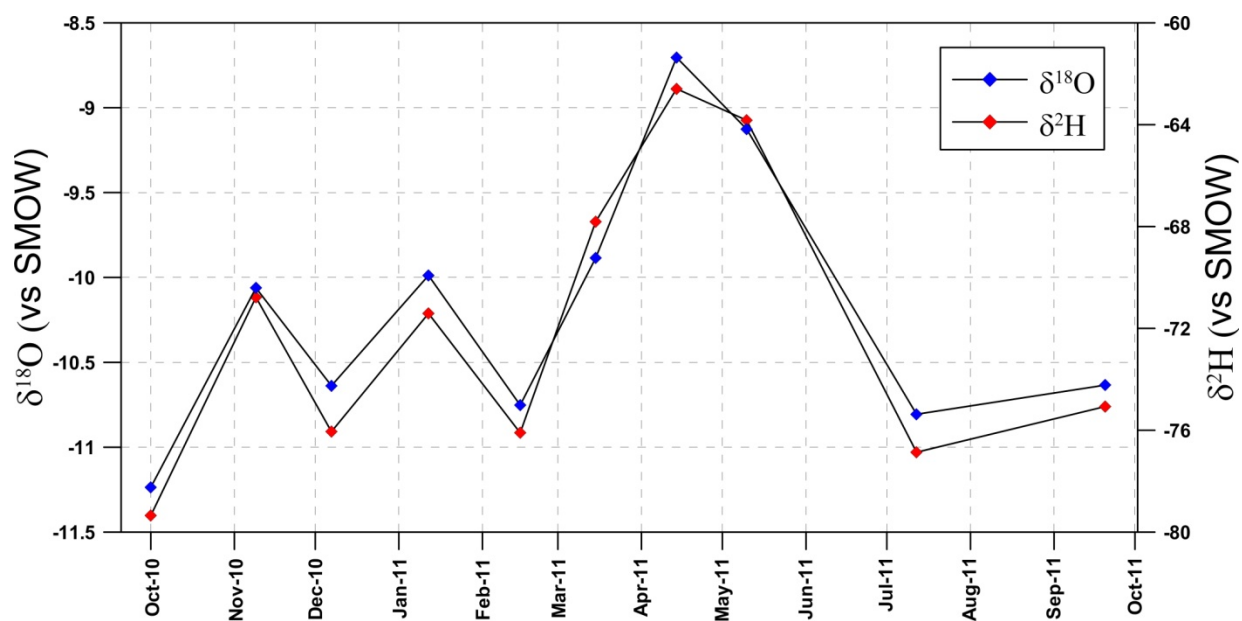


Figure 61. Variations temporelles des compositions isotopiques en oxygène-18 et en deutérium de la Durance (2010-2011).

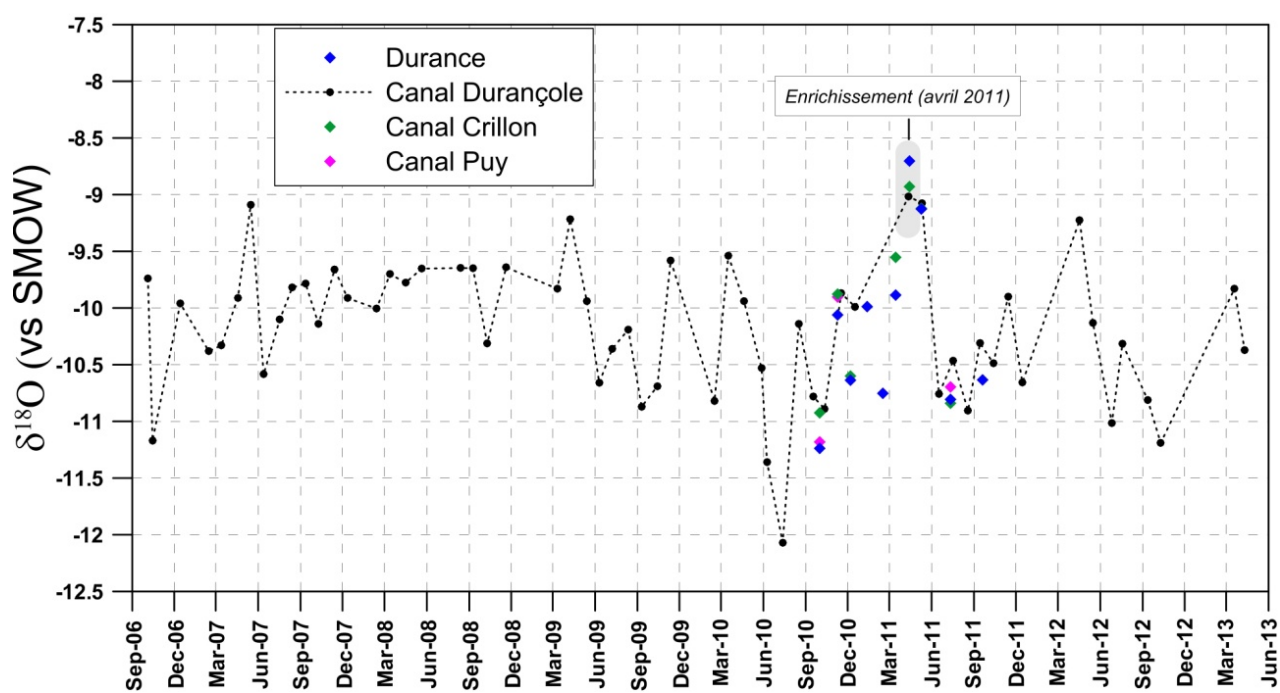


Figure 62. Variation temporelle des compositions isotopiques en oxygène-18 du Canal Durançole (2006-2013) et du Canal Crillon, Canal Puy et de la Durance (2010-2011).

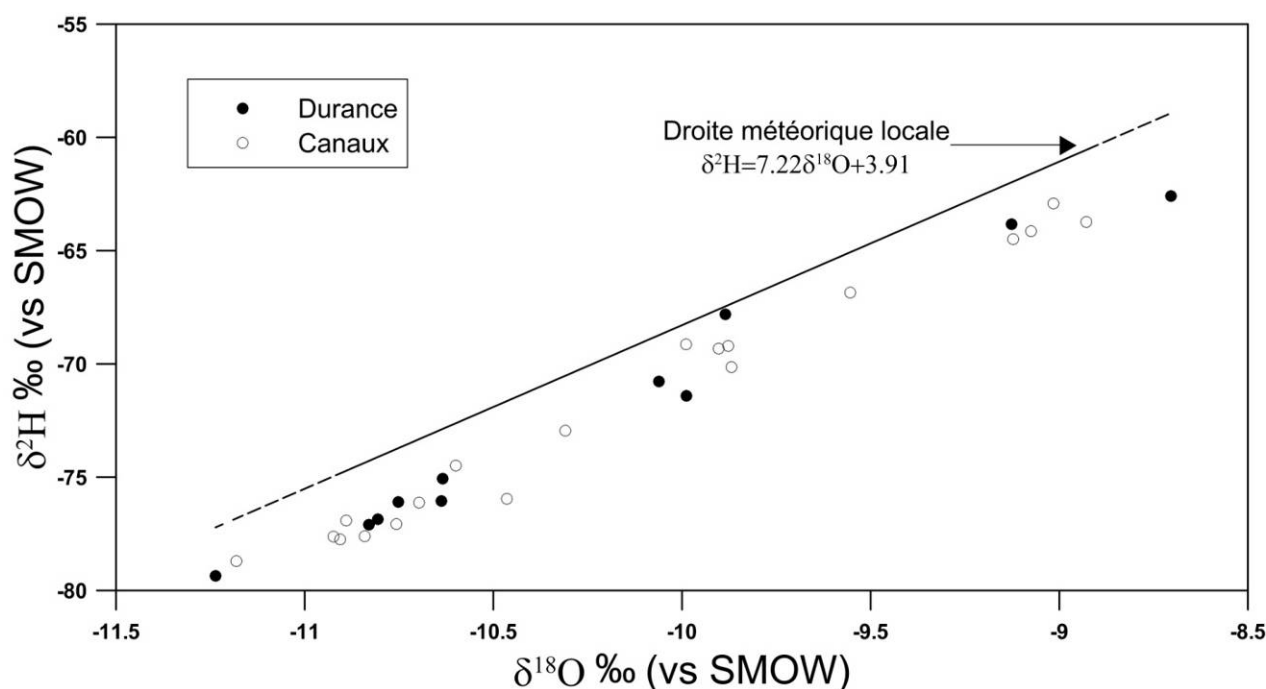


Figure 63. Corrélation Deutérium/Oxygène-18 de l'eau des canaux et celle de la Durance (2010-2011).

4.3.4. La nappe

La composition isotopique moyenne en oxygène-18 des eaux de la nappe varie entre -10.65 (point N° 10) et -6.54 ‰ vs SMOW (point N° 42).

Nous pouvons distinguer trois groupes d'eau, notés groupe A, B et C (**Figure 64**) :

- Le groupe A a la composition isotopique la plus appauvrie parmi les eaux de la nappe (entre -10.65 et -9.71 ‰ vs SMOW) avec des valeurs proches de la moyenne de la composition isotopique de la Durance (-10.2 ± 0.68 ‰ vs SMOW). Tous les puits qui captent ces eaux sont situés en bordure de la Durance (Zone Durance).
- Le groupe B a une composition isotopique plus élevée que la moyenne isotopique de la Durance avec des valeurs autour de -9.6 ‰ vs SMOW. Ces eaux se situent soit sous des terrains irrigués (à l'est), soit sous la zone urbaine (à l'ouest) qui se trouve juste en aval de la zone irriguée. Deux points se distinguent dans ce groupe avec une composition plus enrichie (points 16 et 18). Ces deux points sont classés dans un contexte urbain mais qui est situé au nord-ouest de la zone d'étude avec une surface irriguée plus faible à l'amont. Vers l'est, un enrichissement graduel du signal isotopique est noté pour la zone irriguée en se rapprochant la zone amont.
- Le groupe C a une composition isotopique qui se situe dans la gamme -7.71 à -6.54 ‰ vs SMOW. Ces eaux sont les plus enrichies et correspondent à la moyenne isotopique de la pluie pondérée et retenue pour 2010-2011 (-6.97 ± 1.97 ‰ vs SMOW).

La **Figure 65** montre les variations temporelles de ces trois groupes représentées par des points choisis en fonction des zones en comparaison avec les variations isotopiques de la pluie et celles de la Durance.

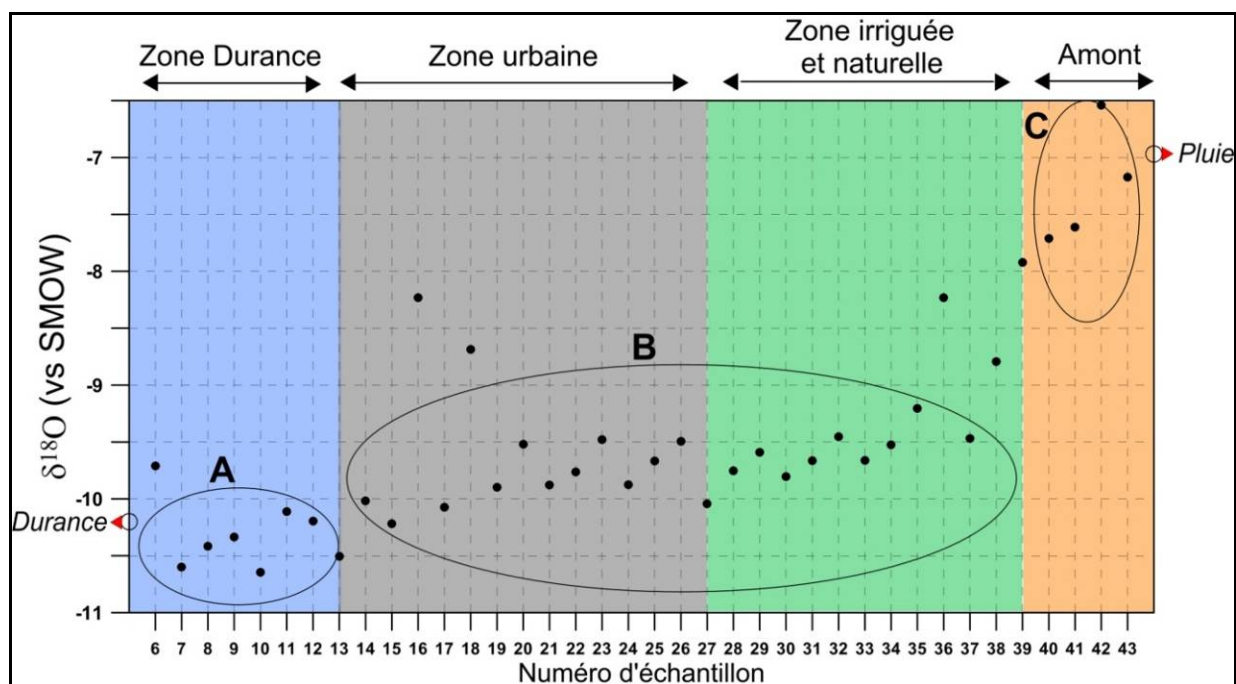


Figure 64. Composition isotopique moyenne en oxygène -18 des eaux de la nappe, de la pluie et de la Durance pour la période 2010-2011.

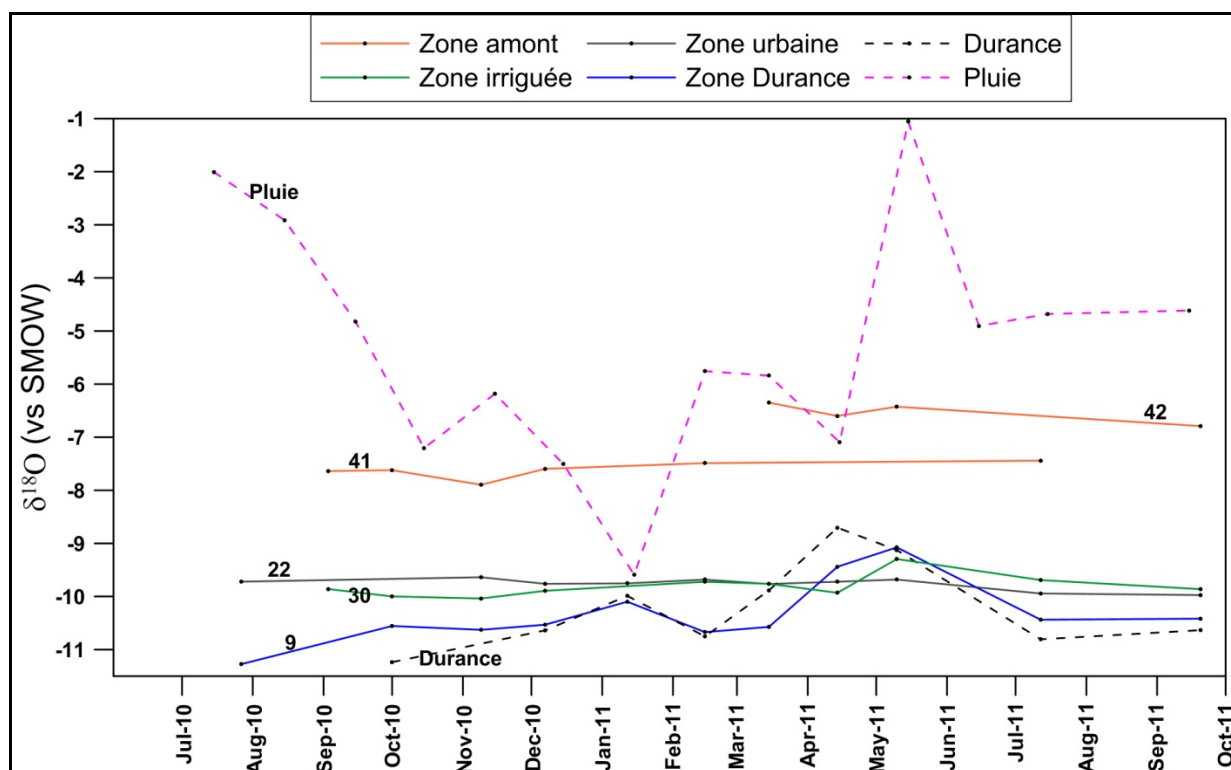


Figure 65. Évolution des compositions isotopiques des eaux de la nappe représentant les différentes zones (9 : zone Durance, 30 : zone irriguée, 22 : zone urbaine, 41 et 42 : zone amont) en comparaison avec le signal isotopique de la pluie et celui de la Durance durant la période de mesures (2010-2011).

Pour le premier groupe (exemple : point N° 9), les variations temporelles de la composition isotopique suivent généralement celles de la Durance. Deux pics ^{18}O de l'eau de la Durance (1 et 2) apparaissent avec des valeurs plus enrichies. Ils ont également été retrouvés dans l'eau de la nappe au niveau des points N° 9 (**Figure 66**).

Le pic 1 de $\delta^{18}\text{O}$ observé le 12 janvier 2011 en Durance semble se retrouver quasiment immédiatement dans l'eau de la nappe, au niveau du point N° 9, qui se situe à 240 m environ de la Durance. Le temps de transfert semble donc être court probablement en liaison avec le niveau relativement haut de la Durance qui accélère l'écoulement vers la nappe. Le pic 2 observé en Durance le 14 avril 2011 ne se répercute pas de manière aussi instantanée au niveau du point N° 9 (pic 3). Ce phénomène peut s'expliquer par des niveaux d'eau en Durance plus bas en avril induisant une alimentation par la rivière plus lente. Malgré le pas d'échantillonnage pseudo-mensuel, peu adapté à la dynamique du phénomène étudié ici, nous pouvons toutefois donner une estimation de la vitesse de circulation de l'eau au voisinage de ce point N° 9. Si on considère que le pic isotopique a eu lieu en nappe effectivement le 10 mai 2011 (pic 3), soit 26 jours après le pic en Durance, nous pouvons interpréter ce décalage en terme de vitesse de circulation de l'eau de la nappe.

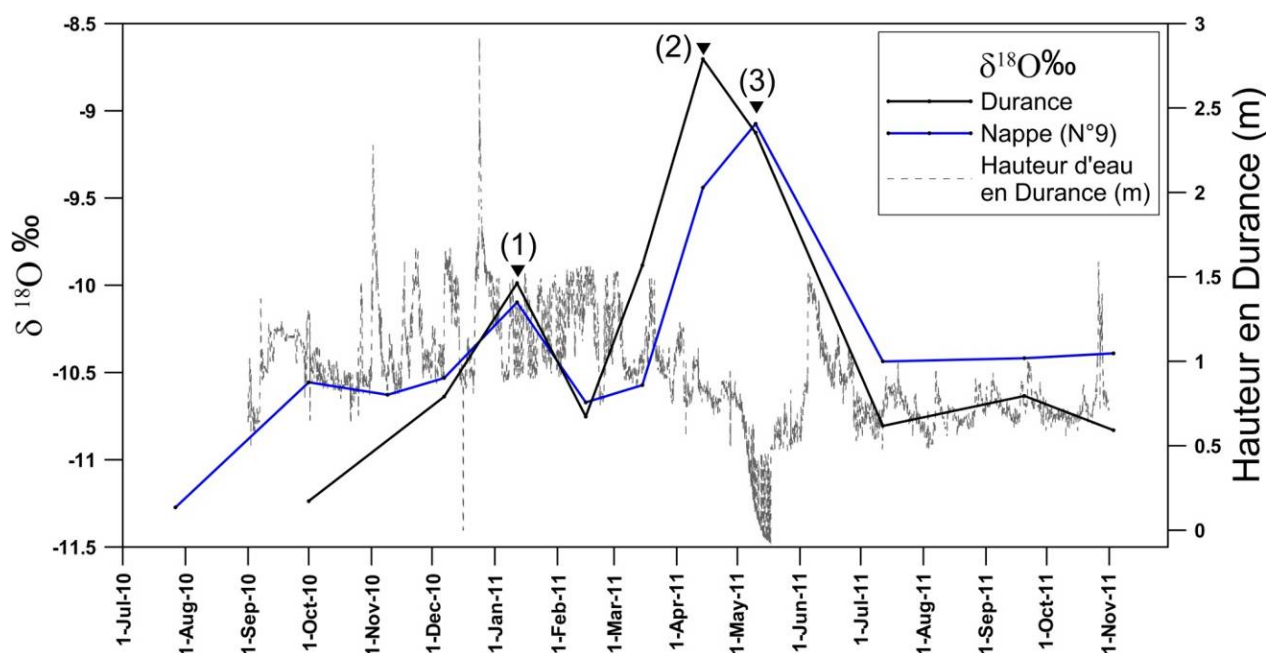


Figure 66. Les variations temporelles de $\delta^{18}\text{O}$ dans la Durance et dans la nappe (point N° 9) avec la hauteur d'eau mesurée dans la Durance (station Bonpas) en m.

En effet, ce décalage entre le signal d'entrée et celui de la nappe permet d'avoir une estimation de la vitesse de traceur de l'eau souterraine (Plöthner et Geyh, 1991).

Pour une distance de 270 m entre le point N° 9 et la Durance, la vitesse de traceur serait de $270/26 = 10.4$ m/jour.

Dans le cas du deuxième groupe, groupe B, les eaux semblent avoir des compositions isotopiques en oxygène-18 plus proches de celle de la Durance (ou du canal d'irrigation) que celle de la pluie. Alors que plus un puits est éloigné de la zone irriguée vers l'est, plus la moyenne des compositions de l'oxygène-18 de l'eau captée est positive, et proche de celle de la

pluie. L'irrigation qui joue un effet de tampon cache l'influence de la pluie même pendant l'hiver. En effet, pendant cette période la nappe se trouve en état de basses eaux (période de non-irrigation), et la signature isotopique de la pluie reste néanmoins marquée par rapport à celle de l'irrigation (**Figure 67**).

Le troisième groupe, le groupe C, englobe les puits situés à l'amont de la zone irriguée où la seule source de recharge est la pluie.

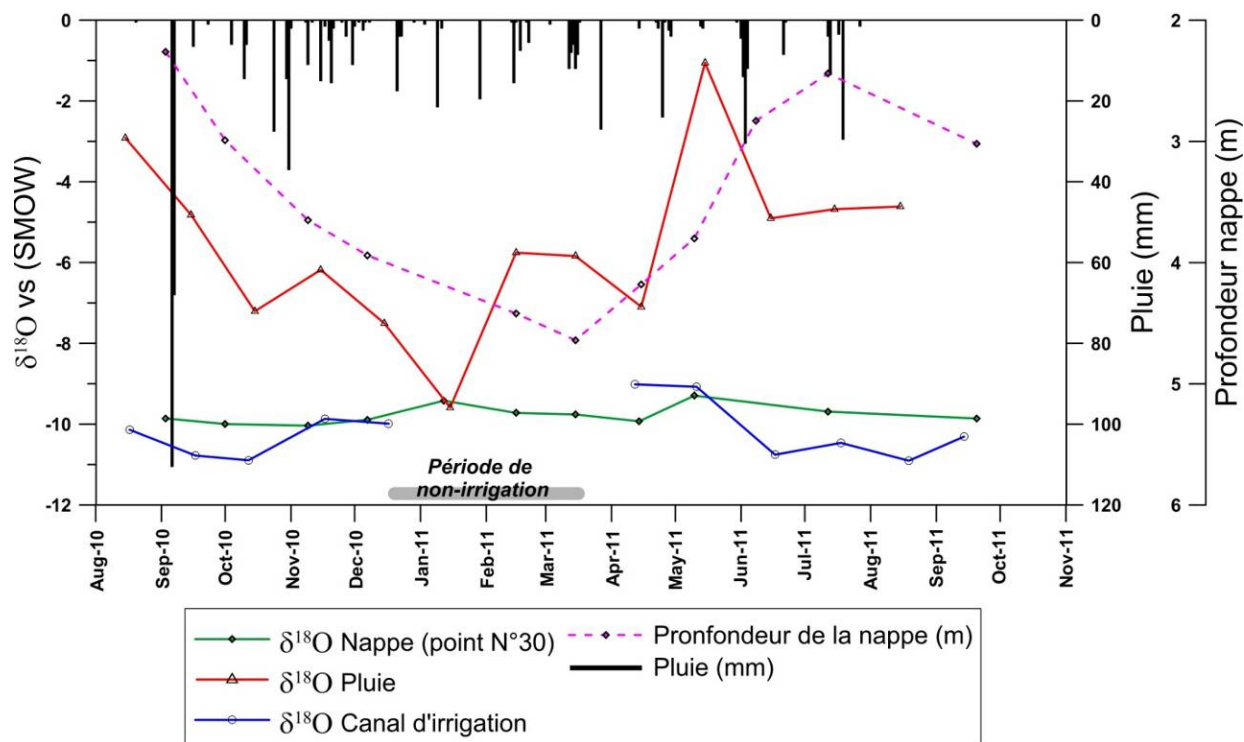


Figure 67. Les variations temporelles de $\delta^{18}\text{O}$ dans la nappe (point N° 30), dans un canal d'irrigation et dans la pluie avec la pluie en mm et la profondeur de la nappe en m.

La différence des compositions isotopiques entre les eaux de la pluie locale et l'eau de la Durance (directement ou via l'irrigation) est généralement assez importante, ce qui rend possible la détermination de la proportion d'eau de l'irrigation dans l'alimentation de la nappe. Dans notre zone d'étude, la nappe sous le périmètre du canal Crillon n'est pas alimentée directement par la Durance, comme on l'a vu sur les cartes piézométriques. On peut donc considérer que la nappe sous ce périmètre est un mélange entre l'eau de la pluie soit, par infiltration directe soit, de la recharge latérale par les eaux infiltrées sur la zone amont et l'eau d'irrigation ; infiltration sur les parcelles d'irrigation et fuites linéaires du réseau (**Figure 68**).

La proportion d'eau d'irrigation (P) dans chaque point de prélèvement situé dans le périmètre du canal Crillon est donnée donc par l'équation suivante d'après (Stichler et al., 1986) :

$$P = \frac{\delta^{18}O_E - \delta^{18}O_C}{\delta^{18}O_I - \delta^{18}O_C}$$

Où

- P : pourcentage d'eau d'irrigation
- $\delta^{18}O_E$: teneur isotopique de l'échantillon
- $\delta^{18}O_C$: teneur isotopique moyen des puits des coteaux ; moyenne des analyses pris dans les points N° 41, 42, 43 qui sont situés sur les coteaux à l'amont de la zone irriguée ($\delta^{18}O = -7.17 ‰$)
- $\delta^{18}O_I$: teneur isotopique moyenne du canal Crillon ($\delta^{18}O = -9.98 ‰$)

Les résultats sont figurés dans le **Tableau 9**. La majorité des points analysés contiennent plus de 80% de l'eau provenant des irrigations.

Les plus forts pourcentages d'eau d'irrigation se trouvent sans surprise à proximité des champs irrigués au milieu du périmètre du canal, les points N° 28, 30, 31 et 33 (**Figure 69**). Les points N° 29, 31, 34 et 37 viennent en deuxième position avec un pourcentage plus faible d'eau d'irrigation. Ces points ne sont pas situés dans des champs irrigués mais à proximité du canal ou d'une de ses branches ce qui révèle l'importance des pertes linéaires des réseaux d'irrigation dans l'alimentation de la nappe dans cette zone.

De manière générale, le pourcentage d'eau d'irrigation diminue vers l'est (amont de la zone irriguée) et vers le nord ce qui peut être corrélé avec la diminution des surfaces irriguées.

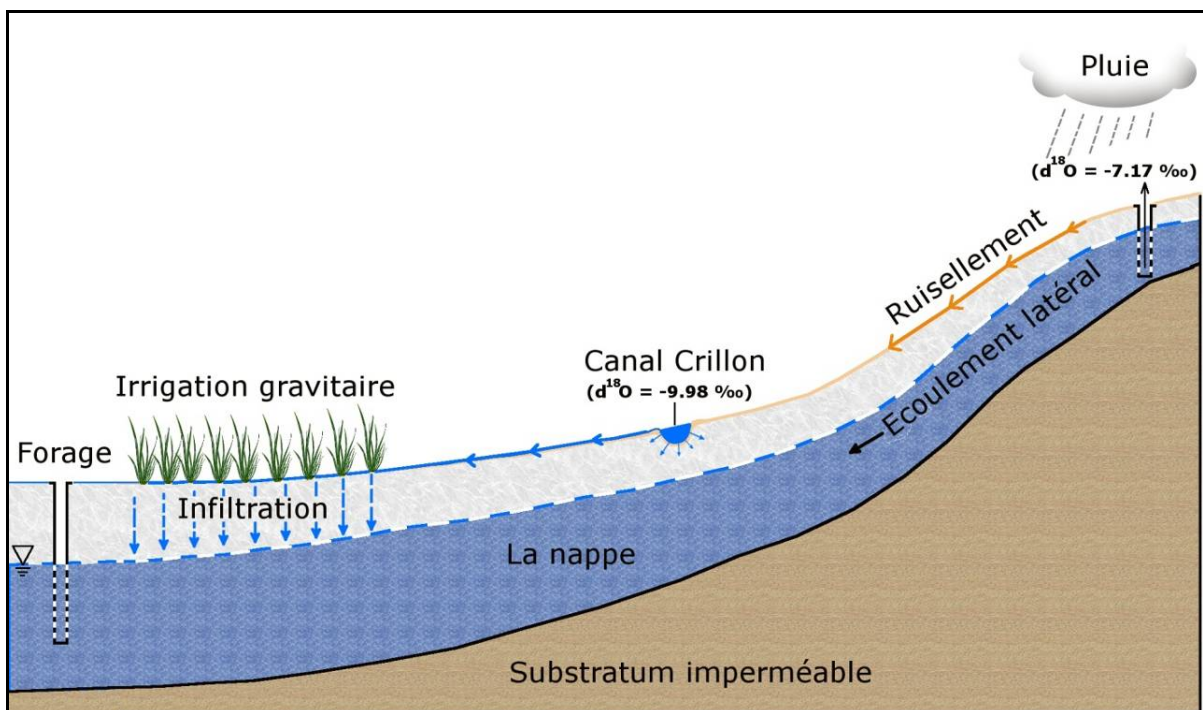


Figure 68. Schéma de la situation hydrogéologique au périmètre du Canal Crillon.

Point de mesure	Moyenne en $\delta^{18}\text{O}$ vs SMOW (2010-2011)	Pourcentage en eau d'irrigation dans la nappe
16	-8.23	38
18	-8.69	54
28	-9.75	92
29	-9.59	86
30	-9.80	94
31	-9.68	89
33	-9.66	88
34	-9.52	84
37	-9.47	82
38	-8.79	58
39	-7.92	27
40	-7.71	19

Tableau 9. Pourcentage d'eau d'irrigation dans la nappe sous le périmètre du Canal Crillon.

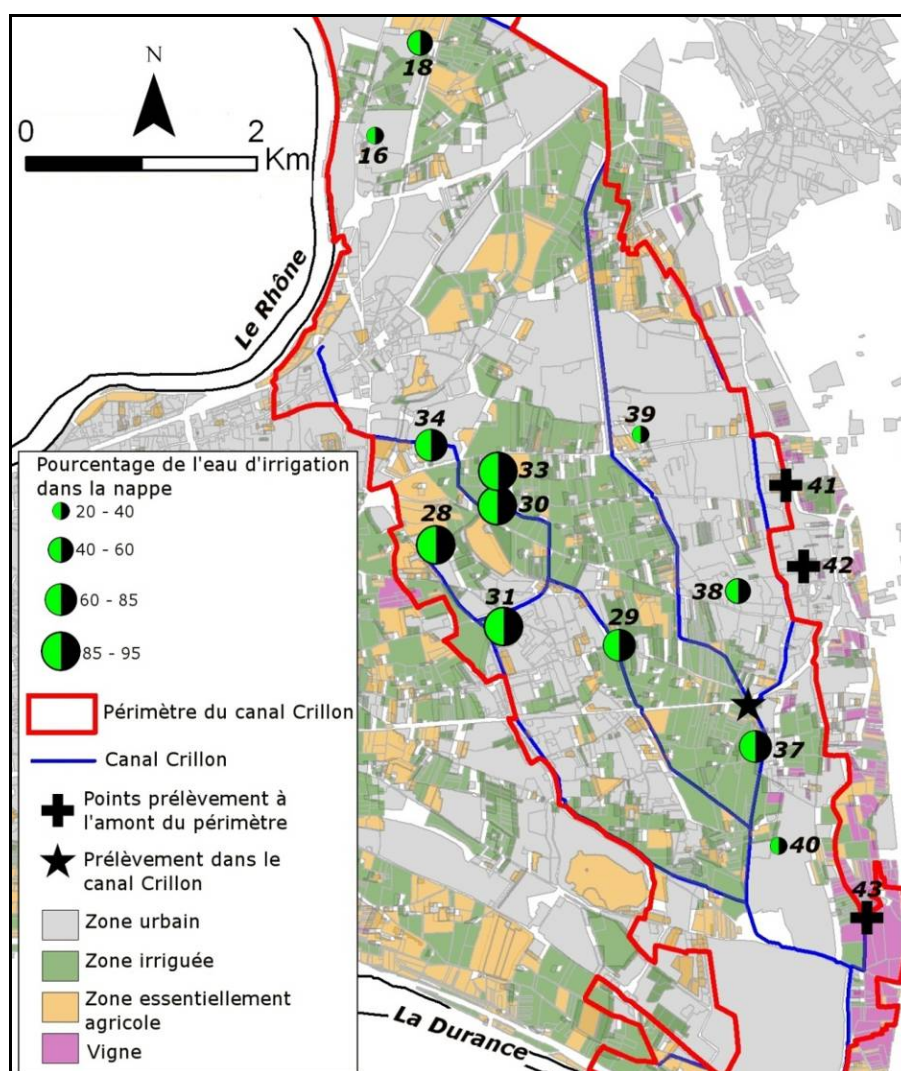


Figure 69. Localisation des points de prélèvement utilisés pour les calculs de pourcentage d'eau d'irrigation dans le périmètre du Canal Crillon.

4.3.5. Modélisation du transfert du signal $\delta^{18}\text{O}$

La modélisation du signal isotopique s'appuie sur deux chroniques de $\delta^{18}\text{O}$ dans la pluie et dans les eaux d'irrigation qui constituent la fonction d'entrée et des mesures dans la nappe à différents endroits pour la validation. La démarche utilisée est celle d'une modélisation de type "boîte noire" qui intègre tout le système à l'amont du point de mesure (Małozewski et Zuber, 1996).

Habituellement, les modèles de transfert isotopiques supposent un régime permanent, de sorte que seules les concentrations du traceur sont considérées. Dans le cas d'un régime transitoire, il est nécessaire de tenir compte du flux de traceur et non pas de sa concentration.

C'est l'approche qui a été réalisée ici à partir d'un modèle constitué de deux réservoirs en série, le premier simulant une vidange exponentielle (encore appelé modèle "bon mélange") et le second un drainage de type piston. Avant ces deux réservoirs, une fonction de production est utilisée pour estimer la pluie efficace en tenant compte de l'évapotranspiration (**Figure 70**).

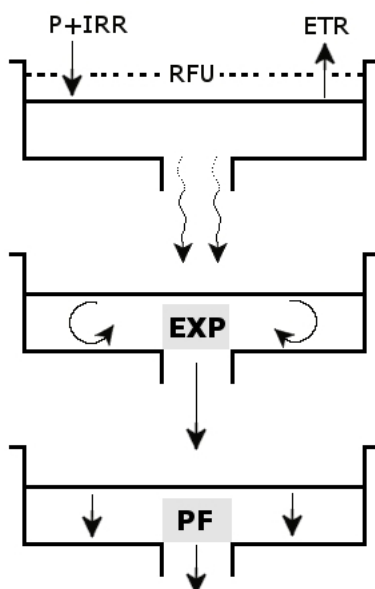


Figure 70. Structure du modèle de transfert.

Le modèle a été développé sous Vensim (version 6.1) au pas de temps mensuel. En tout, il comprend 3 paramètres : la RFU du modèle de production, le temps de résidence moyen de l'eau dans le réservoir exponentiel (T_{EM}) et le temps de résidence moyen dans le réservoir piston (T_{PF}). La partie "production" fonctionne selon un modèle de bilan hydrique classique. Tant que la hauteur d'eau stockée dans le sol n'est pas suffisante pour satisfaire l'évapotranspiration, l'infiltration est nulle. Par contre, si la recharge permet d'atteindre la valeur de RFU, la quantité nette de l'entrée (Pluie+Irrigation-ETR) devient une infiltration I qui va ensuite rejoindre le réservoir exponentiel puis le réservoir piston.

La RFU a été estimée à 83 mm (voir chapitre 3). La teneur isotopique initiale de ce réservoir "sol" est supposée égale à la moyenne isotopique pondérée de la pluie et de l'irrigation sur la

période d'observation. De la même façon, les hauteurs d'eau initiales dans les réservoirs exponentiels et piston ont été supposées égales à la moyenne des entrées efficaces (pluie et irrigation) sur la période d'observation tandis que la teneur isotopique initiale est la moyenne pondérée de ces entrées efficaces.

Le modèle exponentiel est en accord avec les conditions hydrogéologiques : nappe libre et peu profonde, où le temps de transit à travers la zone non saturée est négligeable vis à vis du temps de transit dans la nappe. La forme de la fonction de transfert du modèle exponentiel suppose l'existence de temps de transit très courts, ce qui est compatible avec notre situation.

Le modèle piston en série rend compte d'une absence de dispersion avec des lignes de flux parallèles ayant le même temps de transit. La combinaison d'un modèle exponentiel et d'un modèle piston (modèle type EPM) rend compte, par exemple, d'une situation où une nappe libre devient confinée vers l'aval (**Figure 71**). Ce cas de figure correspond assez bien au contexte de la nappe de la plaine d'Avignon où le recouvrement limoneux peu perméable s'épaissit vers l'aval.

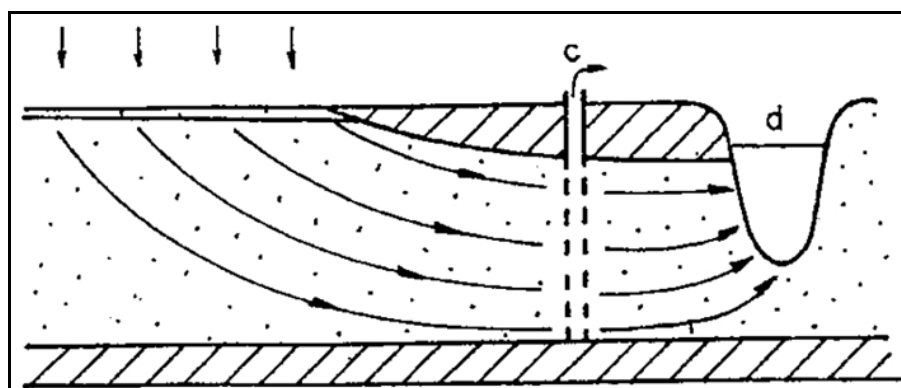


Figure 71. Situation hydrogéologique schématique d'applicabilité du modèle EPM (combinaison entre un modèle exponentiel et un modèle piston) (Maloszewski et Zuber, 1996).

Les résultats de la modélisation sont illustrés dans la **Figure 72** pour les points 30 (situé en zone irriguée), 19 (situé en zone urbaine) et INRA situé en zone intermédiaire.

Le **Tableau 10** donne les paramètres T_{exp} et T_{PF} optimum dans les 3 cas.

Piézomètre	T_{exp} (mois)	T_{PF} (mois)
Point 30	6	-
Point INRA	6	2
Point 19	10	7

Tableau 10. Paramètres optimisés pour la simulation du $\delta^{18}O$ dans la nappe d'Avignon.

Dans la zone irriguée, la simulation du signal isotopique est réalisée avec le modèle exponentiel seul, ce qui montre une situation classique de nappe alluviale libre. Le temps moyen de résidence des eaux est de 6 mois, ce qui donne une vitesse réelle de 8 m/jour en prenant une

distance de 1.4 km (une distance moyenne de recharge). Cette valeur est cohérente avec la vitesse moyenne de l'eau calculée à partir de l'étude piézométrique.

Pour le point 19, situé plus en aval, il est nécessaire d'adjoindre le réservoir piston au modèle exponentiel en raison du confinement progressif de la nappe sous une épaisseur croissante de limon. Au point INRA, le transfert de type piston est relativement limité ($T_{PF} = 2$ mois) et le paramètre T_{exp} est similaire à celui obtenu pour le point 30. En revanche, au point 19, le signal est plus amorti et très décalé par rapport aux autres points. La simulation isotopique requiert un temps de résidence dans la partie exponentielle du transfert de l'ordre de dix mois et de sept mois pour le réservoir piston.

Les simulations respectent généralement les grandes tendances. Les variations brusques observées au niveau du point INRA ne sont pas correctement restituées. Cela peut être dû à plusieurs facteurs :

- 1- Le pas de temps mensuel n'est pas adapté à la dynamique (plus rapide) de la nappe.
- 2- Les processus de transferts préférentiels rapides ne sont pas pris en compte.
- 3- L'incertitude sur les vrais flux d'irrigation au pas de temps mensuel.

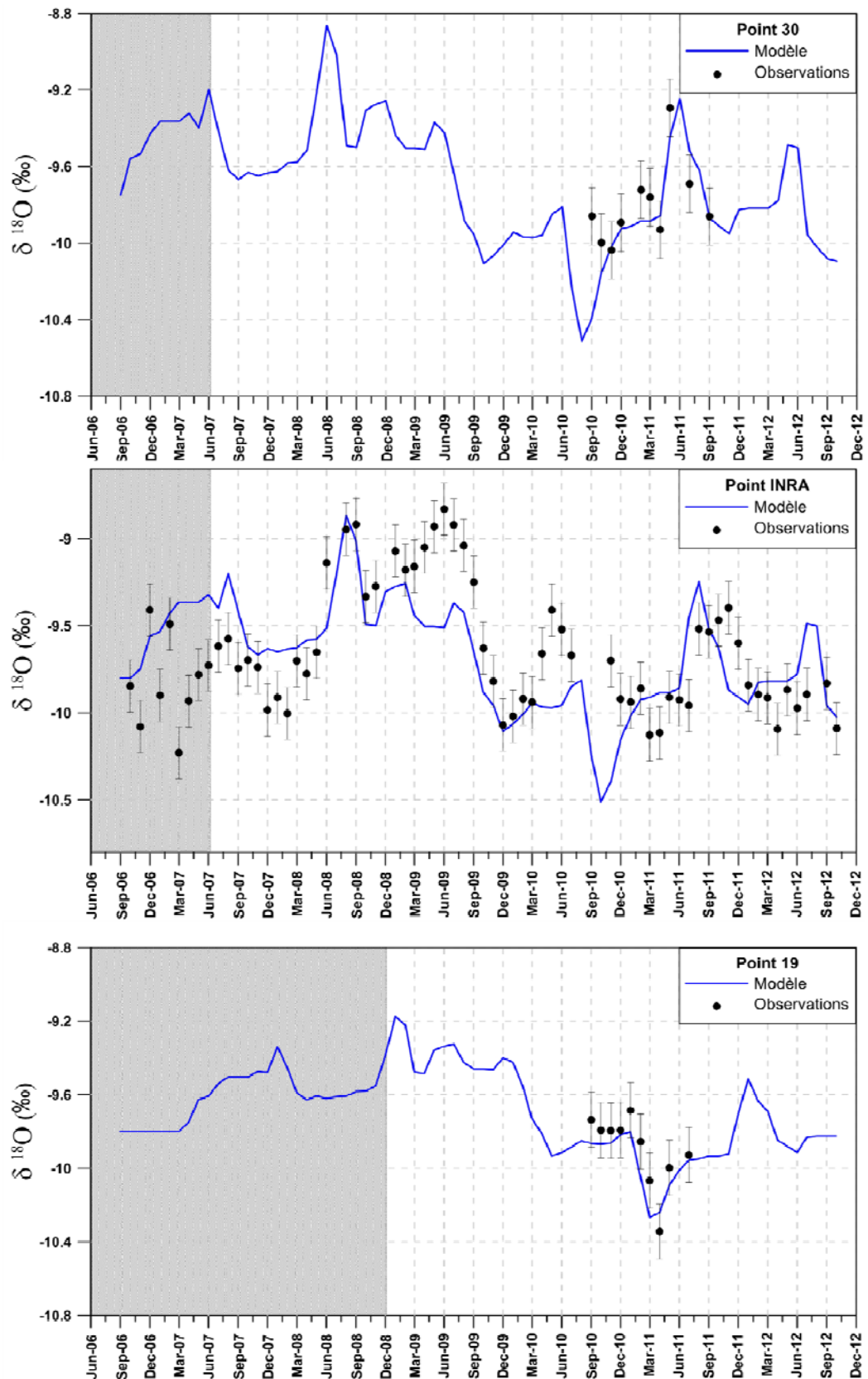


Figure 72. Résultats du modèle de transfert du signal $\delta^{18}\text{O}$ comparé au signal de la nappe (points : 30, INRA et 19). La zone en gris représente la période d'initialisation du modèle. Les barres d'erreur représentent la marge d'erreur analytique (0.15 ‰).

4.4. Le Tritium ^3H

Le tritium (^3H) est un isotope radioactif de l'hydrogène (de période 12,26 ans) qui entre aussi dans la composition de la molécule d'eau. En conditions naturelles, ^3H est présent dans la molécule d'eau à de très faibles concentrations (5 UT environ dans les précipitations) (Roether, 1967).

La teneur en ^3H des précipitations a temporairement augmenté d'un facteur 1000 dans l'hémisphère Nord au cours des essais sur les armes nucléaires pendant la période 1952-1963 (Travi, 2008). Depuis l'arrêt de ces essais en 1963, la teneur en ^3H dans les précipitations a décru généralement et tend actuellement vers les teneurs naturelles (**Figure 73**).

La présence de tritium dans les eaux souterraines nous permet donc de dater les eaux et d'identifier les recharges modernes d'aquifère.

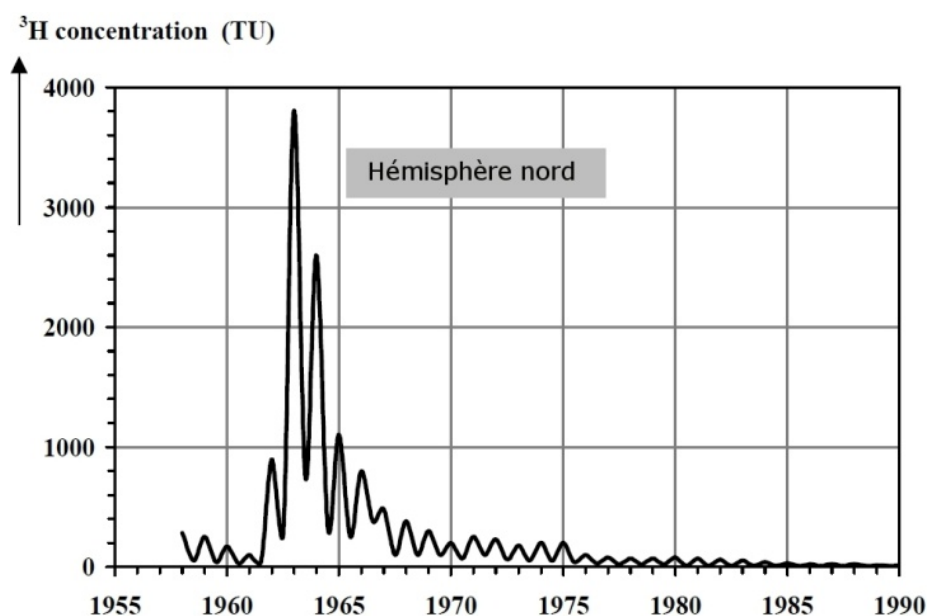


Figure 73. La teneur moyenne en ^3H des précipitations de l'hémisphère Nord d'après (Travi, 2008).

Des sources industrielles locales peuvent ajouter des concentrations en ^3H aux valeurs mesurées. C'est le cas dans la zone d'étude où on trouve des teneurs fortes dans le Rhône du fait de la présence de centrales nucléaires en amont (Blavoux et al., 1982).

La moyenne annuelle de la pluie à Avignon de 2005 à 2011 est de 24 UT avec des valeurs plus fortes en hiver qu'en été (**Figure 74**).

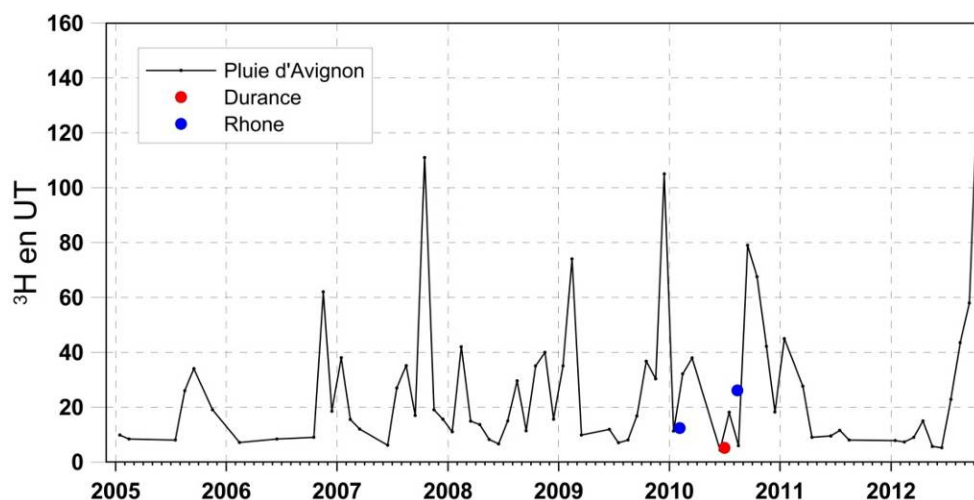


Figure 74. Valeurs moyennes mensuelles en Tritium des pluies à Avignon et des teneurs mesurées dans le Rhône et dans la Durance.

Les plus fortes valeurs en tritium ont été retrouvées dans le Rhône et pour les points des prélèvements dans la partie aval de la nappe ce qui indique une alimentation possible depuis le Rhône, probablement à l'amont d'Avignon, en particulier en période de crue (**Figure 75**). Cependant, la densité des points de prélèvements est faible et l'échantillonnage a été effectué de manière ponctuelle dans le temps alors que les teneurs en ^3H du Rhône varient notablement au cours du temps. Il n'est pas donc possible de préciser les conditions de cette alimentation.

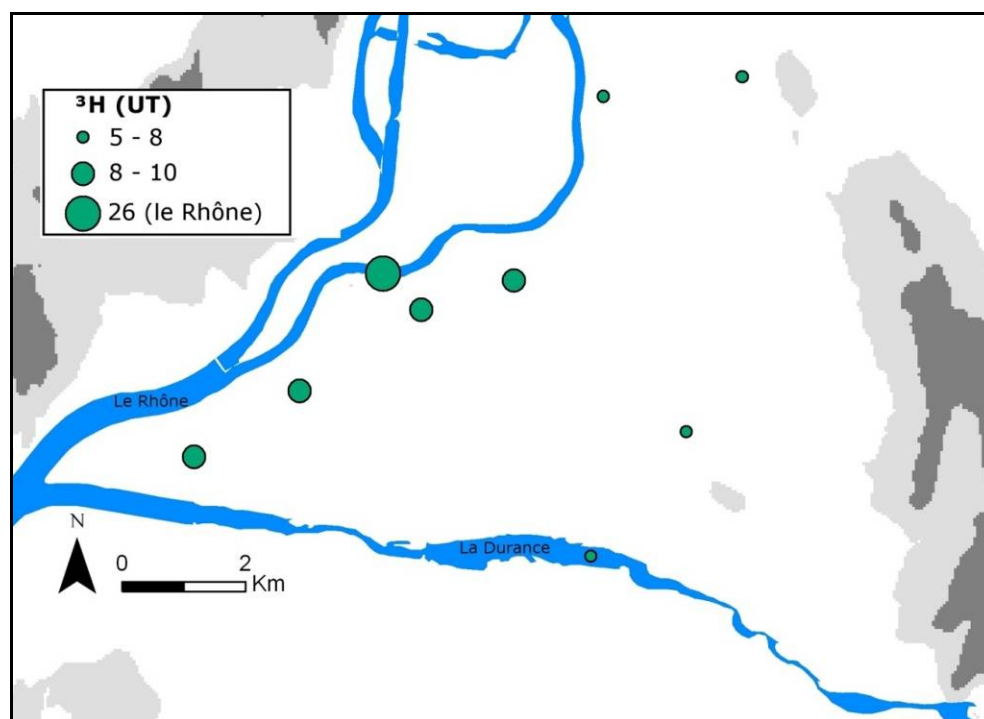


Figure 75. La composition isotopique en tritium pour le Rhône, la Durance et la nappe (30/09/2010).

5. FONCTIONNEMENT DE LA NAPPE ALLUVIALE D'AVIGNON

La détermination d'un modèle conceptuel est la première étape dans le processus de la modélisation. Cette dernière doit utiliser des hypothèses simplificatrices suffisantes pour satisfaire les objectifs fixés et s'appuyer sur les données disponibles (Bear, 2010).

Le modèle conceptuel doit fournir une représentation aussi précise que possible du système hydrogéologique (réservoir), définir les conditions aux limites (recharge/décharge, potentiel imposé) et décrire le fonctionnement de la nappe en s'appuyant sur les paramètres hydrodynamiques et les mesures piézométriques (**Figure 77**).

L'étude de la plupart de ces éléments s'est effectuée à partir de plusieurs approches : synthèse des données géologiques et hydrogéologiques sur le réservoir quaternaire, bilan hydrique, mesure de l'infiltration sur case lysimétrique, suivi piézométrique, modélisation des échanges entre la Durance et la nappe, bilan hydrologique sur les périmètres irrigués (Canal de Crillon, Canal Puy, Canal de l'Hopital). Ces différentes approches ont permis de confirmer les hypothèses et d'améliorer la connaissance du fonctionnement de l'aquifère, en particulier la relation entre l'aquifère et ses limites (recharge et échanges avec la Durance).

L'aquifère peut être assimilé à une seule couche renfermant une nappe libre, correspondant aux alluvions situées entre le sol (limono argileux) et le sommet des marnes du Miocène. Cette formation (ou couche) est composée d'alluvions (sable, galets, graviers) disposées en strates irrégulières et hétérogènes, plus ou moins consolidées.

Cependant, à l'échelle de la plaine, nous pouvons la considérer comme relativement homogène comme l'indique les différentes mesures de perméabilité qui donnent des valeurs de l'ordre de 10^{-3} m/s (3 à $8 \cdot 10^{-3}$ m/s). Cette bonne perméabilité favorise un écoulement relativement rapide estimé à des vitesses réelles moyennes comprises entre 10 m/jour et 20 m/jour à partir des cartes piézométriques et de l'utilisation des isotopes de la molécule d'eau.

La formation aquifère est surmontée par un sol limono argileux moins perméable (entre 10^{-5} et 10^{-6} m/s), réparti de manière irrégulière et d'épaisseur variable (de moins d'1 m à plus de 3 m).

La couche marneuse située sous les alluvions est caractérisée par une très faible perméabilité ; elle est considérée comme le substratum pour la formation aquifère.

Comme indiqué sur la

Figure 16, à l'exception des bordures est (collines de St Saturnin/Morières) et ouest (Rhône), la profondeur du substratum varie globalement entre 20 m et 25 m et peut atteindre localement 30 m sous la surface du sol. Ceci correspond à l'épaisseur des alluvions à laquelle il faut retrancher le niveau limoneux pour obtenir l'épaisseur de la couche aquifère. Ce niveau limoneux a une épaisseur comprise entre 1 et 2 m sur la majeure partie de la plaine.

La nappe est proche de la surface (entre 3 m et 6 m de profondeur), ce qui implique une relation étroite entre le niveau piézométrique et la recharge depuis les eaux de surface. Dans ce contexte, la couverture et l'occupation des sols jouent un rôle important dans le processus de transfert de l'eau de surface vers la nappe.

À l'heure actuelle si la couverture limoneuse constitue un facteur relativement stable, l'extension de la zone urbaine vers l'est (zone traditionnellement occupée par des cultures maraîchères, fruitières, et des prairies) constitue un facteur évolutif important. En effet, cette évolution entraîne une imperméabilisation des sols et l'abandon progressif de l'irrigation.

Aujourd'hui, la plaine alluviale d'Avignon s'inscrit dans un contexte majoritairement urbanisé où les territoires agricoles n'occupent plus que 30 % de la surface.

L'importance de l'irrigation sur la recharge, déjà connue, a été confirmée et précisée à partir des différentes approches développées dans ce travail. Elle s'insère dans un schéma d'alimentation de la nappe que l'on peut résumer comme suit :

Trois sources de recharge sont clairement identifiées, en particulier à partir de l'étude isotopique utilisant les isotopes de la molécule d'eau, et les mesures piézométriques : les précipitations et les eaux de la Durance, soit par voie directe soit via l'irrigation et qui vont chacune impacter préférentiellement la nappe sur trois grands secteurs.

Dans la partie amont, à l'Est le long des versants des collines de Morières/Saint Saturnin, la pluie, unique source d'alimentation, produit des variations piézométriques relativement rapides (parfois importantes) lors des épisodes pluvieux. Dans ce secteur les variations piézométriques annuelles suivent une évolution naturelle (hautes eaux en hiver et basses eaux en été). Les teneurs isotopiques sont proches de celles de la pluie pondérée et la chimie est localement marquée par les intrants agricoles probablement mis en solution par le ruissellement sur les versants. Ces eaux rechargées à l'amont s'écoulent ensuite en direction de la zone principale de recharge située sous les périmètres irrigués, notamment les prairies du périmètre du canal Crillon (amplitude piézométrique maximale). À cet endroit, les eaux infiltrées à partir de la surface sont marquées par une signature isotopique proche de la valeur moyenne de la Durance (signature isotopique de la Durance via l'irrigation) et une signature chimique dominée par le système $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$ avec présence significative de sulfate ; les fluctuations piézométriques suivent le cycle des irrigations. Les différentes approches et en particulier l'étude isotopique montrent dans ce secteur l'apport prépondérant des eaux d'irrigation. Le pourcentage calculé avec l'oxygène-18 avoisine parfois les 90%, et reste très élevé hors période d'irrigation. Sur les périmètres irrigués, un calcul de bilan hydrique fournit un volume annuel infiltré d'environ 19 millions de m^3 (pour une surface irriguée considérée de $16,3 \text{ km}^2$).

La troisième source d'alimentation est liée à l'apport direct des eaux de la Durance.

La Durance dans sa partie amont participe à la recharge de la nappe ; cela a été confirmé par les compositions isotopique et chimique de la nappe très similaires à celles de la Durance. Cette dernière joue alors un rôle régulateur pour la nappe (stabilisation du niveau piézométrique). Elle assure par ailleurs pour une bonne part l'alimentation en eau potable de la ville d'Avignon par l'intermédiaire du champ captant de « La Saignonne ». Proche de la rivière, ce dernier, avec son important débit de pompage ($\approx 32\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$), sollicite l'eau de la Durance et induit un sens d'écoulement de la nappe vers le nord-ouest montré par la piézométrie et confirmé par les teneurs isotopique et surtout la qualité chimique de l'eau de la nappe.

Plus à l'aval, les échanges rivière/nappe sont plus complexes et discontinus dans le temps et dans l'espace. En période de crue, il a été possible de modéliser les apports à la nappe (hydrodynamique et isotope) et de déterminer la diffusivité et les vitesses d'écoulement (cf chapitre 3).

Ces eaux et celles provenant des périmètres irrigués se mélangent ensuite en s'écoulant à l'aval vers l'ouest où la recharge verticale à partir de la pluie semble ponctuelle et diminue progressivement pour être quasiment nulle dans la zone urbaine dense (le site historique de la ville d'Avignon). Dans cette zone, la diminution ou la disparition de la recharge verticale s'accompagne d'une influence marquée des eaux de la Durance.

On peut aussi noter que ce secteur peut exceptionnellement recevoir l'eau du Rhône lors des très fortes crues du fleuve. La plupart du temps, le Rhône constitue la sortie principale de la nappe soit directe soit par les contres canaux qui jouent un rôle de médiateur entre la nappe et la rivière dans la partie confluence Rhône-Durance.

Enfin, avec l'analyse des différentes composantes hydrologiques et un bilan détaillé sur les périmètres irrigués, un bilan hydrologique global a pu être réalisé. On peut le résumer comme suit :

1) Les entrées

Les sources de la recharge de la nappe d'Avignon sont la pluie et la Durance (directement ou indirectement via l'irrigation) (**Figure 76**).

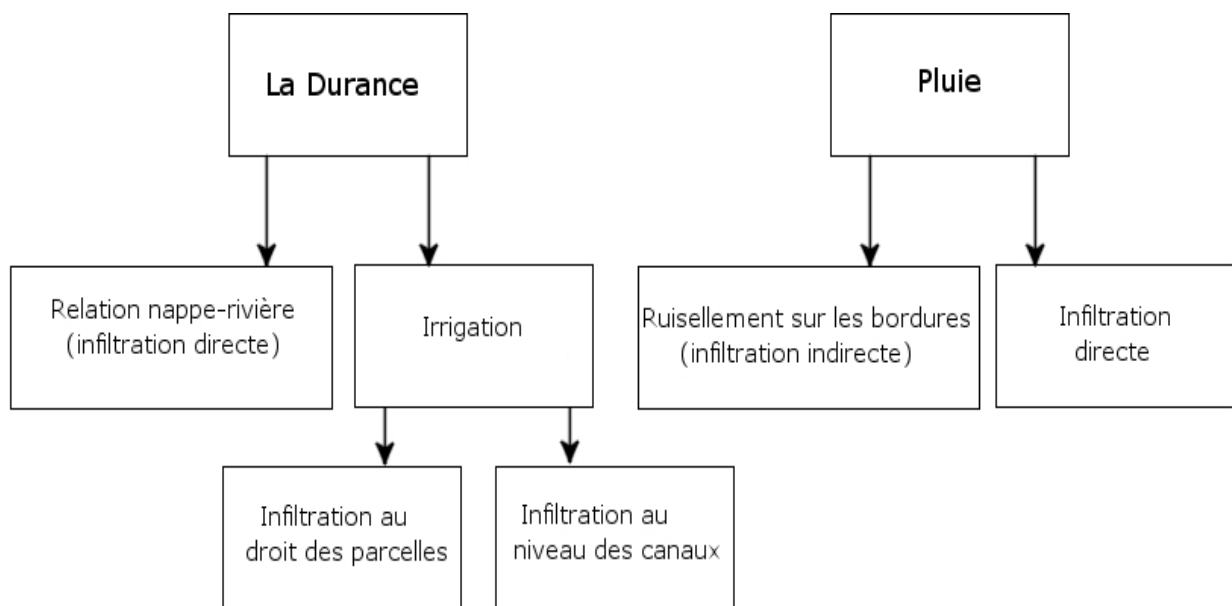


Figure 76. Schéma récapitulatif des sources de recharge de la nappe.

- On suppose que les infiltrations à partir des canaux eux-mêmes sont intégrées dans les volumes infiltrés calculés sur les parcelles irriguées qui représente une surface de 16.3 km².
- Les volumes d'entrée par la pluie peuvent varier en fonction de la surface considérée :

Volumes d'entrée par la pluie = excédent du bilan hydrique $\times$ surface.

Les calculs ici sont faits pour une surface de 70 km² (surface totale de la zone d'étude).

Le **Tableau 11** résume ces calculs pour l'année 2011.

Mois	Entrée par l'irrigation (Mm ³)	Entrée par la pluie (Mm ³)
Janvier-11	0	1.58
Février-11	0.16	0
Mars-11	0.86	0.45
Avril-11	1.91	0
Mai-11	3.0	0
Juin-11	2.78	0
Juillet-11	1.66	0
Août-11	3.94	0
Septembre-11	4.21	0
Octobre-11	3.6	0
Novembre-11	0.37	5.59
Décembre-11	0.23	0
Total	22.73	7.6

Tableau 11. Volumes moyens mensuels pour les entrées par l'irrigation et par la pluie.

2) Les sorties

Le Rhône, les pompages et l'évapotranspiration constituent les sorties principales de la nappe.

- Le Rhône : le débit moyen de sortie estimé par la loi de Darcy est de 2.8 m³/s (88 Mm³/an).
- Les pompages : sont de l'ordre de 0.4 m³/s (12.6 Mm³/an).
- L'évapotranspiration (déjà prise en compte dans les calculs du bilan hydrique) : est de 1.2 m³/s (39 Mm³/an).

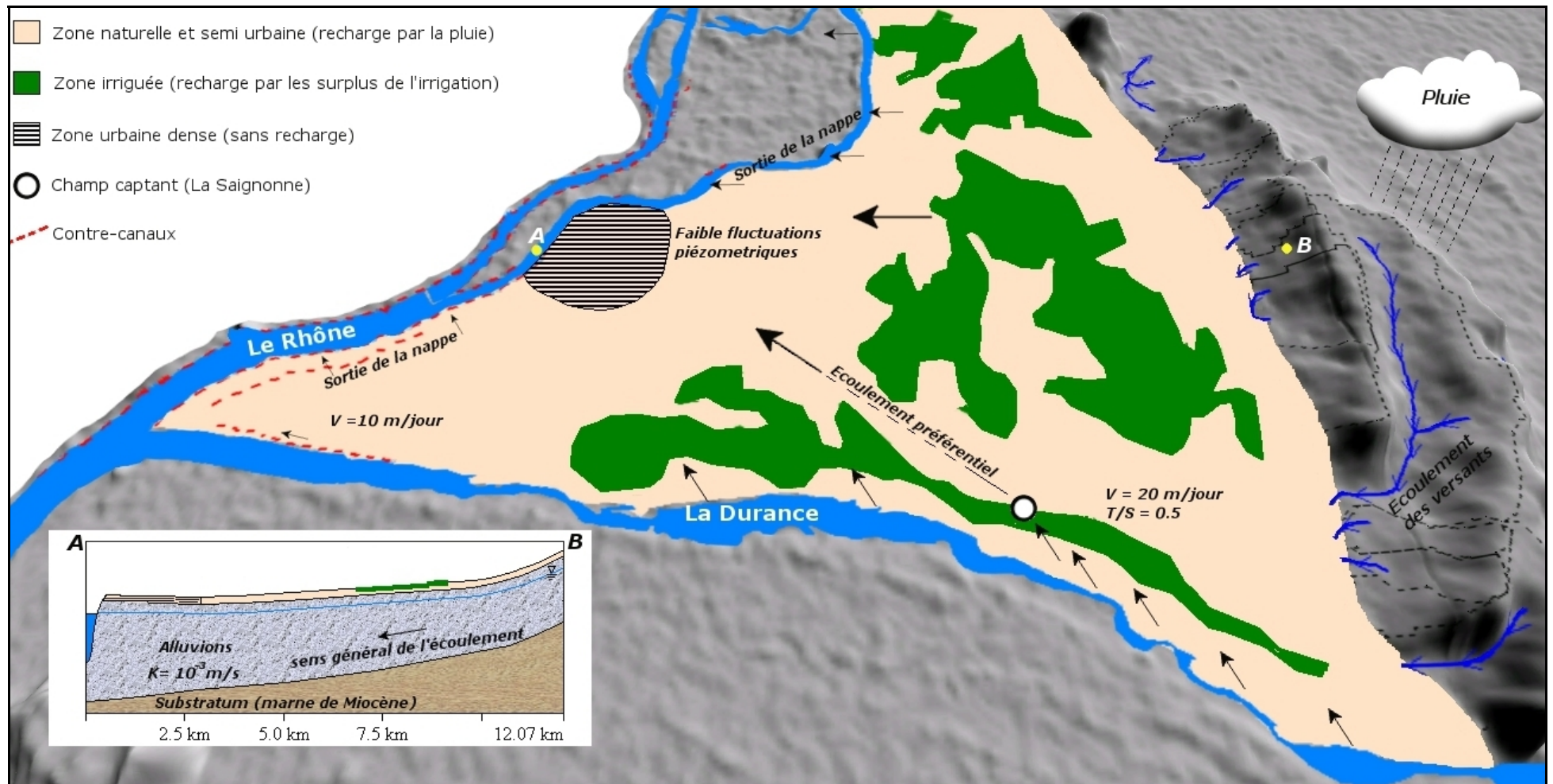


Figure 77. Modèle conceptuel applicable au modèle de flux mathématique.

6. MODÉLISATION DE DIVERS SCÉNARIOS

6.1. La modélisation numérique

Les modèles numériques sont utilisés lors de la présence des conditions aux limites complexes, où les paramètres varient dans le modèle (Zheng, 2002).

Par contre, la complexité du domaine souterrain rend impossible une simulation parfaite du système aquifère. Les hypothèses émises afin de réduire la complexité de l'aquifère, réduisent également la précision du modèle (Driscoll, 1986).

Le Visual MODFLOW (version 2010.1) a été utilisé afin de simuler l'écoulement souterrain pour la nappe d'Avignon. Ce logiciel MODFLOW a déjà été utilisé dans de nombreuses publications pour simuler le flux de l'eau souterraine (Osman et Bruen, 2002 ; Panagopoulos, 2012 ; SanJuan et Kolm, 1996 ; Wang et al., 2008 ; Xu et al., 2011). Ce logiciel a été développé par le U.S. Geological Survey (USGS), pour simuler en trois dimensions le flux d'eau souterraine dans les milieux poreux à l'aide de la méthode de différence finie (Harbaugh et Mc Donald, 1996 ; M.Mc Donald et A. Harbaugh, 1988).

MODFLOW a été conçu pour simuler les systèmes aquifères qui réalisent les conditions suivantes (Leake, 1997) :

- (1) saturés en eau
- (2) la loi de Darcy est applicable
- (3) la densité de l'eau souterraine est constante
- (4) les directions principales de la conductivité hydraulique ou la transmissivité ne varient pas dans le système.

Harbaugh et Mc Donald (1996) ont décrit l'écoulement de l'eau souterraine dans les milieux poreux pour MODFLOW par l'équation aux dérivés partielle du flux :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W - S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Où :

- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} sont des valeurs de la conductivité hydraulique au long des axes X, Y et Z en sachant que pour notre modèle, K a la même valeur en trois dimensions (le milieu est considéré comme isotrope).
- h est la charge hydraulique
- W est le flux volumétrique par unité de volume ; il représente les sources et/ou la sortie d'eau
- S_s est le coefficient d'emménagement spécifique du matériel poreux
- t est le temps.

6.1.1. Maillage du modèle et les conditions aux limites

La première phase de construction du modèle numérique concerne la définition de l'extension et de l'épaisseur de l'aquifère, le choix du nombre de couches et des conditions aux limites (Fetter, 2001).

Le modèle s'étend sur 70 Km² environ et couvre la zone d'Avignon entre le Rhône et la Durance. À l'Est, il s'arrête au niveau des pieds de colline de Morières afin de mieux cerner les limites du bassin géologique.

Le modèle est divisé par 112 rangées et 145 colonnes avec des mailles carrées de 100 m de côté.

La topographie du modèle a été générée à partir des données de MNT (Modèle Numérique du Terrain) fournies par la base de données SRTM produit à l'origine par la NASA (Administration national de l'aéronautique et de l'espace) avec 90 m de résolution (**Figure 78**). Les caractéristiques lithologiques et géométriques du substratum ont été mises en évidence par des forages installés dans la zone d'étude (**Figure 79**). Les détails des données de ces forages sont disponibles sur le site Infoterre de BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/>).

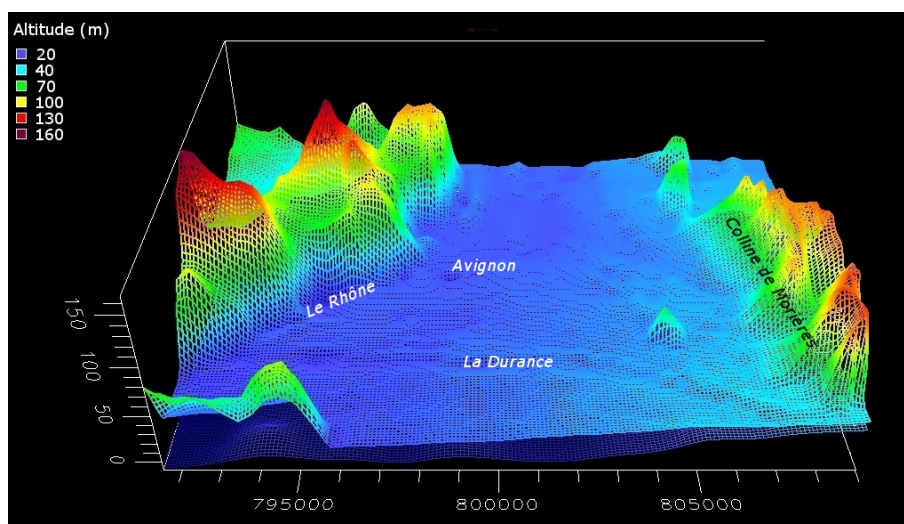


Figure 78. Le Modèle Numérique du Terrain (MNT).

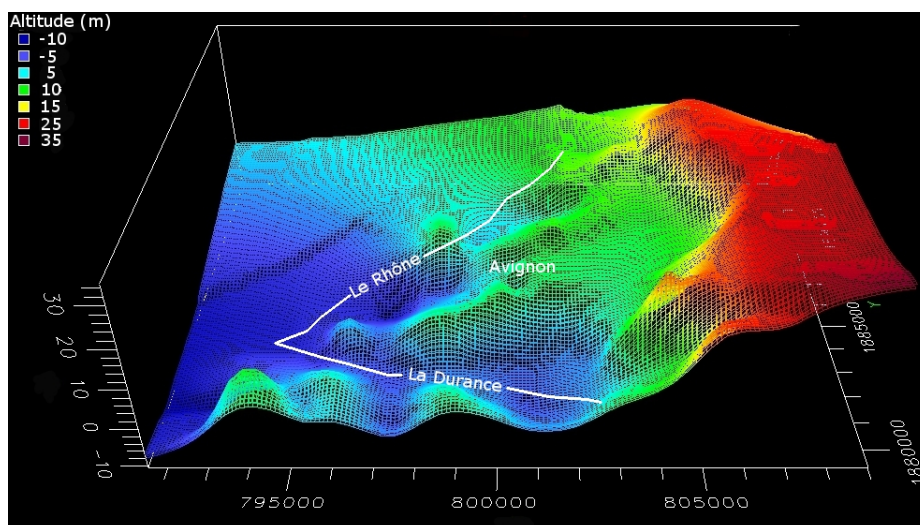


Figure 79. La géométrie du substratum de l'aquifère.

Les conditions aux limites nécessaires à la conception du modèle ont été définies à partir de la géologie, de la piézométrie, de l'hydrochimie et grâce aux données et informations ponctuelles. Trois types de conditions ont été retenus pour le modèle (**Figure 80**).

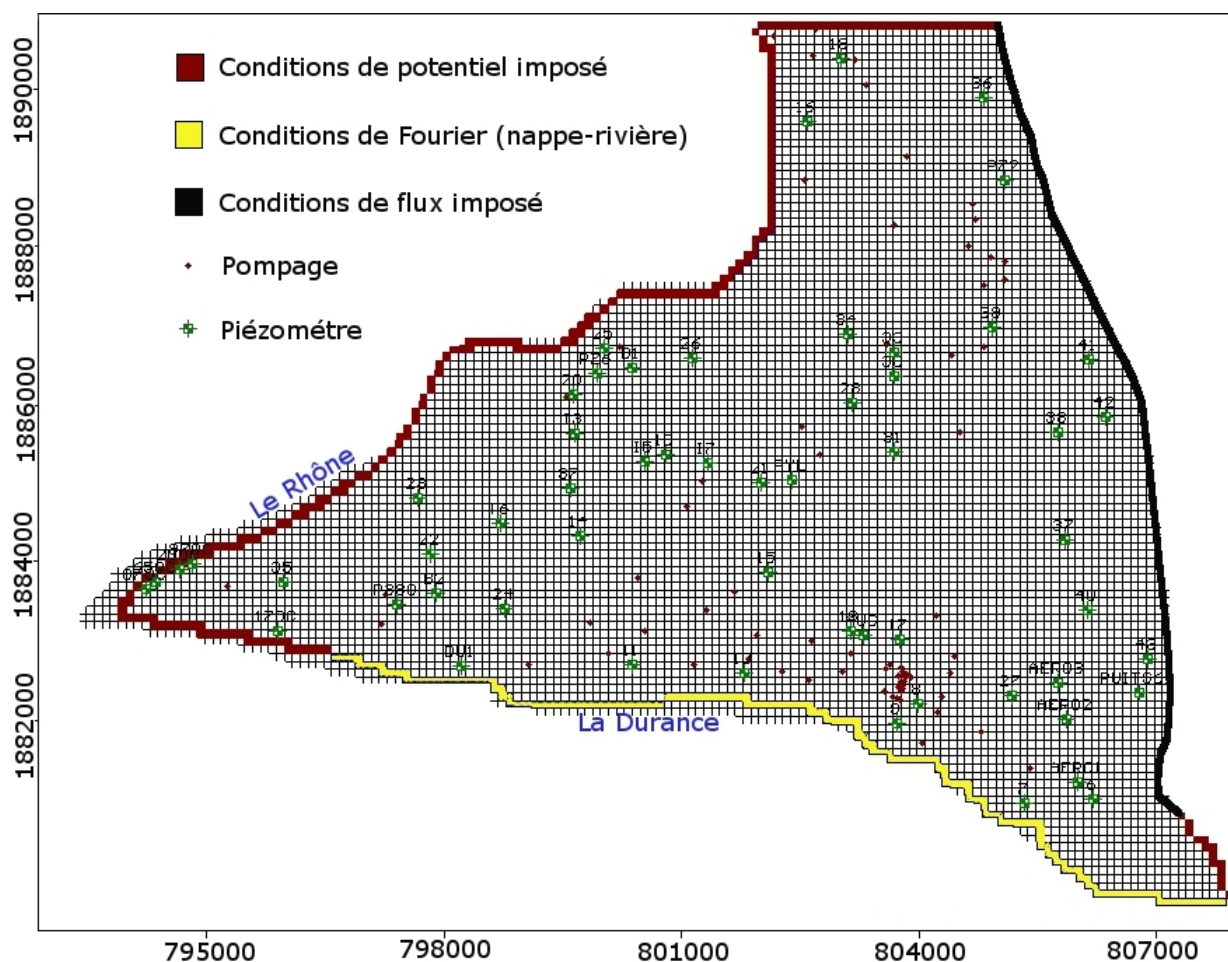


Figure 80. Les conditions aux limites.

Condition de potentiel imposé (condition de Dirichlet)

La limite dans ce cas est une surface équipotentielle où le niveau piézométrique de la nappe est localement imposé et constant par la présence d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau. Ce type de condition se rencontre au droit du Rhône et en partie aval de la Durance où on suppose que dans ces parties le cours d'eau, à l'aide des aménagements hydrauliques (contres-canaux), est en mesure soit d'évacuer toute l'eau de drainage qui arriverait sur lui, soit d'apporter toute l'eau nécessaire au maintien de la nappe sans variation piézométrique remarquable sur cette limite.

Condition de flux imposé non nul (condition de Neumann)

Cette condition indique que les échanges latéraux de la nappe avec l'extérieur du domaine du modèle sont présents. C'est le cas de la limite Est du modèle où la nappe reçoit une entrée d'eau par la pluie qui tombe sur le bassin versant constitué par la colline de Morières. On suppose ici que l'eau qui ruisselle ou s'infiltrate dans ce bassin versant finit dans la nappe (**Figure 81**)

Les calculs des volumes du flux entrant sont basés sur le bilan hydrique mensuel de la pluie et la superficie du bassin versant calculé pour la limite Est du modèle :

$$\text{Le flux (mm)} = \frac{\text{Pluie efficace (mm)} \times \text{superficie du bassin versant} \times \text{coefficient de ruissellement}}{\text{Superficie des cellules concernées dans le modèle}}$$

La superficie du bassin versant est de 10.8 km². Et le coefficient de ruissellement a été estimé à 0.5.

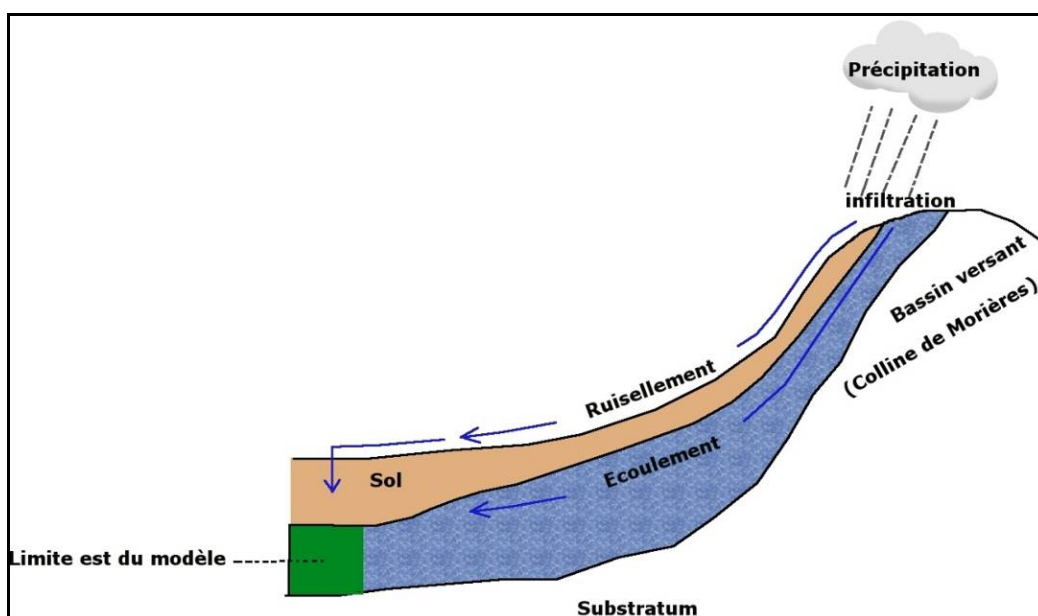


Figure 81. Schéma de l'hypothèse du flux imposé à la limite Est du modèle.

Condition de Fourier (échange nappe-rivière)

Cette condition hydraulique existe lorsqu'il y a un échange entre une nappe libre et une rivière dont le fond serait colmaté par une couche de vase peu perméable (Marsily, 2004).

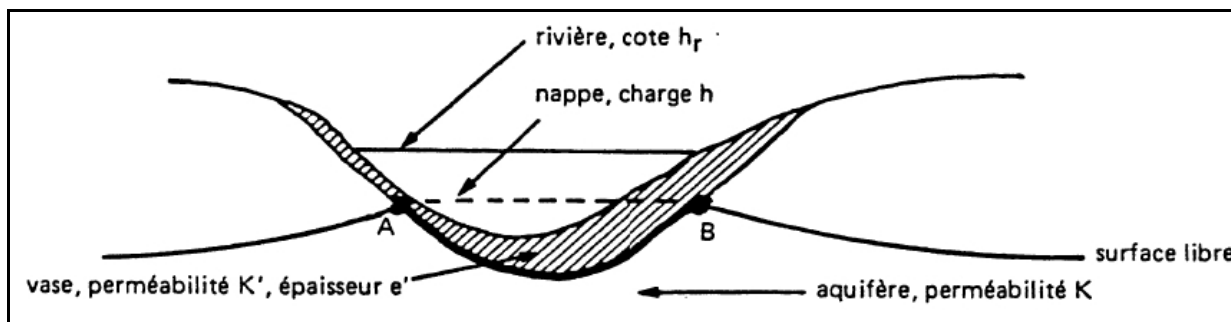


Figure 82. Relation nappe-rivière (condition de Fourier) d'après (Marsily, 2004).

La différence de charge $\Delta h = h \text{ (rivière)} - h \text{ (nappe)}$ crée le gradient nécessaire à l'écoulement (Figure 82). La condition de Fourier peut être décrite par l'équation :

$$-K \frac{\partial h}{\partial n} + \frac{K'}{e'} h = \frac{K'}{e'} h_r$$

Où

- $\vec{n}$ est la normale à la surface de contact orienté vers la rivière
- K' est supposé égale à $6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (de l'ordre de la valeur de la conductivité hydraulique estimé pour la couche de limon sur la zone d'étude).

Dans notre zone d'étude, la condition de Fourier existe entre la nappe et la Durance (à part les contres-canaux).

La connaissance de la ligne d'eau de la Durance permet de définir les échanges entre la nappe et la Durance.

6.1.2. La recharge

Il faut noter qu'un environnement majoritairement urbain est généralement caractérisé par une large hétérogénéité avec différents types de couvertures comme des bâtiments, routes, jardins, parcs, cultures... En outre, l'échelle des variations de la couverture du sol dépasse souvent la taille des cellules utilisée pour le modèle, ce qui rend le paramétrage de la couverture problématique.

Pour cela on a simplifié en divisant les zones de recharge en quelques classes uniformes (Figure 83) :

- 1) Zone de recharge par l'irrigation : il s'agit des volumes calculés auparavant par un bilan mensuel de débit (entrée-sortie) sur chaque canal d'irrigation divisés par la surface irriguée.
- 2) Zone naturelle non irriguée (recharge par la pluie) : la recharge est l'excédent de la pluie obtenu du bilan mensuel de Thornthwaite.
- 3) Zone semi urbaine : il s'agit d'une zone urbaine non dense. La recharge dans cette zone a été considérée égale à la moitié de la recharge par la pluie où on suppose que 50 % de la pluie va tomber sur les toits des bâtiments et être évacuée par des gouttières et des réseaux d'eau pluviale.
- 4) Zone rechargée par le bassin versant : il a été considéré que la pluie efficace tombée sur ce bassin versant (qui se trouve à l'est du modèle) va finir dans la limite Est du modèle. La recharge a été calculée après avoir calculé la superficie de ce bassin versant.
- 5) Zone de recharge nulle : cette zone correspond au site historique de la ville d'Avignon (intramuros) où le degré de la densification urbaine est considéré égal à 100% (Alkhalifeh, 2008).

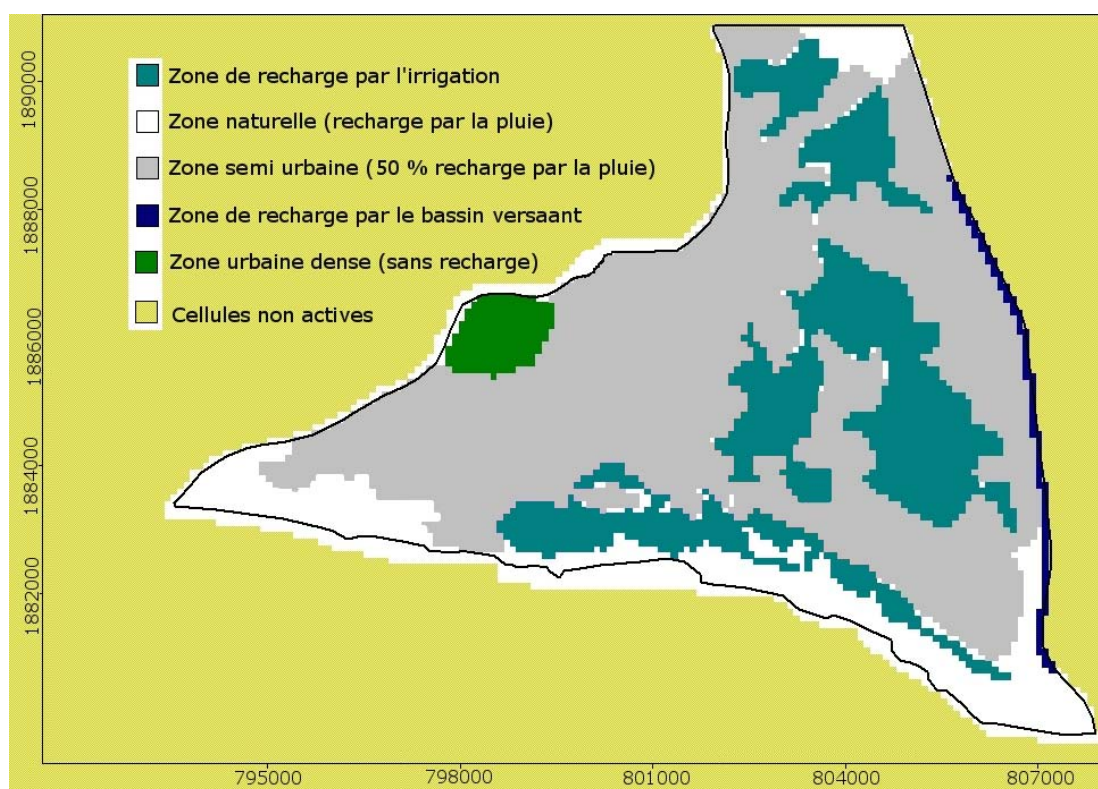


Figure 83. Les zones de recharge entrées dans le modèle.

6.1.3. Les pompages

Les prélèvements sont à usage agricole, industriel et domestique. La localisation et le débit des forages n'est pas connu de manière exhaustive (**Figure 80**). Le débit moyen journalier a été estimé à 20 m³/jour pour les forages agricoles et à 5 m³/jour pour les forages d'eau privés. Le débit de pompage moyen du champ captant de la Saignonne est de l'ordre de 32000 m³/jour.

6.2. Calage

Le but du calage du modèle est d'améliorer les paramètres hydrauliques introduits dans le modèle pour minimiser les différences entre la piézométrie simulée par le modèle et les observations du terrain.

Le modèle a été calé en régime permanent et en régime transitoire.

6.2.1. Le régime permanent

L'état piézométrique mesuré le 08/06/2011 a été retenu pour le calage du modèle en régime permanent. Les valeurs de la recharge retenues pour le régime permanent sont des valeurs annuelles moyennes calculées en (mm) (**Tableau 12**).

Zone irriguée			Zone naturelle	Zone rechargée par le B.V Est	Zone semi urbaine	Zone urbaine dense
Crillon	Hôpital	Puy	135	790	69	0
1400	707	804				

Tableau 12. Les valeurs de la recharge introduite dans le modèle en (mm) en régime permanent.

Le niveau du Rhône et ses contres-canaux (considérés comme constants) a été estimé à partir des données topographiques du site Géoportail (www.geoportail.gouv.fr).

Les hauteurs d'eau n'étant pas mesurées en continu à l'aval du barrage de Bonpas, une approximation de ces hauteurs d'eau en Durance a été réalisée à partir des mesures des hauteurs observées automatiquement à la station de Bonpas. A partir des données de mesures horaires fournies par le SPC Grand Delta, nous avons calculé au niveau de cette échelle la hauteur limnimétrique moyenne sur un mois. Nous nous sommes ensuite basés sur les cotes mesurées en Durance en étiage par le SMAVD en 2009.

Sur le secteur d'Avignon, la Durance présente un premier tronçon où l'écoulement est relativement naturel (tronçon situé entre l'aval du barrage de Bonpas et l'amont du premier seuil ; seuil 66), puis un second tronçon où les cotes sont contraintes par 4 seuils successifs.

Nous avons utilisé les relations hauteur/hauteur mises en évidence entre la station limnimétrique de Bonpas et les deux autres points de contrôle suivis ponctuellement (pont de la RN7 et seuil 68 ; cf chapitre3).

Afin de calculer les cotes du lit de la rivière, la hauteur d'eau mesurée a été soustraite des cotes mesurées en étiage 2009. Ensuite, pour quatre points du premier tronçon (points 1, 2, 3 et 4 de la **Figure 84**), les cotes calculées ont été augmentées d'une hauteur équivalente à l'augmentation estimée au pont de la RN7. Et pour trois points du second tronçon (points 5, 6, 7 de la **Figure 84**), elles ont été augmentées d'une hauteur équivalente à celle estimée au seuil 68.

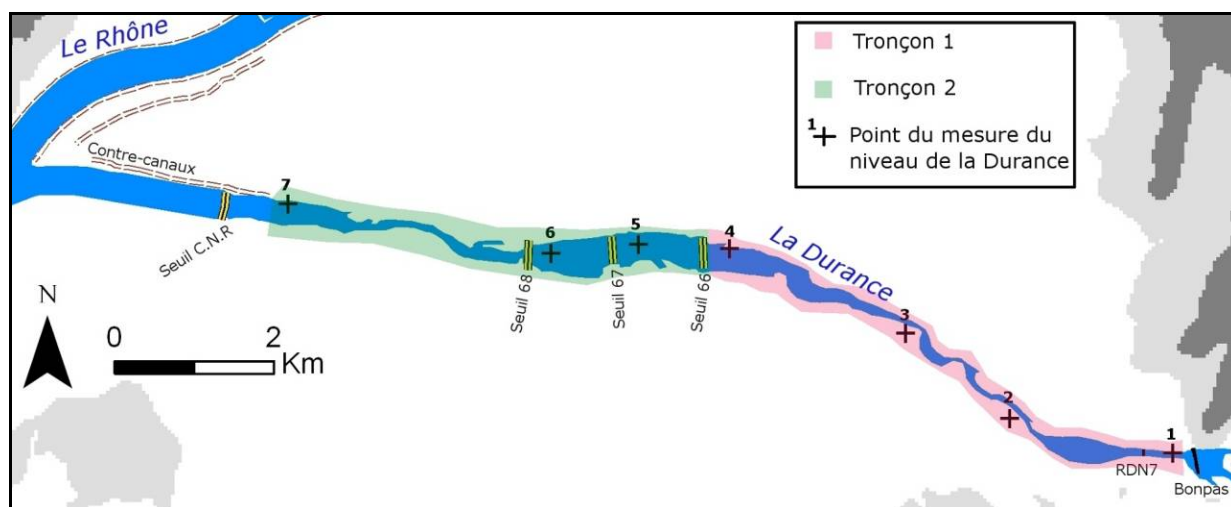


Figure 84. Les points de mesures du niveau de la Durance et les pentes de la rivière.

Le niveau des contres-canaux sur la Durance sont estimés par leurs niveaux mesurés moyens. En dehors du Rhône, la Durance et les contres canaux, les niveaux d'eau constants (potentiel imposé) sont estimés à partir des valeurs piézométriques moyennes.

La valeur de la perméabilité a été modifiée afin de minimiser les écarts entre la piézométrie calculée et la piézométrie observée.

Après la calibration, une répartition spatiale de la perméabilité a été déterminée (**Figure 85**).

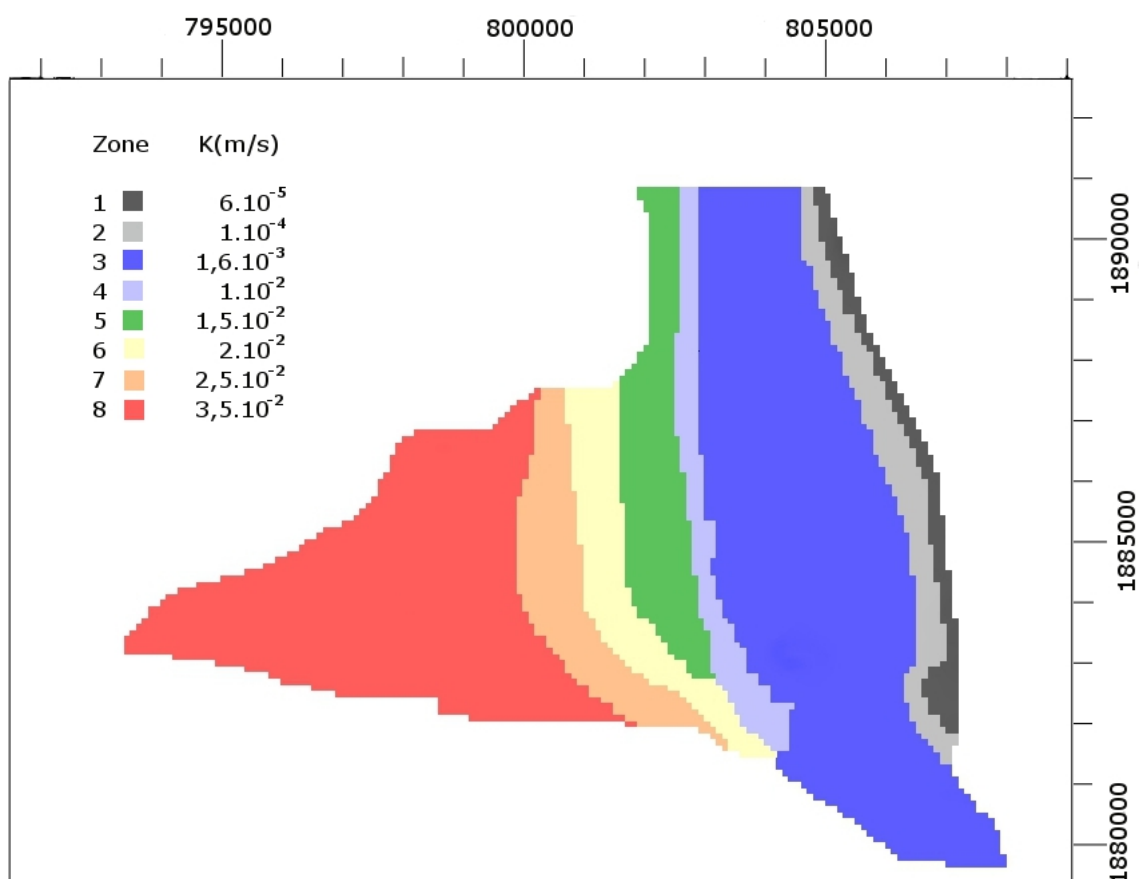


Figure 85. Répartition spatiale de la perméabilité de la couche aquifère.

Les valeurs de la perméabilité ont été limitées entre 6.10^{-5} m/s et $3.5.10^{-2}$ m/s ce qui est généralement conforme à la nature des matériaux du réservoir et reste dans les marges des paramètres hydrodynamiques donnés par des essais de pompage. Toutefois, afin d'éviter tout dénoyage des cellules à la limite Est du modèle où le réservoir devient beaucoup moins épais, la valeur de perméabilité a été réduite à cet endroit du modèle afin de compenser la transmissivité ($T=K.e$).

Afin d'estimer la qualité du calage, les charges calculées et observées sont comparées par un diagramme de dispersion (**Figure 86**). Pour les 56 points de mesures considérés, la moyenne quadratique normalisée est de 3.9% et le coefficient de corrélation est de 99% ce qui indique une très bonne corrélation pour la plupart des points d'observation. Toutefois, les écarts augmentent en amont de la nappe dans les zones de la recharge par l'irrigation et par la pluie.

Néanmoins, le modèle en régime permanent simule généralement de manière satisfaisante le comportement du système (**Figure 87**).

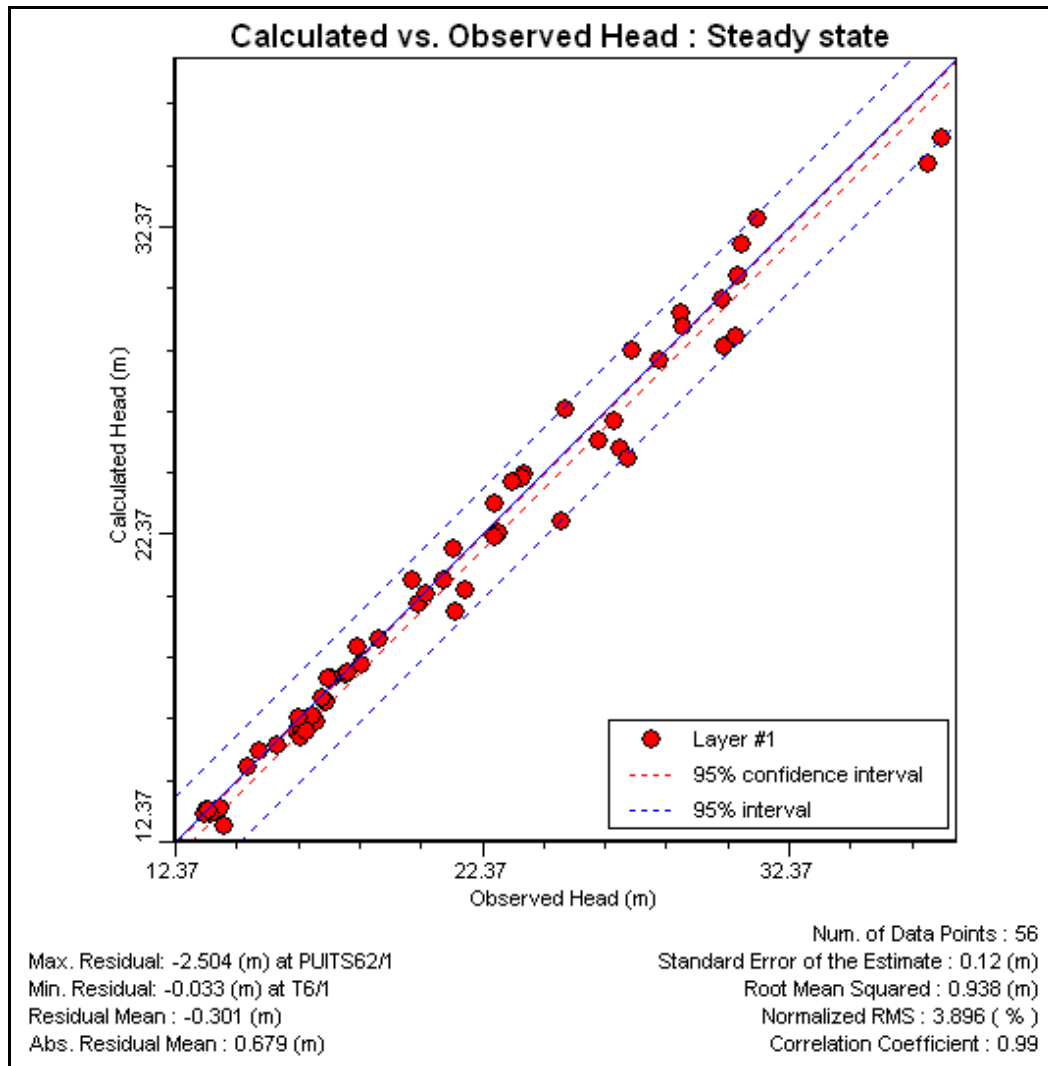


Figure 86. Comparaison entre la charge hydraulique calculée et la charge hydraulique observée en régime permanent.

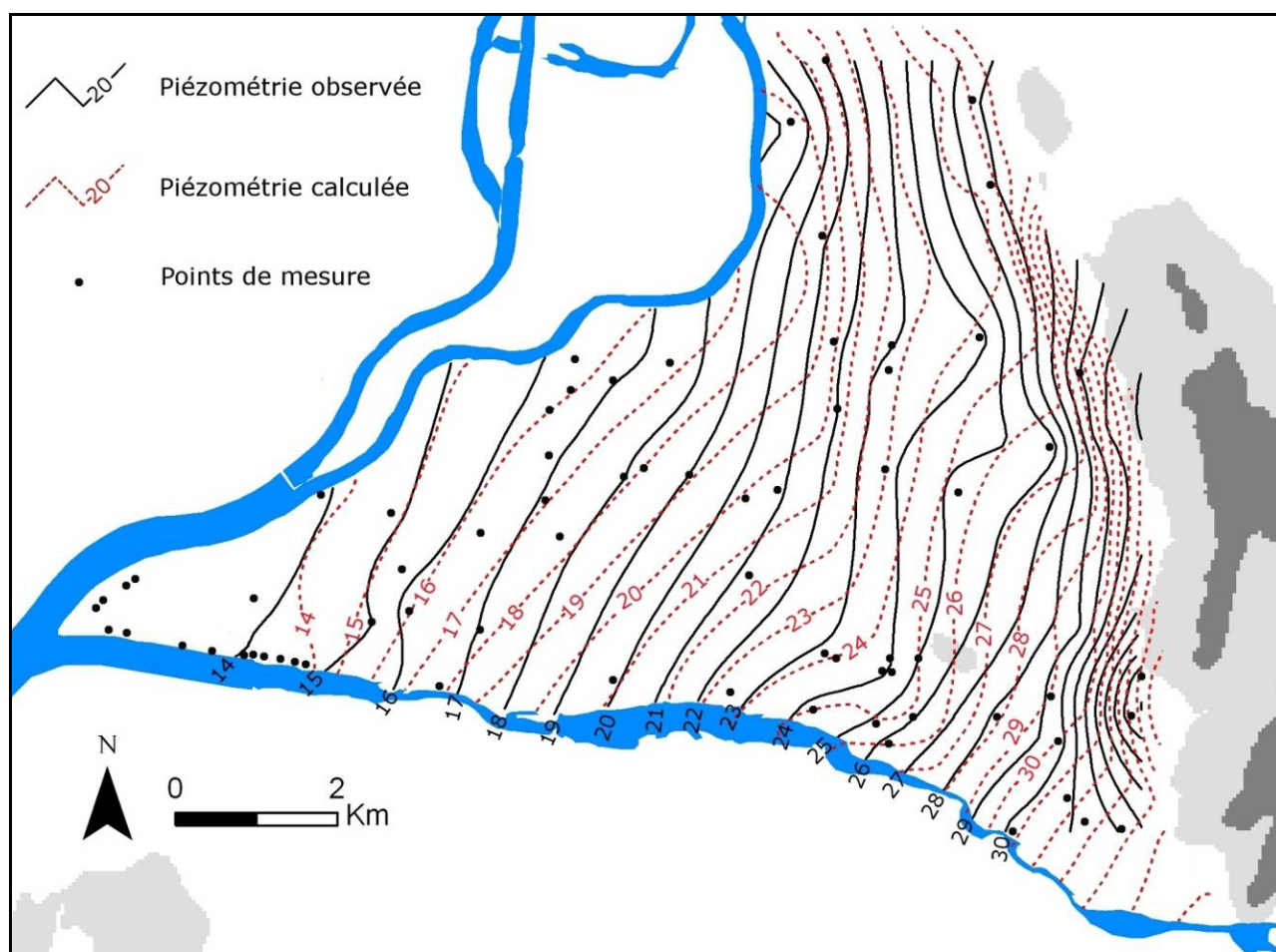


Figure 87. Comparaison entre la piézométrie observée (juin 2011) et la piézométrie calculée par le modèle en régime permanent.

6.2.1.1. *Bilan en régime permanent*

Le bilan des flux permet de vérifier le modèle et d'identifier l'importance relative des flux (Andersen, 1993).

Le bilan des flux présente les volumes qui entrent et qui sortent du système aquifère à travers de ses conditions aux limites (**Tableau 13** et **Figure 88**).

Le bilan montre que l'alimentation de la nappe par la Durance constitue la principale entrée du système ($643880 \text{ m}^3/\text{jour}$) malgré les importants volumes sortants ($500420 \text{ m}^3/\text{jour}$) surtout dans sa partie aval qui draine la nappe via les contres-canaux.

L'infiltration nette (entrée-sortie) à partir de la Durance est donc de l'ordre $143000 \text{ m}^3/\text{jour}$. La recharge composée de la pluie et des surplus d'irrigation est de l'ordre de $64000 \text{ m}^3/\text{jour}$. Les apports en provenance des versants à l'Est sont de l'ordre de $2000 \text{ m}^3/\text{jour}$. Les échanges entre la nappe et sa limite nord sont faibles de l'ordre de $200 \text{ m}^3/\text{jour}$. Les volumes drainés par le Rhône ($347800 \text{ m}^3/\text{jour}$) sont plus importants que les volumes apportés vers la nappe ($170350 \text{ m}^3/\text{jour}$).

	Entrées (m ³ /jour)	Entrées (Mm ³ /an)	Sorties (m ³ /jour)	Sorties (Mm ³ /an)	Entrée – Sortie (m ³ /jour)	Entrée – Sortie (Mm ³ /an)
Pompages	0	0	34335	12.5	-34335	-12.5
La recharge	64734	23.6	0	0	64734	23.6
Le Rhône	170350	61.3	347800	125.2	-177450	-63.8
La Durance	643880	235	500420	182.6	143460	52.3
Limite nord	13573	4.9	13806	5	-233	-0.1
Limite est	3230	1.1	1102	0.4	2128	0.8
Total	895767	326.9	897463	327.5	-1696	0.2

Tableau 13. Termes du bilan global en régime permanent de la nappe alluviale d'Avignon.

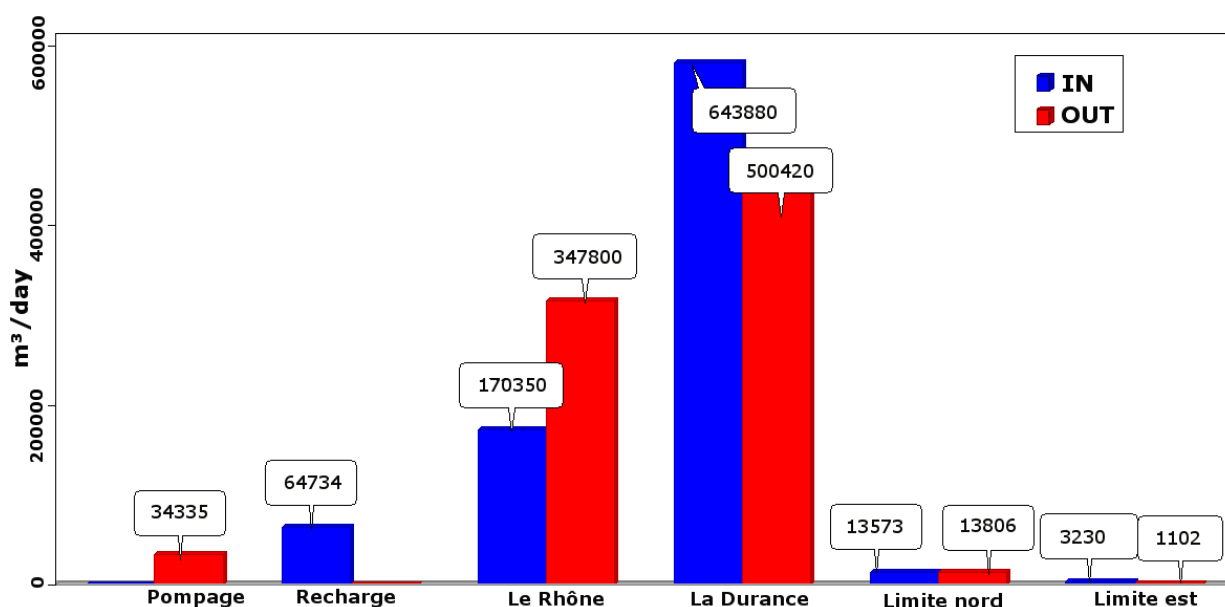


Figure 88. Bilan des flux (en m³/jour) du modèle en régime permanent.

6.2.2. Le régime transitoire

Le modèle en régime transitoire a été calé durant la période 2010- 2012 avec un pas de temps mensuel (36 mois). Les valeurs de la recharge et le niveau de la Durance ont été modifiés au cours du temps.

La recharge :

La part de la pluie dans la recharge a été calculée à partir du bilan hydrique mensuel et la part de l'irrigation a été calculée pour le canal Crillon alors que des valeurs moyennes mensuelles ont été retenues pour le canal Puy et le canal Hôpital.

Les valeurs de recharge introduites dans le modèle en régime transitoire sont données en millimètre dans le **Tableau 14**.

N° du jour	Date correspondante (mois)	Zone irriguée			Zone naturelle	Zone rechargée par le B.V Est	Zone semi urbaine	Zone urbaine dense
		Crillon	Hôpital	Puy				
30	Janv-10	0	0	0	49	279	24	0
58	Fév-10	0	50	0	24	139	12	0
89	Mars-10	0	183	106	0	0	0	0
119	Avr-10	46	153	143	0	0	0	0
150	Mai-10	4	0	37	0	0	0	0
180	Juin-10	168	124	0	0	0	0	0
211	Juil-10	294	24	1	0	0	0	0
242	Août-10	346	52	86	0	0	0	0
272	Sept-10	0	3	152	0	0	0	0
303	Oct-10	71	2	255	36	207	18	0
333	Nov-10	22	41	25	40	230	20	0
364	Déc-10	0	75	0	9	50	4	0
395	Janv-11	0	0	0	23	129	11	0
423	Fév-11	0	50	0	0	0	0	0
454	Mars-11	0	183	106	6	37	3	0
484	Avr-11	99	153	143	0	0	0	0
515	Mai-11	296	0	37	0	0	0	0
545	Juin-11	230	124	0	0	0	0	0
576	Juil-11	151	24	1	0	0	0	0
607	Août-11	339	52	86	0	0	0	0
637	Sept-11	363	3	152	0	0	0	0
668	Oct-11	278	2	255	0	0	0	0
698	Nov-11	17	41	25	80	456	40	0
729	Déc-11	0	75	0	0	0	0	0
760	Janv-12	0	0	0	0	0	0	0
789	Fév-12	0	50	0	0	0	0	0
820	Mars-12	53	183	106	0	0	0	0
850	Avr-12	132	153	143	0	0	0	0
881	Mai-12	34	0	37	0	0	0	0
911	Juin-12	348	124	0	0	0	0	0
942	Juil-12	266	24	1	0	0	0	0
973	Août-12	288	52	86	0	0	0	0
1003	Sept-12	101	3	152	0	0	0	0
1034	Oct-12	0	2	255	0	0	0	0
1064	Nov-12	18	41	25	7	42	4	0
1095	Déc-12	0	75	0	1	8	1	0

Tableau 14. Les valeurs mensuelles de la recharge (en mm) utilisées en régime transitoire.

La Durance :

Pour évaluer l'évolution des niveaux d'eau de la Durance au cours du temps, nous avons suivi le même principe qu'en régime permanent pour chaque pas de temps.

Les hauteurs et les niveaux calculés pour le régime transitoire sont donnés en **annexe 3**.

En modifiant la répartition spatiale de la valeur du coefficient d'emmagasinement (S_y) (**Figure 89**). Les autres paramètres d'emmagasinement ont été entrés aussi comme la porosité totale, la porosité effective et le coefficient d'emmagasinement spécifique (S_s).

Afin de comparer la piézométrie calculée et la piézométrie observée, quelques piézomètres localisés dans différentes zones ont été sélectionnés (**Figure 90**).

Les variations piézométriques calculées représentent généralement la tendance des variations piézométriques observées avec tout de même des écarts qui résultent d'une part d'une mauvaise estimation des paramètres d'entrée comme la recharge et la transmissivité et d'autre part le pas de temps mensuel qui ne prend pas en compte les variations de courte durée (**Figure 91**).

- Les meilleures simulations sont situées généralement dans la zone aval ; une zone urbaine homogène (N° 14, 22, 26) et la zone de confluence Rhône-Durance (N° 35), avec des variations piézométriques assez stables.
- Les simulations pour les points situés en zones irriguées (N° 18, 30, 33) sont proches de la réalité avec des écarts de niveau piézométrique inférieurs à 1 m. De toutes façons ces écarts varient d'un secteur irrigué à un autre et dépendent surtout de la localisation du point considéré car les parcelles ne sont pas forcément irriguées au même moment et avec la même quantité. Des améliorations peuvent être apportées avec une meilleure répartition de l'irrigation et en considérant les volumes d'eau entrants pour chaque parcelle et la date précise de l'irrigation.
- Concernant la zone Durance (N° 8 et 9), les simulations respectent la tendance générale des variations mais avec un écart d'un mètre environ. Cet écart peut-être dû à l'incertitude des hypothèses sur le niveau d'eau de la Durance.
- La tendance générale des variations piézométriques dans la zone amont est aussi respectée (N°:43) par les simulations mais avec un écart important (de l'ordre de 2 m) ce qui reflète la mauvaise estimation de la recharge par la pluie dans cette zone.
- Sont plus ou moins mal simulées les variations piézométriques des points localisés dans des zones où plusieurs éléments du système hydrologique peuvent intervenir dont une ou plusieurs sont mal connus (zone mélange). Par exemple les points N° 27 et 39 sont considérés dans une zone urbaine, alors que les simulations ont tendance à sous-estimer les amplitudes de variations du niveau. Cela peut être lié à l'effet que les canaux eux-mêmes n'étaient pas pris en compte dans le modèle.

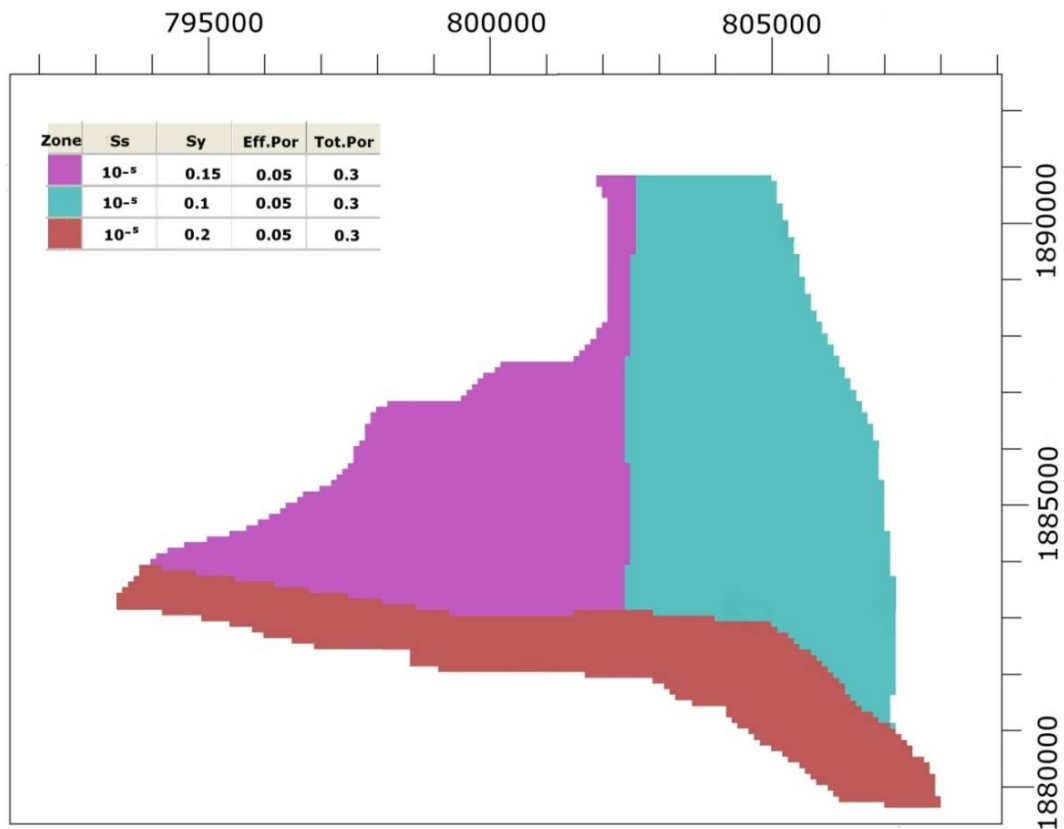


Figure 89. Répartition du coefficient d'emménagement (Specific yield Sy).

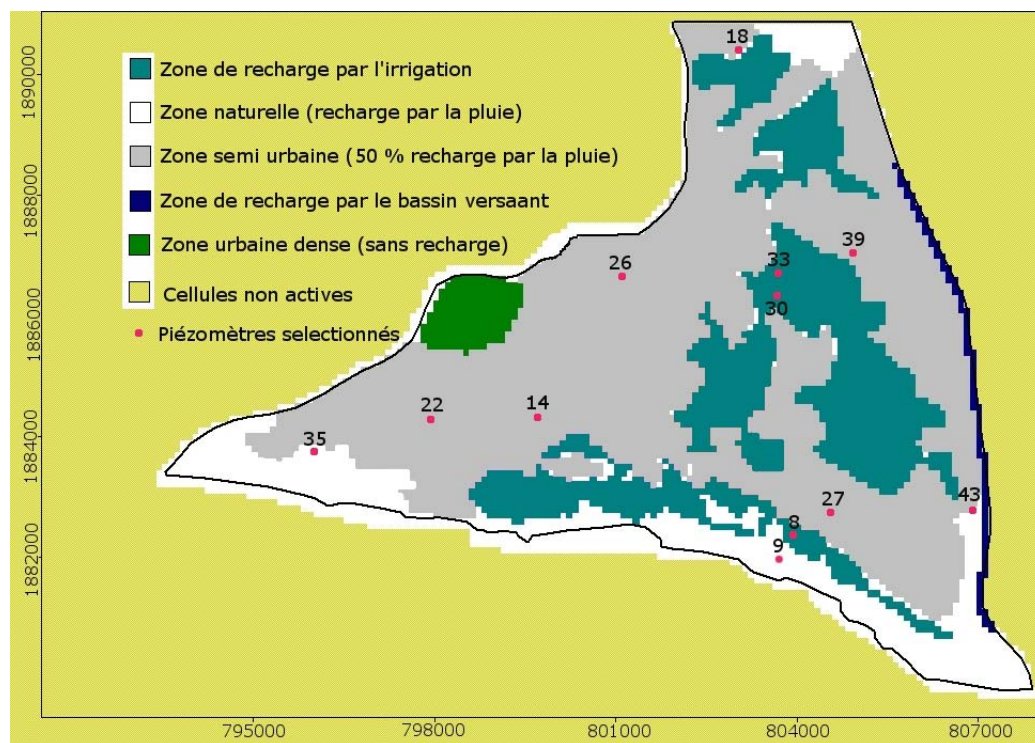


Figure 90. Les zones de recharge avec la localisation des points sélectionnés pour la comparaison entre la piézométrie observée et la piézométrie calculée.

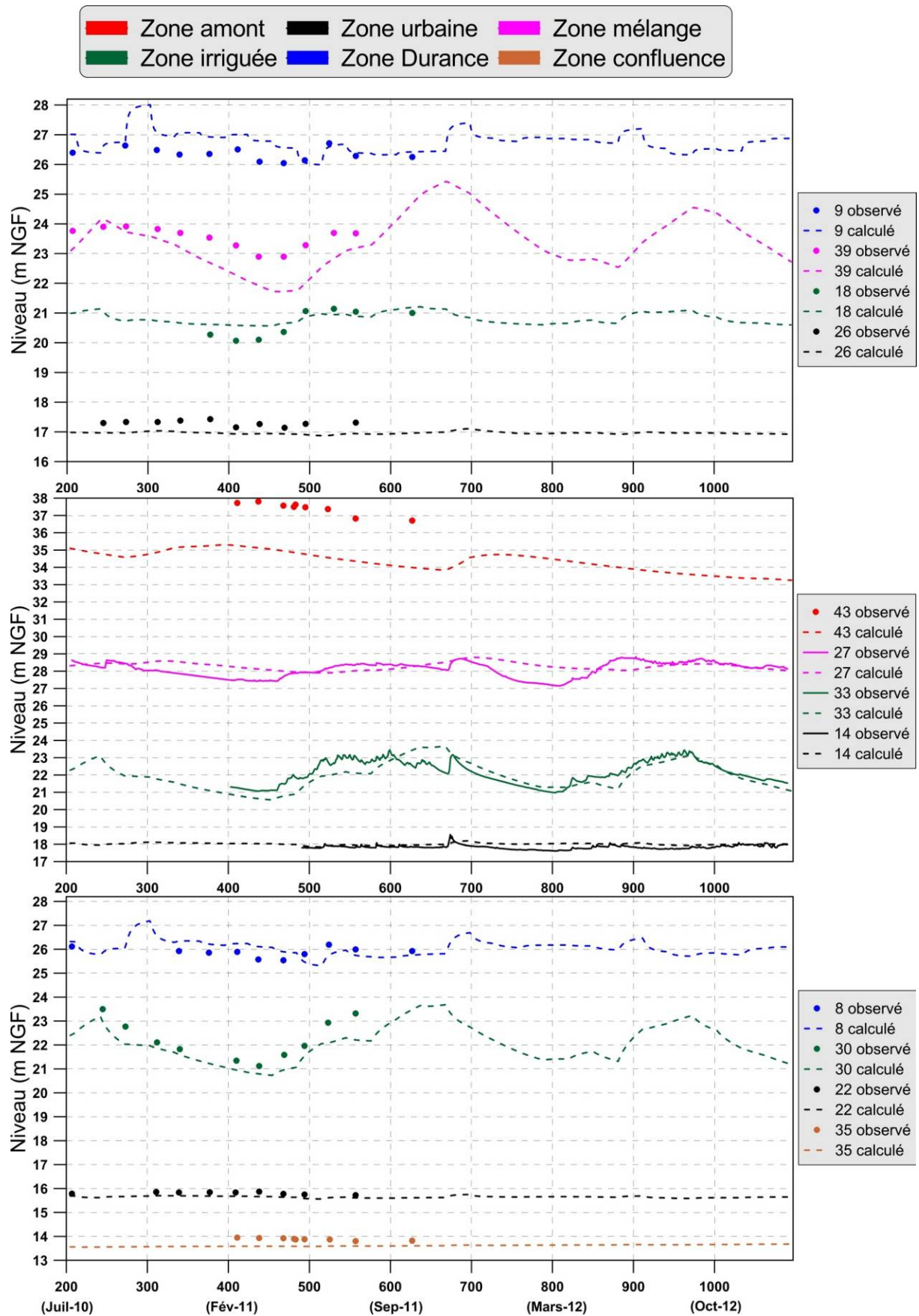


Figure 91. Les variations piézométriques temporelles calculées et observées dans des différentes zones.

6.2.2.1. Bilan en régime transitoire

Le bilan du modèle en régime transitoire confirme la principale entrée du système est la Durance (**Figure 92** et **Tableau 15**) avec un volume annuel de 70 Mm³. Le Rhône représente la sortie principale du système en drainant la nappe sur la majorité de sa longueur avec un volume moyen annuel de 90 Mm³/an.

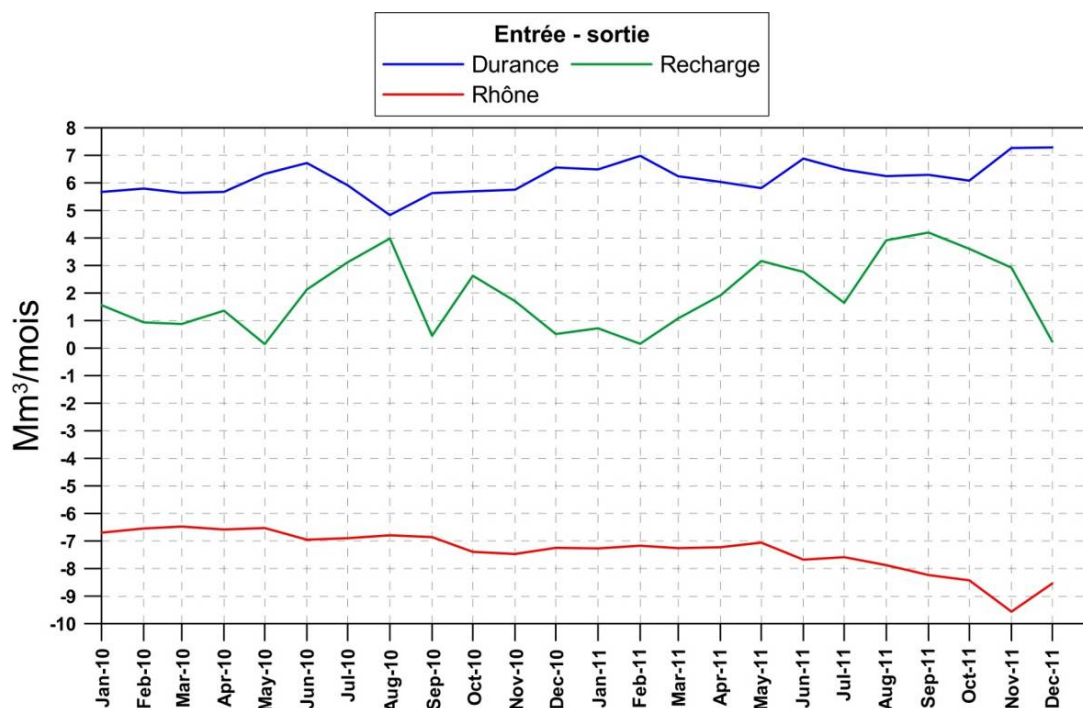


Figure 92. Les principales entrées - sorties calculées par le modèle pour la période 2010-2011.

Mois	Recharge (pluie + irrigation)	La Durance	Le Rhône	Limite Est	Limite Nord	ΔStock	Pompage
Janv-11	0.72	6.49	-7.27	-0.01	0.51	0.69	-1.14
Févr-11	0.14	6.3	-6.48	-0.07	0.55	0.7	-1.03
Mars-11	1.08	6.24	-7.26	-0.03	0.55	0.56	-1.14
Avr-11	1.85	5.84	-6.99	-0.01	0.47	-0.1	-1.11
Mai-11	3.16	5.81	-7.06	0.06	0.44	-1.27	-1.14
Juin-11	2.68	6.66	-7.43	-0.04	0.42	-1.23	-1.11
Juil-11	1.65	6.48	-7.59	0.00	0.46	0.14	-1.14
Août-11	3.92	6.24	-7.88	0.01	0.37	-1.54	-1.14
Sept-11	4.06	6.09	-7.97	0.00	0.35	-1.45	-1.11
Oct-11	3.60	6.08	-8.43	-0.01	0.36	-0.47	-1.14
Nov-11	2.83	7.03	-9.25	0.01	0.39	0.10	-1.11
Déc-11	0.24	7.29	-8.54	-0.04	0.49	1.70	-1.14
Total	25.93	76.54	-92.13	-0.13	5.37	-2.16	-13.44

Tableau 15. Volumes mensuels (entrants – sortants) en Mm³ pour les principales composantes du bilan calculé par le modèle pour l'année 2011.

Les résultats du modèle semblent cohérents avec les calculs de différents éléments du bilan du système. Avec les volumes d'entrée par l'irrigation qui sont de l'ordre de 22 Mm^3 , la part de la pluie semble minimale (de 3 Mm^3). La variation de stock, calculée par le modèle, est tout à fait comparable avec la valeur trouvée par les mesures piézométriques en 2011 entre la période de hautes eaux et basses eaux (*cf* partie régime de la nappe).

6.2.2.2. *Le sens et la vitesse d'écoulement*

Le modèle calibré en régime transitoire a été analysé avec MODPATH (Pollock, 1989). Le temps de transit et les trajets d'écoulement ont été obtenus par le suivi de particules injectées sur les limites de la zone modélisée. Cela nous a permis de distinguer les zones d'influence de la Durance et du Rhône et le parcours possible des écoulements (**Figure 93**). La Durance semble alimenter la nappe dans sa partie amont avec une vitesse d'écoulement qui est environ de 9 m/jour et qui augmente à l'aval du champ captant et surtout à l'aval des seuils sur la Durance où les flux continuent dans la direction nord-ouest vers la zone urbaine avec une vitesse de l'ordre de 100 m/jour. Le Rhône draine la nappe sur la majorité de sa longueur mais il se peut qu'il alimente la nappe sur une petite zone dans son aval.

Les écoulements à partir de la limite Est possèdent généralement une vitesse faible en amont de l'ordre de 3 m/jour qui augmente vers l'aval pour atteindre des valeurs de l'ordre de 10 à 20 m/jour (**Figure 94**).

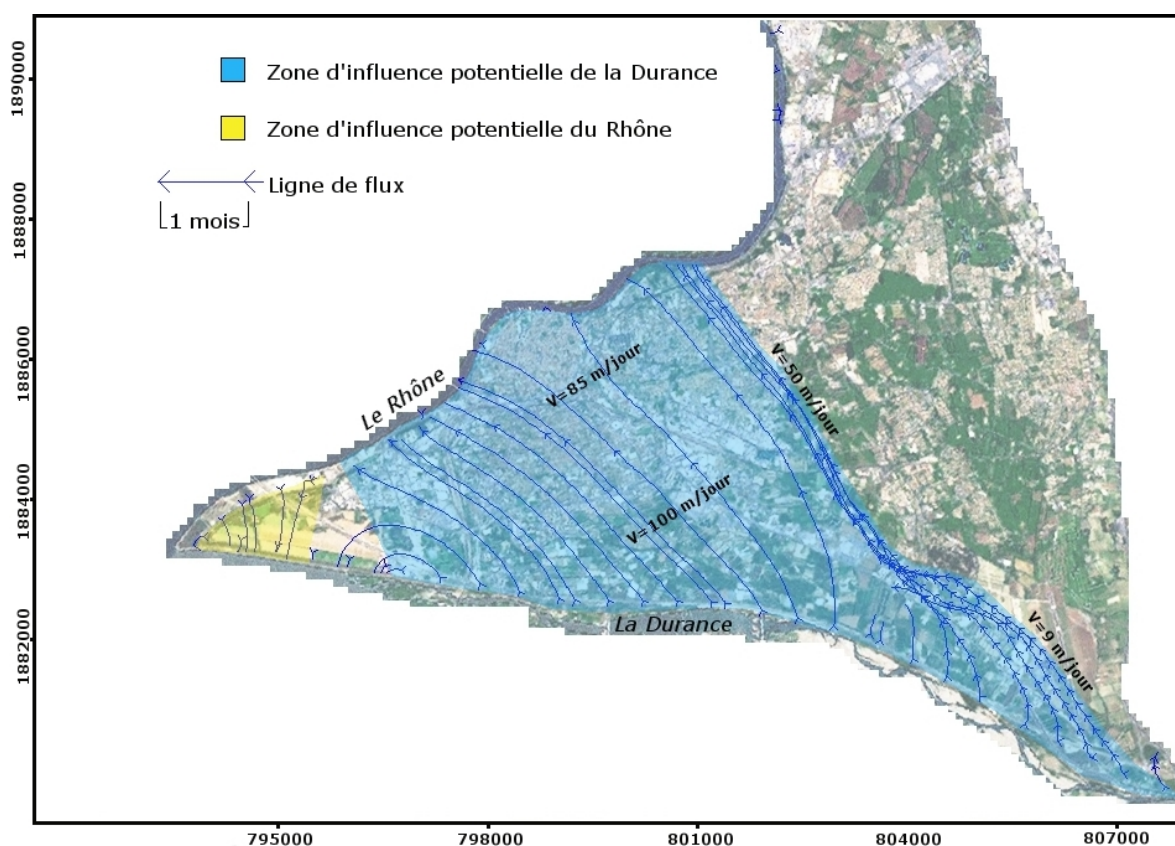


Figure 93. Les zones d'influence du Rhône et de la Durance estimées par le modèle.

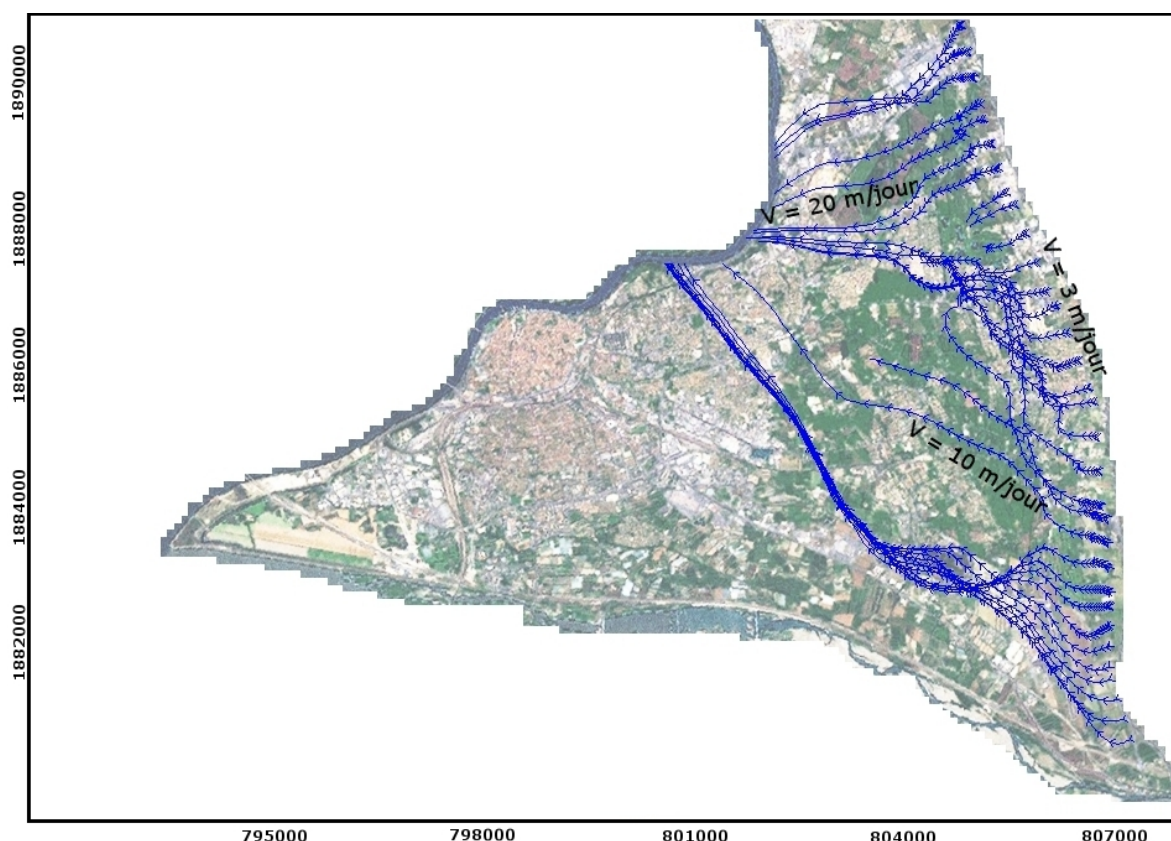


Figure 94. Le temps de transit estimé par le modèle pour les écoulements à partir de la limite est.

6.3. Analyses de sensibilité

Les incertitudes des résultats des simulations peuvent provenir essentiellement des paramètres hydrodynamiques, géologiques et des conditions aux limites. La conductivité hydraulique (K), la recharge (en régime permanent) et le coefficient d'emmagasinement (en régime transitoire) ont été modifiés dans les marges possibles de leurs variations afin d'identifier à quel paramètre la simulation de flux est le plus sensible (**Figure 95**).

Les résultats de modifications des paramètres choisis ont été observés sur 4 piézomètres (par ordre de localisation de l'amont vers l'aval) : 43, 27, 33 et 14.

Généralement, la modification des paramètres n'a pas un effet remarquable sur la calibration du modèle (RMS reste faible) excepté pour des valeurs extrêmes de la conductivité hydraulique K (pour $K < K * 0.4$). Pour des valeurs plus que ($K * 1.4$) le modèle ne fonctionne pas.

Le niveau piézométrique est plus sensible aux modifications de recharge avec une réponse qui varie en fonction de la localisation des piézomètres ; une réponse plus ample pour les points 33 et 43 localisés dans une zone de recharge. Le modèle ne fonctionne pas pour une recharge divisée par 2. Les modifications du coefficient d'emmagasinement n'ont pas un impact considérable sur les niveaux piézométriques simulés.

Les modifications des paramètres ont eu très peu d'effet sur le niveau piézométrique pour le piézomètre 14 situé en aval de la nappe en zone urbaine.

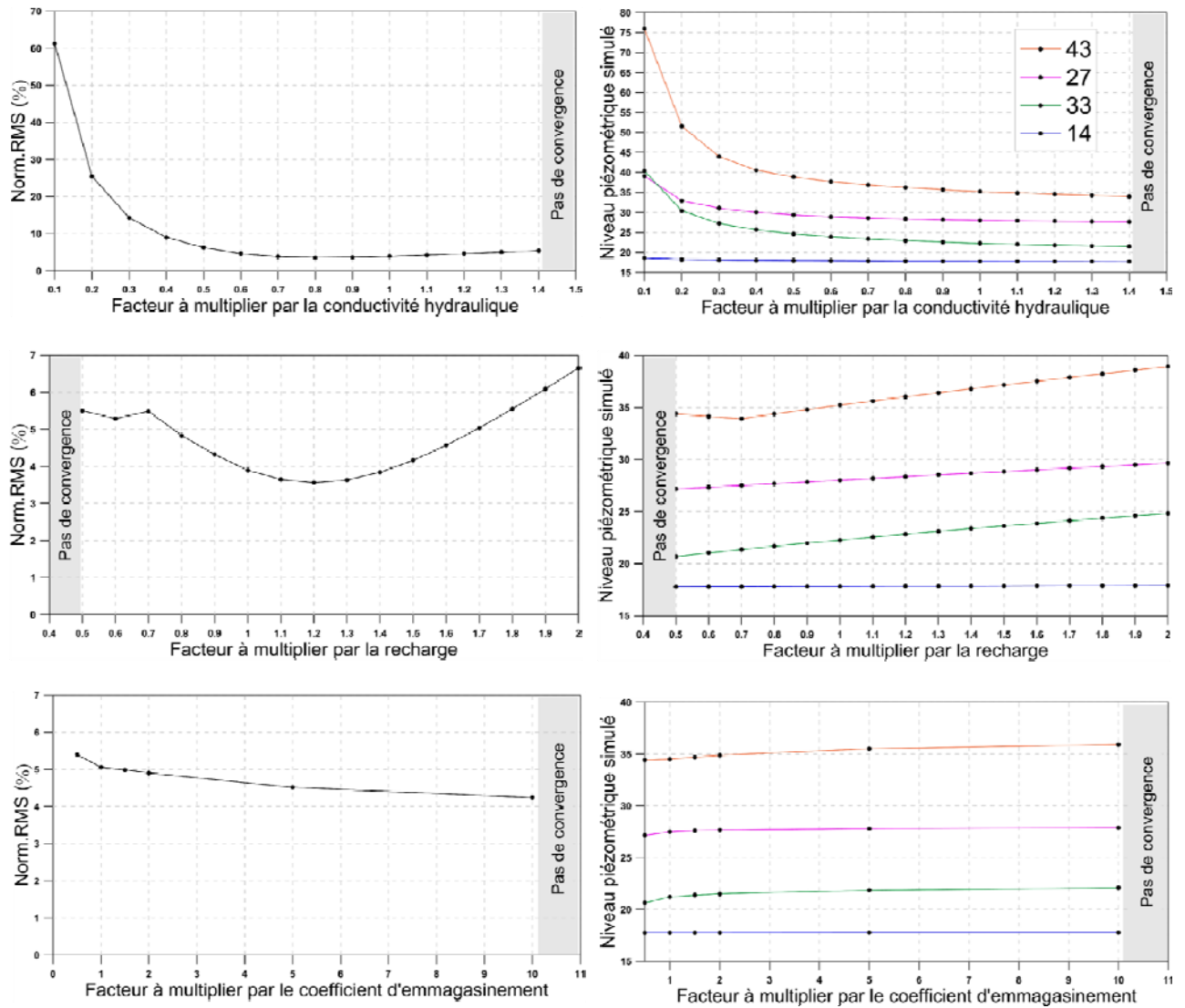


Figure 95. Analyses de sensibilité ; l'effet de variation des paramètres (conductivité hydraulique, recharge et coefficient d'emmagasinement) sur le niveau piézométrique simulé pour les piézomètres (43, 27, 33 et 14) avec la RMS du modèle.

6.4. Simulations de scénarios

Les évolutions envisagées se basent sur l'idée qu'une urbanisation des zones naturelles et surtout des zones irriguées est possible dans le futur. C'est une tendance observée ces dernières années (**Figure 96**). Cette évolution morphologique urbaine ne peut pas se limiter seulement au processus d'extension mais il existe aussi parallèlement le processus de densification (Alkhalifeh, 2008) d'un secteur non urbain entouré par des espaces urbanisés qui se transforme en urbain. Ces deux processus (l'extension de la zone urbaine et la densification) peuvent donc aboutir à une réduction des volumes infiltrés vers la nappe grâce à l'irrigation.

Généralement, les modèles hydrologiques utilisés afin d'étudier les scénarios de l'impact du futur changement de l'occupation du sol relient les paramètres du modèle hydrologique à un modèle du changement de l'occupation du sol (couplage entre le modèle hydrologique et le modèle de l'occupation du sol) (Chu et al., 2010 ; Dams et al., 2008 ; Lin et al., 2007 ; Poelmans et al., 2010). Cette technique n'a pas été utilisée ici faute d'éléments disponibles suffisant sur les prévisions d'extension urbaine.

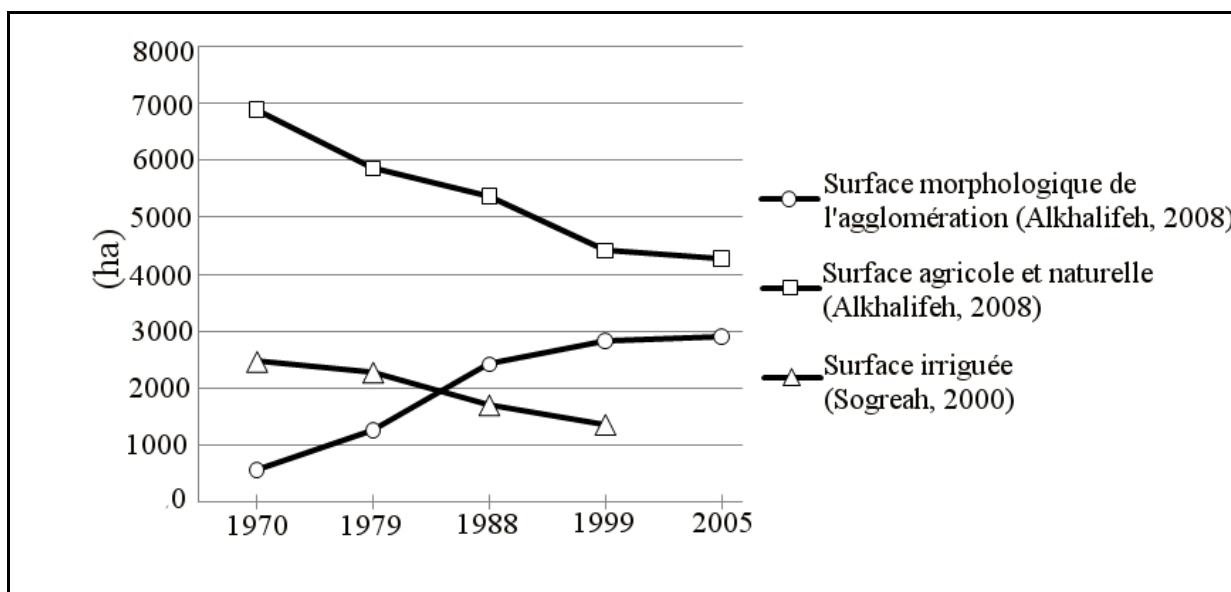


Figure 96. Évolution des surfaces dans la plaine d'Avignon entre 1970 et 2005.

En outre, l'urbanisation peut causer des prélèvements excessifs de l'eau souterraine afin de couvrir les besoins domestiques des habitants. Avec l'extension et le développement de la ville d'Avignon, nous pouvons donc envisager une augmentation du nombre de forages individuels, la plupart n'étant pas déclarés.

Afin de connaître les conséquences de ces changements probables sur le niveau piézométrique et l'état dynamique de la nappe, six scénarios ont été simulés :

- A) Scénario 1 : il s'agit d'arrêter l'irrigation et supprimer les volumes d'eau apportés à la nappe par l'irrigation sur les périmètres irrigués et les remplacer par la recharge par la pluie distribuée pour un milieu naturel.
- B) Scénario 2 : il s'agit d'arrêter l'irrigation et remplacer les périmètres irrigués par une zone urbaine semi dense où la recharge est égale à la moitié de la recharge par la pluie.
- C) Scénario 3 : c'est l'arrêt de l'irrigation et remplacer les périmètres irrigués et les zones semi urbaines par une zone urbaine dense (sans recharge).
- D) Scénario 4 : il s'agit de la situation actuelle simulée avec un pompage par des forages individuels localisés sur chaque maille avec un débit de $2 \text{ m}^3/\text{jour}$.
- E) Scénario 5 : il reprend le scénario 2 et applique le pompage fictif sur chaque maille de $2 \text{ m}^3/\text{jour}$.
- F) Scénario 6 : il s'agit du scénario 3 avec le pompage fictif.

Les simulations réalisées sur des piézomètres choisis en fonction de leur localisation d'amont vers l'aval de la nappe montrent que suite aux scénarios de changement le rabattement le plus fort serait dans la piézométrie de la zone irriguée (piézomètre 33) avec une baisse de l'ordre de 3 m en cas d'une disparition de l'irrigation (**Figure 97**). Avec les scénarios de l'abandon de l'irrigation les variations piézométriques vont être similaires à celles de la zone amont avec des hautes eaux en hiver et basses eaux en été.

L'absence de l'irrigation va aussi provoquer une baisse piézométrique dans la zone amont de quelque centimètres jusqu'à 1 m dans le cas extrême.

En se déplaçant de l'amont vers l'aval (vers la zone urbaine) et vers la zone proche de la Durance, le rabattement serait de moins en moins important ; il est de l'ordre de quelques centimètres dans le cas extrême (Scénario 6) pour la piézométrie du milieu urbain (piézomètre 14) et très peu de baisse piézométrique pour la zone Durance. Ceci est dû au fait que la Durance maintient le niveau piézométrique dans sa bordure et semble avoir un effet très important sur la partie urbaine aval. Cet effet devient plus clair et va donc s'étendre vers l'intérieur de la plaine (côté ouest) en parallèle avec l'abandon de l'irrigation accompagnée par une urbanisation dense (**Figure 98**).

Les pompes fictifs appliqués sur toutes les mailles ont un impact léger sur le niveau piézométrique ; ils baisseront la nappe de l'ordre de 10 cm au maximum.

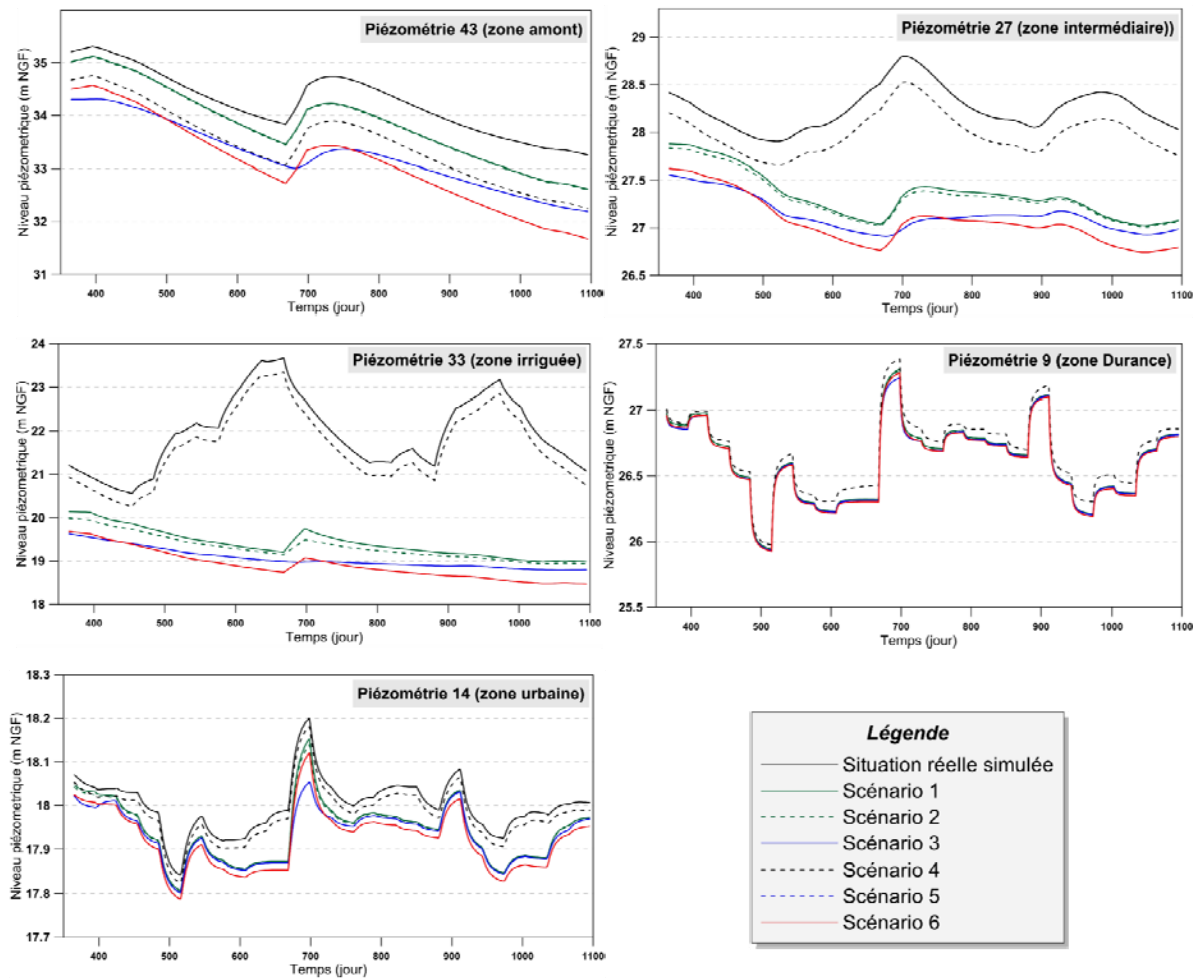


Figure 97. Simulation des scénarios de différentes évolutions.

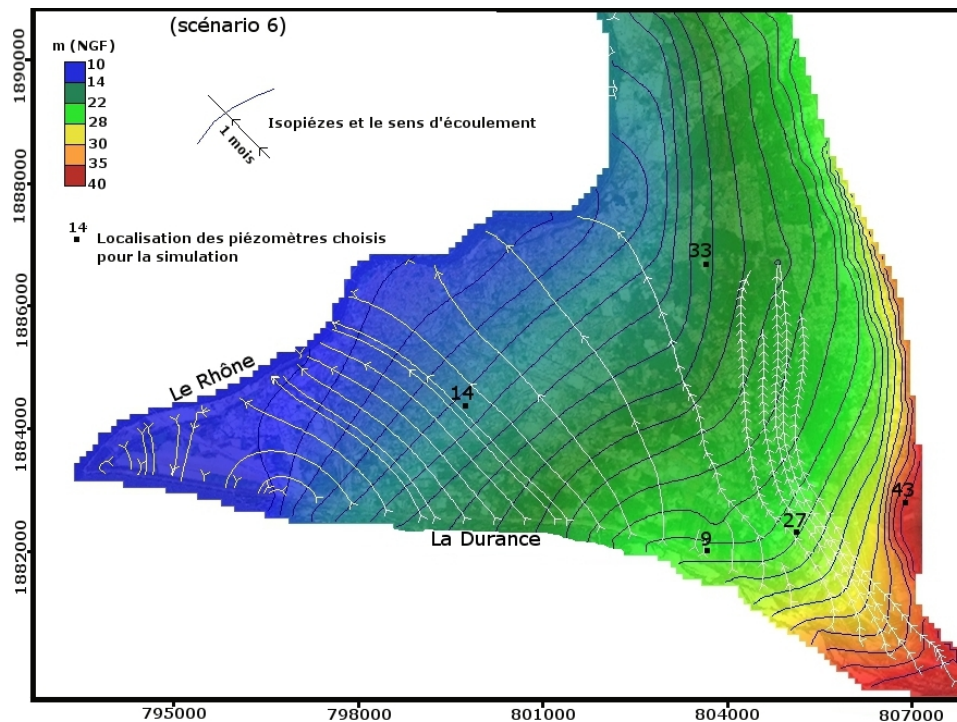


Figure 98. Le niveau piézométrique simulé (scénario 6) avec le sens d'écoulement depuis la Durance.

7. CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail était d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale d'Avignon afin de construire un modèle mathématique capable de simuler les flux et d'évaluer les conséquences de différents scénarios, notamment le changement de l'occupation du sol. En effet, la faible profondeur de la nappe la rend très sensible aux facteurs naturels et anthropiques locaux d'où l'importance de la nature de la couverture du sol qui peut jouer un rôle important sur la dynamique de la nappe. Ceci est particulièrement vrai dans le contexte d'un secteur très urbanisé et entouré de zones industrielles et agricoles, cette dernière comportant de vastes secteurs irrigués.

À partir d'une démarche multi-approche (hydrogéologique, hydrochimie et isotope) il a été possible d'évaluer qualitativement et quantitativement l'ensemble des éléments du bilan de la nappe et de proposer un modèle de fonctionnement. Sur la base de ces informations, un modèle hydrodynamique a été construit à l'aide du logiciel MODFLOW et une simulation de l'impact d'éventuelles modifications de l'usage du sol a pu être tentée.

La nappe est fortement influencée par les eaux de surface et il a été possible de confirmer et de préciser le rôle très important de la Durance et de ses canaux associés pour sa réalimentation.

La nappe alluviale est fortement dépendante d'une alimentation assurée par la Durance et les infiltrations dominées par les pertes de l'irrigation gravitaire avec un impact très variable dans le temps et dans l'espace. La Durance alimente la nappe dans sa partie amont tout au long de l'année avec des débits qui augmentent lors de ses crues, et de manière discontinue dans le temps et l'espace dans sa partie aval. Alors que le Rhône a tendance à drainer généralement la nappe.

L'irrigation permet le maintien d'un niveau piézométrique élevé pendant la période d'étiage, durant tout l'été, grâce aux volumes d'eau apportés, qui dépassent largement le besoin des plantes. Cet excès permet de limiter le risque de manque d'eau et d'éventuelles restrictions ; car il est en partie repris pour d'autres usages : irrigations alimentées par pompage, Alimentation en Eau Potable (AEP) des collectivités d'Avignon et des prélèvements individuels.

Peu minéralisée l'eau d'irrigation contribue également à maintenir la bonne qualité de la nappe avec des concentrations en éléments dissous, relativement basses et stables.

Associée à une bonne transmissivité de l'aquifère, elle peut permettre une dilution des éventuelles pollutions anthropiques anciennes et actuelles, déjà constatées malgré la présence d'une couche de limon en surface limite l'infiltration directe dans la partie aval de la nappe proche de la zone urbanisée.

Les zones de recharge par l'irrigation ont été précisées à partir des cartes d'occupation du sol et confirmées avec les relevés et les cartes piézométriques ainsi que les données hydrochimiques et isotopiques. Associées au bilan, ces dernières ont permis en outre une quantification des apports et une évaluation des vitesses d'écoulement et du temps de résidence des eaux. La partie maximale de la recharge par l'irrigation vient du périmètre du canal Crillon avec un volume moyen annuel de 15 Mm^3 . Calculé à partir d'un bilan hydrologique mensuel il représente 80% environ de la recharge totale par l'irrigation à l'état actuel.

La part de la pluie dans la recharge semble faible comparée à celle de l'irrigation avec une moyenne annuelle de l'ordre de 135 mm. La distribution des volumes infiltrés par la pluie varie

dans l'espace et dépend de la couverture du sol. L'effet de la pluie sur la nappe est minimal en zone urbaine, comme l'indique clairement les signatures isotopiques très proches de celle des eaux de la Durance. La zone amont (en dehors des périmètres irrigués sur les versants des collines Saint Saturnin/Morières) est au contraire bien marquée par la signature de la pluie, source unique d'alimentation. Plus à l'aval au niveau de la zone irriguée cette signature est progressivement masquée par celle des eaux d'irrigation soulignant l'apport prépondérant de ces dernières.

L'analyse de l'ensemble des données hydrogéologiques et géologiques acquises a permis d'établir un modèle conceptuel qui est la base du modèle hydrodynamique des écoulements construit à l'aide du logiciel MODFLOW pour l'aquifère alluvial traité comme une monocouche.

Le modèle réalisé reproduit généralement de manière satisfaisante le comportement hydraulique du système. Il présente pour la plupart des cas, un bon accord entre la piézométrie mesurée et la simulation.

Le sens d'écoulement, proposé par les différentes approches (piézométriques, hydrochimiques et isotopiques), a été confirmé par le modèle qui propose une vitesse d'écoulement globalement homogène avec celle estimée par les mesures piézométriques et isotopiques.

Le modèle a apporté une meilleure connaissance sur le fonctionnement hydrodynamique :

- Tant en régime permanent que transitoire, les résultats de la modélisation reproduisent l'importance de l'alimentation de la nappe par la Durance surtout dans sa bordure.
- Le volume total d'eau infiltré sur l'ensemble des surfaces irriguées apparaît nettement supérieur au volume infiltré par la pluie (supérieur d'environ 7 fois).
- L'impact du changement de l'occupation du sol sur la nappe a été testé par le modèle. L'abandon de l'irrigation devrait provoquer une baisse piézométrique et une alimentation depuis la Durance qui pourrait augmenter et s'étendre vers l'intérieur de la plaine. La nappe (surtout sous les périmètres irrigués) présenterait des variations piézométriques avec moins d'amplitude et serait donc très dépendante de la pluie pour la majorité de sa surface et également pour beaucoup du régime de la Durance.

Perspectives

À l'issue de ce travail un certain nombre d'actions pourraient être entreprises pour améliorer la connaissance et la modélisation de ce système :

- Obtenir une maîtrise plus précise de l'occupation des sols de façon à intégrer pour chaque surface des paramètres influençant les bilans hydrologiques (type de sol, couverture végétale, besoin en eau des plantes...).
- Effectuer un bilan au niveau de chaque parcelle irriguée pour mieux évaluer l'infiltration due à l'irrigation.

- Des améliorations au modèle peuvent également être apportées en considérant une répartition plus précise des zones irriguées et en considérant les volumes d'eau entrants pour chaque parcelle ainsi que la date précise de l'irrigation.
- L'infiltration totale par l'irrigation gravitaire se divise entre l'infiltration liée à l'irrigation et celle à partir des berges et fonds des canaux. Cette dernière a été prise en compte seulement en tant qu'une partie du volume total infiltré. Les erreurs dans les résultats de simulations du modèle peuvent être liées aux secteurs où les canaux seuls sont présents en dehors du périmètre irrigué. Il faudrait donc faire des mesures en période hors irrigation pour l'appréciation de l'infiltration liée au canal. De plus, il faudrait détailler le linéaire des berges ainsi que le type et les dimensions des ouvrages rencontrés.

BIBLIOGRAPHIE

Alkhalifeh S. (2008) – L'apport de la télédétection dans l'observation de l'étalement urbain. L'exemple de l'agglomération d'Avignon, *Thèse, Université d'Avignon, Avignon*, 422 p.

Andersen P.F., Matthews, John E., Robert S., Kerr Environmental Research Laboratory (1993) – A manual of instructional problems for the U.S.G.S. MODFLOW model, Ada, Okla., Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. *Environmental Protection Agency*.

Arnold C.L., Gibbons C.J. (1996) – Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator, *Journal of the American Planning Association*, 62, 2, p.p. 243-258.

Bagnouls F., Gaussen H. (1953) – Saison sèche et indice xérothermique, *Bull. Soc. Hist. Nat. de Toulouse*, pp. 193 à 240.

Bear J. (2010) – Modeling groundwater flow and contaminant transport, *Springer Dordrecht Heidelberg London New York*, ISBN 978-1-4020-6681-8, 834 p.

Blavoux B., Hubert P., Olive P. (1982) – Les teneurs en Tritium dans le Rhône, Paris

BOGGS J.L., SUN G. (2011) – Urbanization alters watershed hydrology in the Piedmont of North Carolina, *Ecohydrology*, 4, 2, p.p. 256-264.

Bossy G. (1965) – Documents sur la nappe alluviale de la Basse Durance et de la Crau (1953-1962), *Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse*, 53 p.

British Geological Survey (2003) – Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management, Nairobi, Kenya, *United Nations Environment Programme*.

BURGEAP (1995) – Etat de référence des eaux souterraines et proposition de suivi des impacts, Confluence Rhône/Durance-Bonpas, Rapport R/Av.422 A.4607-C795.22.

Cao J.T., Xie Y., Chen Z., Zhang G. (2002) – Preliminary research on the seepage and transportation of irrigation water in the plain of main stream region of Heihe river Gansu province, *Hydrogeology and Engineering Geology*, Issue 4, p.p. 1- 4.

Caridroit Y. (1968) – Etude géologique et hydrogéologique de la région d'Avignon, *Thèse, Université de Grenoble*, 137 p.

Celle H., Daniel M., Mudry J., Blavoux B. (2000) - Signal pluie et traçage par les isotopes stables en Méditerranée occidentale. Exemple de la région avignonnaise (Sud-Est de la France). *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planets/Earth and Planetary Sciences*, n° 331, p3 647-650.

Chabas M. (2003) – Quantification des flux en irrigation gravitaire : bilan hydrique à l'échelle de la parcelle, *DESS Hydrogéologie et Environnement-Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse*.

- Chu H.-J. Lin Y. P., Huang C. W. Hsu C. Y. Chen H. Y. (2010) – Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model, *Hydrological Processes*, 24, 18, p.p. 2538-2554.
- Ciron P. (1992) – Appréciation des effets de la voie nouvelle sur le champ captant d'Avignon-La Saignone, *B.R.G.M, R 35747*, 1992, 82 p.
- Ciron P., Vadon J. (1986) – Etude de faisabilité d'une pompe à chaleur eau-eau, Zone Industrielle de Fontcouverte à Avignon (Vaucluse), Ets Silbert et Ripert, B.R.G.M, 86 SGN 672 PAC, 1986, 17 p.
- Clark I.D., Fritz P. (1997) – Environmental Isotopes in Hydrogeology, *Lewis Publisher Editions, New York*, 1997, 352 p.
- Clémentz M.L. (1999) – Les effets induits de l'irrigation gravitaire sur la nappe alluviale et le système hydrographique naturel. Etude dans le périmètre irrigué du canal Saint-Julien, *DESS Hydrogéologie et Environnement-Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse*, 1999, 111 p.
- Coplen T.B. (1996) – New guidelines for the reporting of stable hydrogen, carbon, and oxygen isotope ratio data: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 60, p. 3359.
- Coplen T.B., Herczeg A., and Barnes C.J. (1999) – Isotope engineering--using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems, in Cook, P.G. and Herczeg, A., eds., *Environmental Tracers in Subsurface: Boston, Kluwer Academic Publishers*, p. 79-110C.
- Couvert B., Lefort Ph., Peiry J.L., Belledy Ph. (1999) – La gestion des rivières, Transport solide et atterrissement. *Les Etudes des Agences de l'Eau N° 65, Guide méthodologique, Paris, ISSN : 1161-0425*, 1999, 91 p.
- Craig H. (1961) – Isotopic Variations in Meteoric Waters, *Science, Vol. 133, DOI: 10.1126/science.133.3465.1702*, p.p. 1702-1703.
- Dams J., Dujardin J., Reggers R., Bashir I., Canters F., Batelaan O. (2013) – 'Mapping impervious surface change from remote sensing for hydrological modelling', *Journal of Hydrology*, Vol. 485, pp. 84-95.
- Dams J., Woldeamlak S.T., Batelaan O. (2008) – Predicting land-use change and its impact on the groundwater system of the Kleine Nete catchment, Belgium, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 6, p.p. 1369-1385.
- Dansgaard W. (1964) – Stable isotopes in precipitation, *Tellus, XVI, 4*, p.p. 436-468.
- D'Apolito P. (1972) – Contribution à l'étude de l'aménagement de Caderousse (Vallée du Rhône-Plaine d'Orange-Vaucluse), *Thèse 3^{ème} cycle, Sciences de la Terre, Université de Grenoble*, 87 p.
- DDEA (1996) – Protection des eaux souterraines, lot 23 Avignon, Dossier d'étude environnement, *DDEA, Avignon, Cité Administrative*.

Dellery B., Garnier J. (1982) – Chauffage d'une piscine par pompe à chaleur sur les eaux souterraines à Montfavet-Avignon, *B.R.G.M, 82-SGN-184-PAC*, 1982, 27 p.

Driscoll, F.G., (1986) – *Groundwater and Wells (2nd ed.)*, Johnson Filtration Systems, Inc., St. Paul, Minnesota, 1089 p.

Durozoy G., Glintzboeckel C. (1978) – Evaluation des ressources hydrauliques-Etude de la vulnérabilité à la pollution Nappe alluviale de la vallée du Rhône, *BRGM, 78-SGN-046-PRC*, 1978, 65 p.

Durozoy G., Gouvernet C., Margat J. (1964) – Recherches hydrogéologiques dans la zone Avignon Sorgues, *BRGM, Rapport DSGR 64.A22*, 1964, 59 p.

Faguet B., Cruciani P-M., Jacob J-P., Paulet H., Vairel D., Vallée J-P., Auzet J-P. (1980) – Schéma hydraulique - Programme général de modernisation des irrigations en Vaucluse, 2 La ressource en eau, Rapport du Ministère de l'Agriculture, Direction Départementale de l'Agriculture du Vaucluse, Service du Génie rural des eaux et des forêts, *DDA84/DDE84/SRAE PACA*, 17 p. + annexes.

Fetter Jr C.W. (2001) – Applied hydrogeology, 4th ed, Upper Saddle River, N.J, *Prentice Hall*, 2001, 615 p.

Fontes J. Ch. (1980) – Environmental isotopes in groundwater hydrology. In *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Vol. 1, *The Terrestrial Environment*, A. eds. P. FRITZ et J. C. FONTES, pp. 75-140, Amsterdam : Elsevier.
Consultable à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444417800500092>.

Freslon M. (1980) – Transferts d'eau et de solutés dans un loess sous climat méditerranéen, *Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie-Paris VI*, 225 p.

Fricke H.C., O'Neil J.R. (1999) – The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time, *Earth and Planetary Science Letters*, 170, 3, p.p. 181-196.

Galle.Cavalloni H.,Dellery B.,Durozoy G., Gouvernet C., Margat J. (1965) – Recherches Hydrogéologiques dans la zone Avignon-Sorgues (Vaucluse), Etat des études au 1^{er} juin 1964, *BRGM/65-DSGR-A-029*.

Garnier J.L. (1988) – Projet de climatisation du musée Calvet à Avignon (84) par l'utilisation des eaux souterraines. Préfaisabilité et incidence hydrodynamique sur les niveaux de la nappe. *Rapport BRGM 88 SGN 851 PAC*, 16 p., 7 fig.

Garnier J. (1987) – Propagation des pollutions accidentelles et protection des ouvrages de captage en nappe alluviale, *B.R.G.M, Rapport 87-SGN-839-PAC*, 1987, 58 p.

Gee G.W., Hillel D. (1988) – Groundwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods, Chichester, ROYAUME-UNI, Wiley, *Hydrological processes*, vol. 2, Issue 3, 1988, pp. 255-266.

Griffioen J. (2004) – Groundwater quality, (IHPVI Series on *Groundwater*, N°3), 2004, 43-65 p.

Harbaugh A.W., Mc Donald M.G. (1996) – Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S.Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model, U.S. *Geological Survey ; Branch of Information Services*, Open-File Report, 1996, 220 p.

Harvey F., Sibray S.(2001) – Delineating Ground Water Recharge from Leaking Irrigation Canals Using Water Chemistry and Isotopes. *Ground Water*, May – June 2001, 39 (3), 408-421.

Hayashi T., Tokunaga T., Aichi M., Shimada J., Taniguchi M. (2009) – Effects of human activities and urbanization on groundwater environments: An example from the aquifer system of Tokyo and the surrounding area, *Science of The Total Environment, Elsevier* Vol. 407, Issue 9, p.p. 3165-3172.

He B., Wang Y., Takase K., Mouri G., Razafindrabe B.H.N. (2009) – Estimating Land Use Impacts on Regional Scale Urban Water Balance and Groundwater Recharge, *Water Resources Management*, 23, 9, p.p. 1863-1873.

Hoefs J. (1997) – Stable Isotope Geochemistry, 4, Berlin, 1997, ISBN 3 540 61126 6 , *Cambridge University Press*, 201 p.

Huneau F. (2000) – Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen. Etude géochimique et isotopique du bassin miocène de Valréas (Sud Est de la France), *Thèse de l'Université d'Avignon*, Avignon, 206 p.

Hydrosol Ingénierie (2004) – Bilan hydraulique de la saison d'arrosage 2003, Etude réalisée pour l'*Agence de l'Eau RMC*, 2004, 27 p. + annexes.

Jennings D.B., Taylor S. (2002) – Changes in anthropogenic impervious surfaces, precipitation and daily streamflow discharge: a historical perspective in a mid-atlantic subwatershed, *Landscape Ecology*, 17, 5, p.p. 471-489.

Kauffman G. J., Andrew C., Kevin J., Andrew R. (2009) – Link between Impervious Cover and Base Flow in the White Clay Creek Wild and Scenic Watershed in Delaware, Read More: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2009\)14:4\(324\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:4(324)) *Journal of Hydrologic Engineering*, 14, 4, p.p. 324-334.

Kresic N. (1997) – Solution in Hydrogeology and groundwater, *CRC Press New York*, 1997, 461 p.

Kumar M., Rao S., Kumar B., Ramanathan A. (2011) – Identification of aquifer-recharge zones and sources in an urban development area (Delhi, India), by correlating isotopic tracers with hydrological features, *Hydrogeology Journal*, 19, 2, p.p. 463-474.

Lacroix M. (1991) – Impact de l'irrigation sur un aquifère alluvial. Dynamique du système Basse Durance, *Thèse de l'Université de Besançon*, 161 p.

Leake S. (1997) – Modeling of groundwater flow with MODFLOW and related programs, U.S. Geological Survey.

Lerner D. N. (2002) – Identifying and quantifying urban recharge: a review, *Hydrogeology Journal*, 10, 1, p.p. 143-152.

Lin Y.-P., Hong N.-M., Wu P.-J., Wu C.-F., Verburg P. H. (2007) – Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use patterns in the Wu-Tu watershed in Northern Taiwan, *Elsevier, Science Direct, Landscape and Urban Planning*, 80, 1-2, p.p. 111-126.

Mallessard G. (1983) – Sur la présence de fer et de manganèse dans l'aquifère alluvial de plaine d'Avignon, *Thèse Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse*, 122 p.

Maloszewski P., Zuber A. (1996) – Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data *Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology-910*, IAEA, Vienne, 9-58, p.p. 310 - 360.

Marsily De G. (2004) – Cours d'Hydrogéologie, Paris, *Sisyphé, Université P. & M. Curie, Paris* 6, 236 p.

Mc Guire K., Mc Donnell J. (2008) – Stable Isotope Tracers in Watershed Hydrology, in *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, Blackwell Publishing Ltd, p.334-374. Consultable à <http://dx.doi.org/10.1002/9780470691854.ch11>.

Mc Mahon P.B., Geological Survey (U.S.), National Water-Quality Assessment Program (U.S.) (2003) – Water movement through thick unsaturated zones overlying the central High Plains aquifer, southwestern Kansas, 2000-2001, Reston, Va. : Denver, CO, U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey ; U.S. Geological Survey, Information Services [distributeur], (*Water-resources investigations* report ;03-4171, vii, 32 p.), 2003, vii, 32 p. p. Consultable à <http://catalog.hathitrust.org/Record/003878667>.

Merot A., Wery J., Isbérie C., Charron F. (2008) – Response of a plurispecific permanent glassland to border irrigation regulated by tensiometer, *Elsevier, Science Direct, Europ. J. Agronomy* 28, p.p. p8.

Michallet S. (1999) – Incidence des apports d'eau du Canal du Crillon sur l'alimentation de la nappe, *DESS Hydrogéologie et Environnement-Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse*, 1999, 82 p.

Mc Donald M.G., Harbaugh A.W. (1988) – A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey, *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1

Monjuvent G. (1991) – Notice explicative de la feuille Avignon, 1:50 000, Carte géologique de La France, *Edition du BRGM-Bp 6009-Orléans*

Morris, B.L.; Lawrence, A.R.L.; Chilton, P.J.C.; Adams, B.; Calow, R.C.; Klinck, B.A.. 2003 Groundwater and its susceptibility to degradation : a global assessment of the problem and options for management. *United Nations Environment Programme*, 126 p.

Nofal S., Blavoux B., Cognard-Plancq A.L., Marc V. & Travi Y. (2012). L'approvisionnement en eau potable de la ville d'Avignon. Impact de l'urbanisation sur la nappe alluviale au confluent Rhône - Durance. *Géologues*, 167 : 61-64

Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Tison F., Daniel M. & Travi Y. (2012). Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en basse Provence : exemple de la plaine d'Avignon. In De l'eau agricole à l'eau environnementale en Méditerranée, Résistance et adaptation aux nouveaux enjeux de partage de l'eau en Méditerranée, Coordination C. Aspe, Ed. Quae, Paris, France. ISBN 9782759216963 (384 pages) pp. 159-173.

Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Tison F., Daniel M. & Travi Y. (2011). La recharge des nappes par les eaux d'irrigation en Basse Provence : exemple de la plaine d'Avignon. Actes du Colloque LPED/IMEP/GIEST Usages écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en méditerranée : quels enjeux pour quels services ? Atelier 3, État écologique, biodiversité et paysages de l'eau, 20-21 janv. 2011, Marseille (FRA), 12 pp. <http://www.lped.org/actes-du-colloque-eau-agricole/theme3.html> (dernière consultation : 07/01/2015)

Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Travi Y., Danquigny C. (2010). Fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale d'Avignon. Impact des changements globaux (climat et usage du sol). [Poster]. 23^{ème} Réunion des Sciences de la Terre ; 25-29 octobre 2010, Bordeaux (FRA).

Onodera S., Saito M., Sawano M., Hosono T., Taniguchi M., Shimada J., Umezawa Y., Lubis R.F., Buapeng S., Delinom R. (2009) – Erratum to « Effects of intensive urbanization on the intrusion of shallow groundwater into deep groundwater: Examples from Bangkok and Jakarta », *Elsevier, Science of The Total Environment*, 407, 9, p.p. 3209-3217.

Osman Y.Z., Bruen M.P. (2002) – Modelling stream-aquifer seepage in an alluvial aquifer: an improved loosing-stream package for MODFLOW, *Journal of Hydrology*, 264, 1-4, p.p. 69-86.

Panagopoulos G. (2012) – Application of MODFLOW for simulating groundwater flow in the Trifilia karst aquifer, Greece, *Springer, Environmental Earth Sciences*, Vol. 54, N° 4, ISSN 1866-6280, DOI 10.1007/s12665-012-1630-2, 15 p..

Pélissier F. (1977) – Esquisse de synthèse régionale sur l'utilisation et l'aménagement des eaux, S.R.A.E. PACA, Aix en Provence, 158 p.

Plöthner D., Geyh M. (1991) – $\delta^{18}\text{O}$ values as tracer of artificial groundwater recharge downstream of a reservoir, in *Mémoires XXII, AIH, (Part 2), Proceeding of an International Congress, Lausanne*, p.533- 539.

Poelmans L., Van Rompaey A., Batelaan O. (2010) – Coupling urban expansion models and hydrological models: How important are spatial patterns ?, *Elsevier, Land Use Policy*, 27, 3, p.p. 965-975.

Pollock D.W. (1989) – Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Open File, Report 89-381.

Putallaz J. (1972) – Recherches hydrogéologiques dans la région d'Avignon, *B.R.G.M, Rapport n° 72, SGN-405-PRC*

Qin D., Qian Y., Han L., Wang Z., Li C., Zhao Z. (2011) – Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China, *Elsevier, Journal of Hydrology*, 405, 1–2, p.p. 194-208.

Roark D.M., Healy D.F. (1998) – Quantification of deep percolation from two flood-irrigated alfalfa fields, Roswell Basin, New Mexico, Albuquerque, N.M.: Denver, CO, U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, [Water Resources Division, New Mexico District] ; Can be purchased from *U.S.G.S. Branch of Information Services*, (Percolation from two flood-irrigated alfalfa fields, Roswell Basin, New Mexico, iv, 32 p.), iv, 32 p. p.
Consultable à <http://catalog.hathitrust.org/Record/003788362>.

Roether W. (1967) – Estimating the tritium input to groundwater from wine samples: groundwater and direct run-off contribution to central European Surface Waters, in *Isotopes in Hydrology*, Vienna, IAEA, p.73-91.

Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R. (1993) – Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation, in *Climate Change in Continental Isotopic Records*, American Geophysical Union, p.1-36.
Consultable à <http://dx.doi.org/10.1029/GM078p0001>.

Sanjuan C., Kolm K.E. (1996) – Conceptualization, characterization and numerical modeling of the Jackson Hole alluvial aquifer using ARC/INFO and MODFLOW, *Engineering Geology*, 42, 2-3, p.p. 119-137.

Scanlon B.R., Reedy R.C., Stonestrom D.A., Prudic D.E., Dennehy K.F. (2005) – Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US, *Global Change Biology*, 11, 10, p.p. 1577-1593.

Schueler T. (2000) – The Importance of Imperviousness: The Practice of Watershed Protection, *Watershed Protection Techniques*, p.p. 7-18.

Société Canal Provence (2013) –Schéma directeur des canaux de la plaine d'Avignon, Rapport Société du canal de Provence, Le Tholonet, Aix en Provence.

Shuster W.D., Bonta J., Thurston H., Warnemuende E., Smith D.R. (2005) – Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review, *Urban Water Journal*, Vol. 2, Issue 4, p.p. 263-275.

Stichler W., Maoszewski P., Moser H. (1986) – Modelling of river water infiltration using oxygen-18 data, *Journal of Hydrology*, 83, 3–4, p.p. 355-365.

Takizawa S. (2008) – Groundwater management in Asian cities technology and policy for sustainability, New York, *Springer*, 334 p.
Consultable à <http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-78399-2> [Accédé le 3 juillet 2014].

Thornthwaite C.W., Mather J.R. (1955) –The Water Balance, Publ. in *Climatology*, vol.8, no.1, C.W. Thornthwaite & Associates, Centerton, New Jersey, 86 p.

Tison F., Ruy S., Doussan C., Di Pietro L., Bourdet O. (2008) – Mesure de débit sur un lysimètre, *J2M, Journées de la Mesure et de la Métrologie*, INRA-Centre Bordeaux Aquitaine, Biarritz, 6-9 octobre 2008, p. 218.

Travi Y. (2008) –Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique, *IAEA*, Vienne, (Collection cours de formation, 32), 488 p.

Vazquez-Suné E., Sanchez-Vila X., Carrera J. (2005) – Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain, *Hydrogeology Journal*, 13, 3, p.p. 522-533.

Vörösmarty C., Lettenmaier D., Leveque C., Mey-beck M., Pahl-Wostl C., Alcamo J., Cosgrove W., Grassl H., Hoff H., Kabat P., Lansigan F., Lawford R., R.Naiman R. (2004) – Humans transforming the global water system, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 85, n° 48, p.p. 509, 513-514.

Wang S., Shao J., Song X., Zhang Y., Huo Z., Zhou X. (2008) – Application of MODFLOW and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain, China, *Environmental Geology*, Vol. 55, issue 7, DOI 10.1007/s00254-007-1095-x, p.p. 1449-1462.

Xu X., Huang G., Qu Z., Pereira L.S. (2011) – Using MODFLOW and GIS to Assess Changes in Groundwater Dynamics in Response to Water Saving Measures in Irrigation Districts of the Upper Yellow River Basin, *Springer, Water Resources Management*, Vol. 25, issue 8, p.p. 2035-2059.

Yurtsever Y. (1975) – Worldwide survey of stable isotopes in precipitation. Report Section Hydrology, *IAEA*, 40 p.

Yurtsever Y., Gat J.R. (1981) – Atmospheric waters, in Stable isotopes Hydrology, *IAEA Technical reports series 200*, 339 p.

Zheng C., Bennett G.D. (2002) –Applied contaminant transport modeling, 2nd ed, New York, *Chichester : Wiley-Interscience*, 621 p.

Sites web

ADES est la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines qui rassemble sur un site internet public des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines consultable sur www.adeseaufrance.fr.

Climatik est une banque de données climatiques dédiées à divers usages alimentée par le réseau de mesures de l'INRA consultable à travers l'intranet de l'INRA.

InfoTerre permet d'accéder aux données du BRGM : cartes géologiques du 1/1 000 000 au 1/50 000, dossiers de la Banque de données du Sous-Sol et logs géologiques, cartes des risques naturels et industriels, données sur les eaux souterraines.
Consultable sur <http://infoterre.brgm.fr/>.

Vigicrues est un site gouvernemental qui permet de suivre l'état hydrologique des fleuves en France.
Consultable sur <http://www.vigicrues.gouv.fr/>.

LOGICIELS UTILISÉS

ArcGIS (dans cette thèse version 10.2) est un ensemble de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) permettant de créer des cartes numériques, interpoler des données, localiser des points de mesures...

Diagramme est un logiciel développé par Roland Simler du laboratoire d'hydrogéologie de l'UMR-EMMAH permettant de créer des diagrammes spécifiques aux analyses hydrochimiques.

Global mapper (dans cette thèse version 15) est un outil de visualisation capable d'afficher les images raster, les données d'altitude et les données vectorielles les plus répandues. Il convertit, édite, imprime, acquière des données GPS.

Grapher est un traceur de graphes en deux ou trois dimensions.

IBMM SPSS Statistic est un logiciel utilisé pour l'analyse statistique.

Inkscape 2 est un logiciel libre d'édition de dessin.

Mapinfo 8.5 est un logiciel SIG qui permet de réaliser des cartes en format numérique.

Modflow (dans cette thèse version 2010.1) constitue un logiciel pour la modélisation 3D des écoulements d'eaux souterraines et du transfert de polluants.

Surfer (dans cette thèse version 10) est un logiciel d'interpolation et de représentation de données en 2 et en 3 dimensions sous forme de cartes.

Vensim 6.1 (dans cette thèse version 6.1) permet de modéliser des flux entre compartiments, et peut être utilisé pour modéliser des cycles géochimiques

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la nappe alluviale d'Avignon (Masses d'eau souterraine). Source : Infoterre (BRGM)	12
Figure 2. Situation géographique de la zone d'étude	12
Figure 3. Températures moyennes mensuelles à Avignon de 1989 à 2012	13
Figure 4. Précipitations moyennes mensuelles à Avignon de 1989 à 2012. Les barres d'erreur représentent les écart-types de cumuls mensuels.	14
Figure 5. Diagramme ombrothermique d'Avignon pour la période 1989-2012	15
Figure 6. L'évapotranspiration moyenne mensuelle (ETP) pour la période 1989-2012	16
Figure 7. Carte des canaux d'irrigation et de leurs périmètres irrigable (SCP, 2013).....	19
Figure 8. Colonne stratigraphique depuis le Crétacé établie par un forage de 170 m de profondeur (localisation sur la carte géologique). Source : infoterre.....	21
Figure 9. Carte géologique schématique de la plaine alluviale d'Avignon, d'après la carte géologique d'Avignon au 1/50 000.....	24
Figure 10. Coupe géologique (Durozoy et al., 1964a)	25
Figure 11. Répartition des sédiments dans les alluvions (Putallaz, 1972)	25
Figure 12. La zone urbaine d'Avignon et sa limite diachronique (les lacunes dans l'emprise de la ville correspondent à des espaces non-urbains) (Alkhalifeh, 2008).....	29
Figure 13. Réseau piézométrique de la plaine alluviale d'Avignon.....	37
Figure 14. Localisation des points de prélèvements pour analyses dans la plaine alluviale d'Avignon ..	38
Figure 15. Localisation du profil de sondage électrique, de la coupe hydrogéologique et les mesures des paramètres hydrodynamiques.....	41
Figure 16. Coupe interprétative d'après les sondages électriques (Cavalloni et al., 1965).....	42
Figure 17. Profil de sondage CNR-EDF (Durozoy et al., 1964)	42
Figure 18. Évolution de la piézométrie (2010-2011)	44
Figure 19. Carte piézométrique de la plaine d'Avignon en basses eaux (m NGF) (14.02.2011)	46
Figure 20. Carte piézométrique de la plaine alluviale d'Avignon en hautes eaux (m NGF) (15.07.2011)	46
Figure 21. Battement maximal de la nappe (en m) pour l'année 2011	47
Figure 22. Changement du niveau piézométrique en P33, P30 et F16 et leurs tendances à long terme ..	48
Figure 23. Piézométrie mesurée par sondes automatiques à pas de temps de 15 minutes et pluie journalière.....	50
Figure 24. Température de la nappe en points 27, 15, 14 et température de l'air avec la pluie	50

Figure 25. Relation entre la pluie (mm) et la remontée de la nappe (m) suite aux épisodes pluvieux au point 14.....	50
Figure 26. Variation de la piézométrie lors d'un évènement pluvieux (3 novembre 2011) avec une pluie journalière.....	51
Figure 27. Évolution de la piézométrie et des pluies (au pas de temps horaires) du 1 au 6 novembre 2011	51
Figure 28. Variation de la température lors de l'évènement pluvieux du 3 novembre 2011	51
Figure 29. Excédent annuel calculé par le bilan hydrique.....	53
Figure 30. Le lysimètre du site atelier Fontanille (Tison et al., 2008)	54
Figure 31. Durée du drainage du lysimètre (2008-2011)	55
Figure 32. Relation pluie/drainage cumulés pour chaque évènement pluvieux (2008-2011)	55
Figure 33. Évolution de la pluie journalière et le drainage cumulé sur les évènements et le stock du sol à 50 cm de profondeur.....	55
Figure 34. Évolution des précipitations et des drainages cumulés (2008 -2009)	56
Figure 35. Évolution des précipitations et des drainages cumulés (2009-2010)	56
Figure 36. Aménagements hydrauliques sur la Durance et sur le Rhône et localisation des points de mesures.....	58
Figure 37. Relation Durance-nappe par comparaison des niveaux piézométrique mesurés pendant la crue du 06.06.2011 à la ligne d'eau de la Durance en étiage 2009 (source SMAVD).....	58
Figure 38. Conditions aux limites pour un régime transitoire 1D avec un changement soudain à la limite (Kresic, 1997).....	60
Figure 39. Relation entre les hauteurs d'eau en Durance (en m). Hauteurs observées à l'échelle limnimétrique du pont de la RN7 et au seuil 68 vs hauteur observée par capteur au seuil de Bonpas	62
Figure 40. Comparaison entre les hauteurs de la nappe mesurées (points bleus) et calculées par le modèle de transfert (courbe rouge).....	64
Figure 41. Le réseau du Canal Crillon et ses principales filioles avec l'occupation du sol en fond de la carte. Source : Communauté d'Agglomération du Grand Avignon (COGA)	66
Figure 42. Répartition des volumes d'eau moyens en million m ³ dans le périmètre du Canal Crillon sur la période (2000-2011)	67
Figure 43. Carte des isopièzes avec les valeurs de la conductivité moyenne de la nappe (2010-2011) ; la taille du point représente la conductivité et le chiffre représente le numéro du point de prélèvement	72

Figure 44. L'évolution spatiale des éléments chimiques et des paramètres physico-chimiques et leurs écarts type.....	74
Figure 45. Histogrammes de fréquence des éléments chimiques et des paramètres physico-chimiques moyens de la nappe. Les couleurs représentent la localisation géographique des échantillons où : bleu représente la zone proche de la Durance, gris est la zone essentiellement urbaine, vert est la zone essentiellement irriguée et orange est la zone amont à l'est. L'eau de la Durance est représentée par la lettre D de couleur rouge.	76
Figure 46. Diagramme de Piper pour les eaux de surface fait avec le logiciel Diagramme de R. Simler	78
Figure 47. Diagramme de Piper pour l'eau de la nappe fait avec le logiciel Diagramme de R. Simler...	78
Figure 48. Pourcentage de variance expliquée en fonction des axes factoriels.....	79
Figure 49. Analyse en Composantes Principales (ACP) pour les données de 2010 et 2011.....	79
Figure 50. Relation entre $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ et HCO_3^-	81
Figure 51. Relation entre $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ et $(HCO_3^- + SO_4^{2-})$	82
Figure 52. Relation entre HCO_3^- et Ca^{2+}	82
Figure 53. Relation entre pH et HCO_3^-	82
Figure 54. Relation entre pH et Ca^{2+}	83
Figure 55. Relation entre Cl^- et Na^+	83
Figure 56. Relation entre Na/Cl et la conductivité électrique.....	83
Figure 57. L'effet des changements de phase et des précipitations sur les valeurs de $\delta^{18}O$ et δ^2H de la molécule d'eau. (Basé sur (Coplen, T.B et al., 2000 ; Hoefs, J, 1997).....	87
Figure 58. Relation météorique globale entre δ^2H et $\delta^{18}O$ de l'eau de la pluie, neige, rivières et lacs (Craig, 1961). D'après (Mc Guire et Mc Donnell, 2008).....	89
Figure 59. Relation ^{18}O et ^2H dans les précipitations. Moyennes annuelles pondérées pour les précipitations du réseau AIEA (GNIP) Rozanski et al. (1993).	89
Figure 60. La teneur isotopique des précipitations des périodes humides (mois : 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12) et des périodes sèches (mois :6, 7, 8). Les valeurs sont des moyennes mensuelles de pluie calculées pour la période 1997-2011 à Avignon.	90
Figure 61. Variations temporelles des compositions isotopiques en oxygène-18 et en deutérium de la Durance (2010-2011).....	92
Figure 62. Variation temporelle des compositions isotopiques en oxygène-18 du Canal Durançole (2006-2013) et du Canal Crillon, Canal Puy et de la Durance (2010-2011).....	92
Figure 63. Corrélation Deutérium/Oxygène-18 de l'eau des canaux et celle de la Durance (2010-2011).....	93
Figure 64. Composition isotopique moyenne en oxygène -18 des eaux de la nappe, de la pluie et de la Durance pour la période 2010-2011.....	94

Figure 65. Évolution des compositions isotopique des eaux de la nappe représentant les différentes zones (9 : zone Durance, 30 : zone irriguée, 22 : zone urbaine, 41 et 42 : zone amont) en comparaison avec le signal isotopique de la pluie et celui de la Durance durant la période de mesures (2010-2011).....	94
Figure 66. Les variations temporelles de $\delta^{18}\text{O}$ dans la Durance et dans la nappe (point N° 9) avec la hauteur d'eau mesurée dans la Durance (station Bonpas) en m	95
Figure 67. Les variations temporelles de $\delta^{18}\text{O}$ dans la nappe (point N° 30), dans un canal d'irrigation et dans la pluie avec la pluie en mm et la profondeur de la nappe en m	96
Figure 68. Schéma de la situation hydrogéologique au périmètre du Canal Crillon	97
Figure 69. Localisation des points de prélèvement utilisés pour les calculs de pourcentage d'eau d'irrigation dans le périmètre du Canal Crillon.....	98
Figure 70. Structure du modèle de transfert.	99
Figure 71. Situation hydrogéologique schématique d'applicabilité du modèle EPM (combinaison entre un modèle exponentiel et un modèle piston) (Małoszewski et Zuber, 1996).....	100
Figure 72. Résultats du modèle de transfert du signal $\delta^{18}\text{O}$ comparé au signal de la nappe (points : 30, INRA et 19). La zone en gris représente la période d'initialisation du modèle. Les barres d'erreur représentent la marge d'erreur analytique (0.15 ‰).....	102
Figure 73. La teneur moyenne en ^3H des précipitations de l'hémisphère Nord d'après (Travi, 2008) ..	103
Figure 74. Valeurs moyennes mensuelles en Tritium des pluies à Avignon et des teneurs mesurées dans le Rhône et dans la Durance	104
Figure 75. La composition isotopique en tritium pour le Rhône, la Durance et la nappe (30/09/2010)	104
Figure 76. Schéma récapitulatif des sources de recharge de la nappe.....	108
Figure 77. Modèle conceptuel applicable au modèle de flux mathématique	110
Figure 78. Le Modèle Numérique du Terrain (MNT)	113
Figure 79. La géométrie du substratum de l'aquifère.....	113
Figure 80. Les conditions aux limites	114
Figure 81. Schéma de l'hypothèse du flux imposé à la limite Est du modèle.....	115
Figure 82. Relation nappe-rivière (condition de Fourier) d'après (Marsily, 2004).....	116
Figure 83. Les zones de recharge entrées dans le modèle	117
Figure 84. Les points de mesures du niveau de la Durance et les pentes de la rivière.....	119
Figure 85. Répartition spatiale de la perméabilité de la couche aquifère.....	120
Figure 86. Comparaison entre la charge hydraulique calculée et la charge hydraulique observée en régime permanent	121
Figure 87. Comparaison entre la piézométrie observée (juin 2011) et la piézométrie calculée par le modèle en régime permanent	122
Figure 88. Bilan des flux (en m^3/jour) du modèle en régime permanent	123
Figure 89. Répartition du coefficient d'emménagement (Specific yield Sy)	126

Figure 90. Les zones de recharge avec la localisation des points sélectionnés pour la comparaison.....	126
Figure 91. Les variations piézométriques temporelles calculées et observées dans des différentes zones	127
Figure 92. Les principales entrées - sorties calculées par le modèle pour la période 2010-2011.....	128
Figure 93. Les zones d'influence du Rhône et de la Durance estimées par le modèle.....	129
Figure 94. Le temps de transit estimé par le modèle pour les écoulements à partir de la limite est.....	130
Figure 95. Analyses de sensibilité ; l'effet de variation des paramètres (conductivité hydraulique, recharge et coefficient d'emménagement) sur le niveau piézométrique simulé pour les piézomètres (43, 27, 33 et 14) avec la RMS du modèle.	131
Figure 96. Évolution des surfaces dans la plaine d'Avignon entre 1970 et 2005	132
Figure 97. Simulation des scénarios de différentes évolutions	134
Figure 98. Le niveau piézométrique simulé (scénario 6) avec le sens d'écoulement depuis la Durance	134

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques générales des points de prélèvement.....	34
Tableau 2. Paramètres hydrodynamiques de la nappe d'Avignon	43
Tableau 3. Détermination de la Réserve Utile moyenne (RU).....	52
Tableau 4. Diffusivités calculées par le modèle à différents endroits (localisation sur la Figure 36).....	62
Tableau 5. La répartition des cultures dans la plaine d'Avignon estimée utilisant Arcgis 10.2.....	66
Tableau 6. Volumes (en Millions de m ³) écoulés et infiltrés sur les périmètres du Canal Puy et du Canal Hôpital	68
Tableau 7. Matrice de corrélation du pH, de la conductivité et des ions majeurs de la nappe.....	80
Tableau 8. Calcul de l'indice de saturation à la Calcite, la Dolomite et le Gypse	84
Tableau 9. Pourcentage d'eau d'irrigation dans la nappe sous le périmètre du Canal Crillon.....	98
Tableau 10. Paramètres optimisés pour la simulation du $\delta^{18}\text{O}$ dans la nappe d'Avignon	100
Tableau 11. Volumes moyens mensuels pour les entrées par l'irrigation et par la pluie	109
Tableau 12. Les valeurs de la recharge introduite dans le modèle en (mm) en régime permanent.....	118
Tableau 13. Termes du bilan global en régime permanent de la nappe alluviale d'Avignon	123
Tableau 14. Les valeurs mensuelles de la recharge (en mm) utilisées en régime transitoire	124
Tableau 15. Volumes mensuels (entrants – sortants) en Mm ³ pour les principales composantes du bilan calculé par le modèle pour l'année 2011	128

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Localisation des points de mesures piézométriques et des points des prélèvements	155
Annexe 2. Les volumes d'eau mensuels calculés par un bilan hydraulique sur le Canal Crillon pour la période (2000-2012).....	159
Annexe 3. Les hauteurs et les niveaux (moyens mensuels) d'eau en Durance calculés pour la période 2010-2012.....	164
Annexe 4. L'approvisionnement en eau potable de la ville d'Avignon. Impact de l'urbanisation sur la nappe alluviale au confluent Rhône - Durance.....	166
Nofal S., Blavoux B., Cognard-Plancq A.L., Marc V. & Travi Y. (2011). Géologues, 167 : 61-64.	
Annexe 5. Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en basse Provence : exemple de la plaine d'Avignon.....	171
Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Tison F., Daniel M. & Travi Y. (2012). In De l'eau agricole à l'eau environnementale en Méditerranée, Résistance et adaptation aux nouveaux enjeux de partage de l'eau en Méditerranée, (Chapitre 11). Coordination C. Aspe, Ed. Quae, Paris, France. ISBN 9782759216963 (384 pages) pp. 159-173.	

Annexe 1

Localisation des points de mesures piézométriques et des points des prélèvements

		Coordonnées en Lambert 2 étendu		
Numéro correspondant	Nom des points de mesure	X	Y	Z
34	8bis	803109	1886884	24.49
30	Bonheur	803682	1886356	26.42
33	Calvino	803687	1886648	26.42
	DU1	798223	1882676	21.83
11	DU2	800373	1882705	25.31
10	F18	801802	1882601	27.68
28	Maurice3	803154	1886015	26.99
	P5 pub	796739	1884978	18.87
	Puits 62	806782	1882338	38.84
	P227	802961	1888092	24.34
	P380	797401	1883457	18.20
	Pylône	802399	1885041	24.23
29	Rideaux	804745	1885149	30.38
31	Roux	803690	1885401	26.41
	seuil68	799767	1882383	22.60
24	T7	798758	1883402	20.70
	c4	803798	1882829	30.66
	Canal Puy	803711	1881973	30.77
	G	803575	1882219	30.53
	H	803643	1882242	30.66
	i	803774	1882209	31.36
21	i8	801999	1885007	23.65
	l1	802866	1882372	29.37
9	l9	803727	1881949	31.26
	J	803894	1882185	30.81
37	Jonquier	805858	1884280	31.55
8	kpa5	803992	1882198	31.27
	Lac	802126	1884644	21.04
40	P40	806126	1883393	33.70
	C5 Honda	803701	1882871	31.33
13	PZD5	803146	1883123	29.07
15	T14	802099	1883871	25.27
18	EDF	803017	1890376	24.03
36	Ikea	804828	1889881	30.20
	P293	803471	1887939	28.97
	PZ2	805082	1888824	29.46
16	PZ13	802585	1889571	27.69
	S7	799598	1884930	20.03
14	T10	799717	1884327	21.10
19	T17	800809	1885351	21.10
41	83	806152	1886563	36.34
42	Bérud	806360	1885837	36.37

		Coordonnées en Lambert 2 étendu		
Numéro correspondant	Nom des points de mesure	X	Y	Z
39	Grangette	804931	1886975	25.78
38	Saad	805770	1885641	26.85
	10C	795455	1883166	15.72
	33100C	794543	1883368	17.86
	45970C	794820	1883971	18.01
	46200c	794659	1883902	17.72
	46650C	794350	1883740	17.15
	46870c	794229	1883654	16.56
	47100C	794094	1883535	16.22
	D210C	795507	1883185	17.80
	DD230C	795310	1883218	17.92
	DD250C	795111	1883251	18.04
	DD333c	794302	1883422	16.95
	DD110AC	796480	1882966	19.81
	DD170C	795901	1883119	18.48
35	P72	795965	1883740	17.22
	Pièzo n°1	796297	1883054	19.38
	Pièzo n°2	796100	1883086	18.35
	Pièzo t	796595	1882989	19.21
12	PZ05	795980	1883110	17.90
	accès Auchan	803299	1883069	29.19
	Aérodrome 1	806003	1881205	36.00
	Aérodrome 2	805868	1882018	33.82
	Aérodrome 3	805758	1882475	32.52
7	F11	805340	1880942	36.38
6	F 38	806204	1880998	38.50
43	Noel	806897	1882773	39.17
	pag1	805170	1882286	33.37
	pag2	805185	1882317	33.36
27	pag3	805186	1882330	33.20
	pag4	805189	1882333	33.17
	pag5	805189	1882334	33.15
	pag6	805190	1882330	33.16
17	Pascal	803760	1883020	30.75
	Puits a	806654	1880901	37.41
	Toyota C2	804140	1883007	30.72
25	A2	800016	1886703	19.74
20	I'2	799638	1886116	20.20
22	T3	797822	1884100	18.41

		Coordonnées en Lambert 2 étendu		
Numéro correspondant	Nom des points de mesure	X	Y	Z
26	D'2	801139	1886588	20.64
23	T1	797673	1884806	17.93
	T6	798712	1884490	19.40
	B2	797896	1883602	20.74
	D1	800385	1886457	20.06
	I'3	799646	1885624	19.82
	I'4	800200	1885859	20.33
	I'5	800544	1885271	20.44
	I'7	801334	1885259	22.24
	PZ6	799928	1886377	19.38
	P20	799760	1883296	23.70

Annexe 2

Les volumes d'eau mensuels calculés par un bilan hydraulique sur le Canal Crillon pour la période (2000-2012)

Mois	Volumes entrants (Mm ³)	Volumes sortants (Mm ³)	Volumes utilisés (Mm ³)	Consommation des plantes (Mm ³)	Volumes infiltrés (Mm ³)
janv-00	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
févr-00	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
mars-00	3.8	2.8	1.0	1.0	0.0
avr-00	3.3	1.6	1.6	1.0	0.6
mai-00	3.5	1.4	2.1	1.5	0.6
juin-00	5.6	1.4	4.2	2.0	2.2
juil-00	6.2	1.7	4.5	2.0	2.5
août-00	7.2	1.9	5.3	1.7	3.6
sept-00	4.7	1.6	3.0	1.2	1.9
oct-00	0.9	0.8	0.1	0.1	0.0
nov-00	1.3	1.2	0.1	0.0	0.1
déc-00	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0
janv-01	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
févr-01	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
mars-01	0.5	0.6	0.0	0.6	0.0
avr-01	3.7	1.6	2.1	1.2	0.9
mai-01	3.5	1.4	2.2	1.5	0.7
juin-01	6.8	1.6	5.2	2.0	3.2
juil-01	6.2	1.8	4.5	1.9	2.5
août-01	7.5	1.9	5.6	1.7	3.9
sept-01	5.7	2.1	3.5	1.2	2.4
oct-01	1.7	1.3	0.4	0.6	0.0
nov-01	1.3	1.5	0.0	0.4	0.0
déc-01	0.4	0.5	0.0	0.2	0.0
janv-02	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
févr-02	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
mars-02	1.0	0.6	0.5	0.8	0.0
avr-02	4.8	1.6	3.3	1.2	2.1
mai-02	4.1	1.4	2.7	1.5	1.2
juin-02	5.7	1.4	4.3	1.9	2.4
juil-02	6.4	1.4	5.0	2.1	2.9
août-02	6.0	1.5	4.4	1.7	2.7
sept-02	1.4	1.0	0.4	0.7	0.0
oct-02	2.4	1.1	1.3	0.4	0.8
nov-02	1.1	0.7	0.4	0.0	0.4
déc-02	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
janv-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
févr-03	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
mars-03	1.6	0.6	0.9	0.7	0.2
avr-03	3.6	1.3	2.3	1.1	1.2
mai-03	5.1	1.4	3.7	1.7	2.0
juin-03	6.6	1.0	5.6	2.2	3.4
juil-03	6.4	0.8	5.6	2.3	3.3

Mois	Volumes entrants (Mm ³)	Volumes sortants (Mm ³)	Volumes utilisés (Mm ³)	Consommation des plantes (Mm ³)	Volumes infiltrés (Mm ³)
août-03	6.2	1.0	5.2	1.9	3.3
sept-03	2.9	0.6	2.3	1.1	1.1
oct-03	1.1	0.2	0.9	0.6	0.3
nov-03	0.6	0.3	0.3	0.0	0.3
déc-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
janv-04	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
févr-04	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
mars-04	1.2	0.8	0.4	0.8	0.0
avr-04	3.0	0.6	2.5	1.1	1.4
mai-04	4.1	0.8	3.2	1.6	1.7
juin-04	6.3	0.9	5.3	2.1	3.2
juil-04	7.4	1.3	6.1	2.2	3.8
août-04	4.9	1.1	3.8	1.7	2.1
sept-04	4.5	1.1	3.3	1.3	2.0
oct-04	2.0	0.8	1.2	0.5	0.7
nov-04	1.4	0.7	0.6	0.4	0.2
déc-04	0.5	0.4	0.1	0.2	0.0
janv-05	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
févr-05	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
mars-05	2.7	0.8	1.9	0.7	1.2
avr-05	3.5	0.9	2.6	1.1	1.5
mai-05	5.4	1.3	4.1	1.7	2.4
juin-05	6.5	1.1	5.4	2.1	3.2
juil-05	6.7	0.9	5.8	2.3	3.5
août-05	7.1	1.1	6.0	2.0	4.0
sept-05	3.1	0.7	2.4	1.0	1.4
oct-05	3.0	0.9	2.2	0.6	1.6
nov-05	0.9	0.5	0.4	0.2	0.2
déc-05	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0
janv-06	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5
févr-06	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
mars-06	1.5	0.6	0.9	0.7	0.2
avr-06	5.0	1.0	4.0	1.4	2.7
mai-06	5.6	1.1	4.6	1.8	2.8
juin-06	6.0	0.9	5.1	2.1	3.0
juil-06	7.1	1.2	5.8	2.2	3.6
août-06	6.9	1.2	5.7	2.0	3.7
sept-06	4.4	1.1	3.3	1.1	2.2
oct-06	1.4	0.6	0.9	0.6	0.2
nov-06	1.2	0.6	0.6	0.1	0.5
déc-06	0.5	0.3	0.2	0.0	0.2
janv-07	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
févr-07	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
mars-07	1.9	0.7	1.2	0.9	0.4
avr-07	5.6	1.3	4.4	1.1	3.3

Mois	Volumes entrants (Mm ³)	Volumes sortants (Mm ³)	Volumes utilisés (Mm ³)	Consommation des plantes (Mm ³)	Volumes infiltrés (Mm ³)
mai-07	4.9	1.4	3.5	1.6	1.9
juin-07	5.4	1.3	4.1	1.7	2.3
juil-07	7.3	1.5	5.8	2.1	3.7
août-07	6.8	1.3	5.5	1.7	3.8
sept-07	3.5	0.7	2.7	1.4	1.3
oct-07	1.8	0.5	1.3	0.7	0.6
nov-07	1.5	0.8	0.7	0.5	0.2
déc-07	0.7	0.5	0.2	0.1	0.1
janv-08	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0
févr-08	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
mars-08	1.3	0.6	0.7	0.9	0.0
avr-08	3.2	0.9	2.3	1.2	1.2
mai-08	2.7	0.9	1.7	1.3	0.4
juin-08	3.9	1.0	2.9	1.8	1.0
juil-08	7.0	1.4	5.7	2.0	3.6
août-08	6.9	1.5	5.4	1.7	3.7
sept-08	2.7	1.6	1.1	1.1	0.1
oct-08	1.2	0.4	0.8	0.3	0.4
nov-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
déc-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
janv-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
févr-09	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
mars-09	1.0	0.4	0.6	1.0	0.0
avr-09	2.3	0.9	1.4	1.0	0.4
mai-09	4.3	1.1	3.2	1.7	1.6
juin-09	5.3	1.8	3.6	2.0	1.6
juil-09	6.8	1.6	5.3	2.1	3.1
août-09	6.9	1.4	5.4	1.9	3.5
sept-09	3.5	0.7	2.8	1.1	1.6
oct-09	1.7	0.7	1.0	0.8	0.2
nov-09	0.8	0.5	0.2	0.2	0.0
déc-09	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
janv-10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
févr-10	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
mars-10	0.8	0.5	0.3	0.7	0.0
avr-10	2.2	0.7	1.5	1.0	0.5
mai-10	2.3	0.8	1.5	1.5	0.0
juin-10	4.4	0.8	3.5	1.8	1.8
juil-10	6.4	1.0	5.3	2.3	3.1
août-10	6.5	1.1	5.4	1.8	3.6
sept-10	1.5	1.1	0.5	1.1	0.0
oct-10	1.7	0.6	1.0	0.3	0.7
nov-10	0.8	0.6	0.2	0.0	0.2
déc-10	0.3	0.3	0.0	0.1	0.0
janv-11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Mois	Volumes entrants (Mm ³)	Volumes sortants (Mm ³)	Volumes utilisés (Mm ³)	Consommation des plantes (Mm ³)	Volumes infiltrés (Mm ³)
févr-11	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
mars-11	0.5	0.0	0.5	0.6	0.0
avr-11	3.3	1.0	2.3	1.3	1.0
mai-11	6.0	1.2	4.8	1.7	3.1
juin-11	5.3	1.2	4.2	1.8	2.4
juil-11	5.1	1.6	3.5	1.9	1.6
août-11	6.6	1.4	5.2	1.7	3.5
sept-11	4.9	0.0	4.9	1.1	3.8
oct-11	3.7	0.0	3.7	0.8	2.9
nov-11	0.7	0.5	0.2	0.0	0.2
déc-11	0.6	0.5	0.1	0.2	0.0
janv.-12	0	0.0	0.0	0.3	0.0
févr.-12	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0
mars-12	2.6	1.1	1.5	1.0	0.5
avr.-12	4.0	1.5	2.5	1.1	1.4
mai-12	3.6	1.7	1.9	1.6	0.4
juin-12	7.2	1.7	5.5	1.9	3.6
juil.-12	6.8	1.9	4.9	2.1	2.8
août-12	6.8	2.0	4.8	1.8	3.0
sept.-12	3.9	1.7	2.2	1.2	1.1
oct.-12	1.1	0.6	0.5	0.7	0.0
nov.-12	0.8	0.5	0.3	0.1	0.1
déc.-12	0.4	0.3	0.1	0.1	0.0

Annexe 3

Les hauteurs et les niveaux (moyens mensuels) d'eau en Durance calculés pour la période 2010-2012

	Hauteur d'eau (m)			Points de mesures du niveau de la Durance (mNGF)						
Date	Bonpas	Tronçon 1	Tronçon 2	1	2	3	4	5	6	7
janv-10	1.37	1.73	0.49	37.32	34.14	29.28	26.28	23.19	21.74	16.88
févr-10	1.43	1.80	0.51	37.39	34.21	29.35	26.35	23.21	21.76	16.90
mars-10	1.42	1.80	0.51	37.39	34.21	29.35	26.35	23.21	21.76	16.90
avr-10	1.41	1.79	0.51	37.38	34.20	29.34	26.34	23.20	21.75	16.89
mai-10	1.46	1.85	0.53	37.44	34.26	29.40	26.40	23.22	21.77	16.91
juin-10	1.70	2.15	0.61	37.74	34.56	29.70	26.70	23.31	21.86	17.00
juil-10	1.23	1.56	0.44	37.15	33.97	29.11	26.11	23.14	21.69	16.83
août-10	0.70	0.88	0.25	36.47	33.29	28.43	25.43	22.94	21.49	16.63
sept-10	1.03	1.30	0.37	36.89	33.71	28.85	25.85	23.06	21.61	16.75
oct-10	0.91	1.16	0.33	36.75	33.57	28.71	25.71	23.02	21.57	16.71
nov-10	1.15	1.46	0.42	37.05	33.87	29.01	26.01	23.11	21.66	16.80
déc-10	1.29	1.63	0.46	37.22	34.04	29.18	26.18	23.16	21.71	16.85
janv-11	1.17	1.48	0.42	37.07	33.89	29.03	26.03	23.12	21.67	16.81
févr-11	1.26	1.60	0.45	37.19	34.01	29.15	26.15	23.15	21.70	16.84
mars-11	1.05	1.33	0.38	36.92	33.74	28.88	25.88	23.07	21.62	16.76
avr-11	0.86	1.09	0.31	36.68	33.50	28.64	25.64	23.00	21.55	16.69
mai-11	0.41	0.52	0.15	36.11	32.93	28.07	25.07	22.84	21.39	16.53
juin-11	0.99	1.25	0.36	36.84	33.66	28.80	25.80	23.05	21.60	16.74
juil-11	0.72	0.91	0.26	36.50	33.32	28.46	25.46	22.95	21.50	16.64
août-11	0.67	0.85	0.24	36.44	33.26	28.40	25.40	22.94	21.49	16.63
sept-11	0.75	0.95	0.27	36.54	33.36	28.50	25.50	22.97	21.52	16.66
oct-11	0.75	0.95	0.27	36.54	33.36	28.50	25.50	22.96	21.51	16.65
nov-11	1.54	1.94	0.55	37.53	34.35	29.49	26.49	23.25	21.80	16.94
déc-11	1.10	1.40	0.40	36.99	33.81	28.95	25.95	23.09	21.64	16.78
janv-12	1.05	1.33	0.38	36.92	33.74	28.88	25.88	23.07	21.62	16.76
févr-12	1.18	1.49	0.42	37.08	33.90	29.04	26.04	23.12	21.67	16.81
mars-12	1.13	1.42	0.41	37.01	33.83	28.97	25.97	23.10	21.65	16.79
avr-12	1.09	1.38	0.39	36.97	33.79	28.93	25.93	23.09	21.64	16.78
mai-12	1.02	1.29	0.37	36.88	33.70	28.84	25.84	23.06	21.61	16.75
juin-12	1.41	1.78	0.51	37.37	34.19	29.33	26.33	23.20	21.75	16.89
juil-12	0.83	1.05	0.30	36.64	33.46	28.60	25.60	22.99	21.54	16.68
août-12	0.65	0.82	0.23	36.41	33.23	28.37	25.37	22.93	21.48	16.62
sept-12	0.83	1.06	0.30	36.65	33.47	28.61	25.61	22.99	21.54	16.68
oct-12	0.79	1.00	0.29	36.59	33.41	28.55	25.55	22.98	21.53	16.67
nov-12	1.08	1.36	0.39	36.95	33.77	28.91	25.91	23.08	21.63	16.77
déc-12	1.16	1.47	0.42	37.06	33.88	29.02	26.02	23.11	21.66	16.80

Annexe 4

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

Nofal S., Blavoux B., Cognard-Plancq A.L., Marc V. & Travi Y. (2011).
Géologues, 167 : 61-64

LA TENDANCE VERS UNE SOURCE DOMINANTE DANS LES AGGLOMÉRATIONS MOYENNES

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-Planq, 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 Châteauneuf-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 événement 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 hydro-géologique 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-

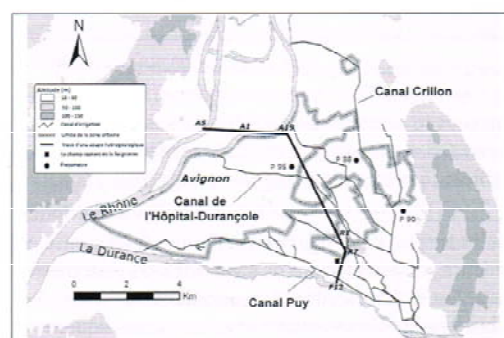


Figure 1. Situation géographique de la plaine alluviale d'Avignon (source Salah Nofal, 2010).

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.

LA TENDANCE VERS UNE SOURCE DOMINANTE DANS LES AGGLOMÉRATIONS MOYENNES

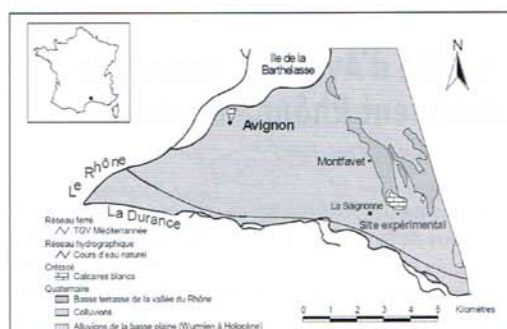


Figure 2. Schéma géologique de la plaine d'Avignon (Bogner, 2004).

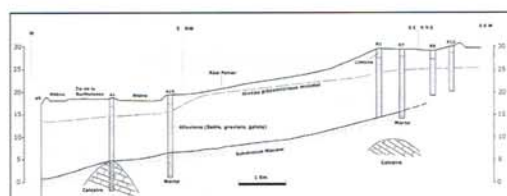


Figure 3. Coupe hydrogéologique SE-NW de l'aquifère alluvial (source Salah Nofal, d'après Durozoy 1964).

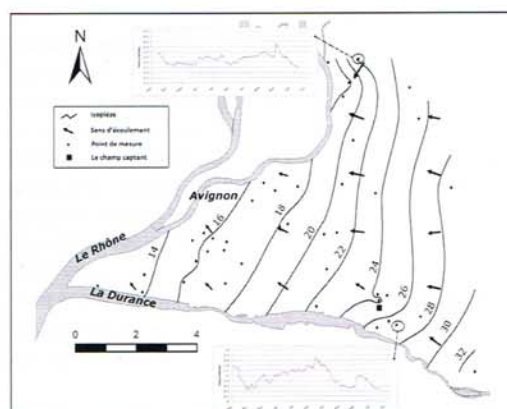


Figure 4. Carte piézométrique en hautes eaux (source Salah Nofal).

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,

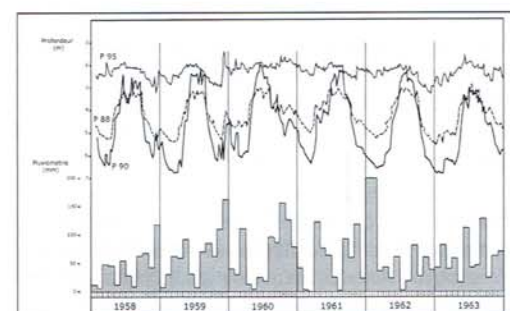


Figure 5. Variations pluriannuelles de niveau dans 3 piézomètres du système alluvial (Durozoy 1964).

2. DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) aujourd'hui.
3. Provence - Alpes - Côte d'Azur.

LA TENDANCE VERS UNE SOURCE DOMINANTE DANS LES AGGLOMÉRATIONS MOYENNES

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 Saignonne 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 découpée 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

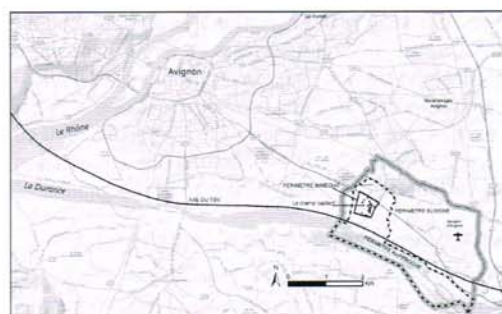


Figure 6. Tracé des périmètres de protection du champ captant d'Avignon (source Salah Nofal, 2010, d'après Burgéap 1995).

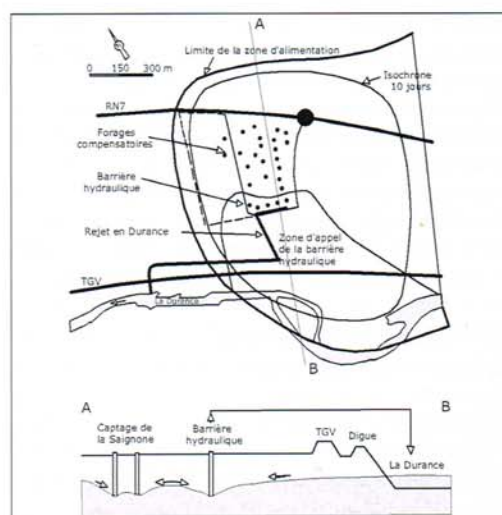


Figure 7. Schéma du dispositif de la barrière hydraulique et de son fonctionnement (Burgéap, 1995).

(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

LA TENDANCE VERS UNE SOURCE DOMINANTE DANS LES AGGLOMÉRATIONS MOYENNES

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 filiales 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 DBO₅ des effluents trop faible (< 8 mg/l) et d'un débit trop élevé, rarement inférieur à 5 m^3/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 C., 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.

Annexe 5

Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en basse Provence :
exemple de la plaine d'Avignon

Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Tison F., Daniel M. & Travi Y. (2012).

In De l'eau agricole à l'eau environnementale en Méditerranée, Résistance et adaptation aux nouveaux enjeux de partage de l'eau en Méditerranée, (Chapitre 11). Coordination C. Aspe, Ed. Quae, Paris, France. ISBN 9782759216963 (384 pages) pp. 159-173.

Chapitre 11

Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence Exemple de la plaine d'Avignon

SALAH NOFAL, ANNE-LAURE COGNARD-PLANCQ, VINCENT MARC, FRANCK TISON,
MICHEL DANIEL, YVES TRAVI

*Ce chapitre est dédié à notre collègue Gilles Mallessard, décédé le 5 mai 2011,
et à Safouk Al Khalifeh, maître de conférences à l'Université d'Alep, Syrie,
décédé le 11 mai 2011, victime d'une fusillade lors d'affrontements à Homs en Syrie.*

Résumé. La recharge de la nappe d'Avignon est assurée, pour une grande partie, par l'irrigation gravitaire (canaux alimentés par la Durance) avec des volumes dérivés très supérieurs aux besoins des plantes. Les agriculteurs sont donc loin d'être les seuls bénéficiaires du système d'irrigation. La quantification et la localisation de cette recharge sont indispensables pour évaluer l'impact de la diminution des surfaces agricoles et d'une gestion des ressources en eau adaptée aux éventuels changements climatiques. Nous présentons ici les résultats préliminaires de cette étude (bilan irrigations, déprise agricole, hydrodynamisme de la nappe et traçage isotopique) qui devrait déboucher sur un modèle permettant de simuler cette évolution¹.

En Basse Provence, les pratiques agricoles font appel aux techniques d'irrigation, pour pallier le déficit pluviométrique pendant les périodes de croissance et de production végétale. Outre le bénéfice direct sur la production agricole, un effet induit de ces pratiques a été mis en évidence sur les nappes alluviales (Faguet et al., 1980 ; Lacroix et al., 1995). En effet, les apports d'eau par irrigation gravitaire ne sont que partiellement utilisés par les plantes. Une part non négligeable de cette eau s'infiltre et percole vers les

¹ Pour les données et les renseignements qu'ils nous ont communiqués, les auteurs remercient : Mr J.P. Ogias de la mairie d'Avignon, Mme L. Moreau et Mr C. Doddoli du syndicat mixte d'aménagement de la vallée de la Durance, MMr. J. Gourmelon et C. Bahègne de la communauté d'agglomération du Grand Avignon, MMr Ph. Arrigoni et N. Denarié de la SNPE, Mme J. Mosseri d'EDF, Mr Charmasson, Mme Raousset, Mr L. Pascal, Mr P. Pascal et Mme Recordier des associations de canaux, Mr A. Muscat et Mme M. Lebrun de la chambre d'agriculture du Vaucluse, MMr C. Genre-Grandpierre et P. Martin de l'UMR espace – université d'Avignon.

De l'eau agricole à l'eau environnementale

nappes. Il en résulte un équilibre hydrodynamique particulier des aquifères superficiels. L'alimentation des nappes est à la fois naturelle (alimentation par infiltration des pluies, alimentation par le réseau hydrographique ou par lien avec d'autres compartiments aquifères), mais aussi artificielle par ces apports d'eau issue de l'irrigation.

Dans une logique d'économie d'eau, de possibles changements dans les pratiques d'irrigation pourraient mener à une gestion « plus rationnelle » de l'eau en irrigation. De cette gestion plus économe de l'eau en agriculture, exacerbée par une déprise agricole dans certains territoires sujets à l'urbanisation, pourraient résulter de profondes modifications de l'équilibre hydrodynamique des aquifères sous-jacents.

Pour anticiper les conséquences des choix qui pourraient être faits sur l'utilisation « raisonnée » de l'eau agricole, il est fondamental de comprendre les modes de recharges des aquifères, et de faire la part entre les apports naturels et les apports anthropiques. Dans ce cadre, les suivis piézométriques permettent de mettre clairement en évidence, de manière qualitative, un mode de recharge par l'irrigation en identifiant une oscillation bimodale annuelle du niveau des nappes. L'été et l'hiver correspondent alors aux périodes de hautes eaux et de basses eaux respectivement. L'utilisation conjointe de suivis piézométriques et du traçage isotopique permet d'aboutir à une réelle quantification de la part d'eau de l'aquifère issue de l'irrigation.

Nous avons entrepris d'étudier les processus de recharge de la nappe alluviale de la plaine d'Avignon. L'étude a été initiée, en 2008, dans le contexte d'un projet pédagogique proposé chaque année aux étudiants du master Hydrogéologie Sol et Environnement de l'université d'Avignon et des Pays du Vaucluse. Une étude plus approfondie est menée en parallèle avec un travail de doctorat (thèse en cours de S. Nofal²). Il s'agit donc d'une étude ambitieuse à l'échelle d'une petite région. L'objectif final est d'élaborer un bilan en eau au pas de temps mensuel (ou inférieur si possible). Il consiste aussi à construire un modèle de nappe prenant en compte, de la manière la plus fiable possible, les processus de recharge en intégrant le rôle du sol et de son usage. Ce travail est basé sur une démarche multi approches utilisant, en particulier, la complémentarité entre le suivi piézométrique (carte piézométrique à différentes périodes de l'année, suivi chronologique ponctuel) et la technique du traçage naturel de l'eau (signal hydrochimique et isotopique).

Problématique générale de la recharge des nappes par l'irrigation

À la fin des années 1970, une étude entreprise par le ministère de l'Agriculture (Faguet *et al.*, 1980) a démontré que les quantités d'eau théoriquement allouées à l'agriculture étaient très largement supérieures à la norme admise (0,5 à 0,7 l/s/ha) dans le département de Vaucluse. En effet, les débits fictifs apportés aux zones irriguées ont été évalués à environ 2,3 l/s/ha, avec une forte disparité entre les zones irriguées. La valeur maximale avait été obtenue dans la plaine d'Avignon (tableau 11.1).

Cette étude, datant d'une vingtaine d'années, pose la problématique du statut des excédents de l'irrigation. Dans le contexte de la gestion des ressources en eau, elle vise à rationaliser l'utilisation agricole de l'eau pour :

² Doctorat de l'université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, spécialité « Hydrogéologie ». Sujet : Étude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale d'Avignon, sous la direction du Professeur Yves Travi.

Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence

- revoir à la baisse les dotations ;
- maintenir la dotation stable ou augmenter les surfaces irriguées.

Par ailleurs, l'étude révèle la prise de conscience des services rendus par cet excédent d'eau, en assurant la recharge des nappes et le soutien des débits des rivières.

En 2003, des mesures de volumes entrants et sortants ont été effectuées sur des filiales représentatives du canal Puy d'Avignon et du canal de l'Hôpital (Hydrosol ingénierie, 2004). Les résultats obtenus ont ensuite été extrapolés à l'ensemble de ces deux canaux. En compilant ces résultats avec les mesures de flux effectuées sur le canal Crillon, nous confirmons que les volumes entrants sont très supérieurs aux besoins théoriques des cultures (figure 11.1). Ces besoins ne représentent que 7 % des volumes entrants à l'échelle de l'année en Avignon. En juillet, la période la plus cruciale, ces besoins montent à 15 %.

Tableau 11.1. Débit fictif d'eau issue de la Durance allouée aux activités agricoles pour le département du Vaucluse.

	Surface réputée arrosée* (ha)	Dotation en eau (l/s)	Débit fictif (l/s/ha)	Surface corrigée** (ha)	Débit fictif corrigé (l/s/ha)
Prise de Mallemort					
Canal mixte	7 980	12 290	1,54		1,54
Canal St-Julien	3 968	7 228	1,82	2 000	3,5
Plaine d'Avignon	2 076	7 590	3,65	1 600	4,7
Canal sud Luberon	3 251	4 498	1,38	2 000 à 2 200	2,2 à 2,5
Total	17 275	31 606	1,83	13 580 à 13 780	2,29 à 2,33

* Surfaces figurant dans les déclarations remises à la Commission exécutive de la Durance

** Surfaces corrigées en fonction des redevances perçues par les gestionnaires des réseaux

Source : Fauget *et al.* 1980.

À l'échelle de l'année, seuls 54 % du volume entrant sont effectivement utilisés sur l'ensemble du territoire. Toutefois, on note une forte disparité entre les canaux. Quant au volume d'eau « utilisée » par les irrigants (différence entre volumes entrant et sortant), il est estimé que seuls 13 % (4,94 Mm³) de cette eau sont effectivement consommés par les plantes (tableau 11.2). Par différence, le volume global infiltré vers la nappe est estimé à 87 % de l'eau utilisée (33,61 Mm³). Ce chiffre très élevé s'explique par la méthode d'irrigation (irrigation gravitaire) et par la gestion des canaux qui impliquent de nombreuses pertes, à divers niveaux. Un chiffre similaire (81 %) a été précédemment proposé pour le canal du Crillon, le plus important vecteur de dérivation des eaux duranciennes dans la plaine (Michallet, 1998).

Dans notre zone d'étude, le rôle de l'irrigation dans la recharge des nappes est certain. Mais, l'évaluation des quantités d'eau effectivement apportées reste imprécise. En effet, les chiffres fournis pour le canal Puy et le canal de l'Hôpital ont été obtenus dans le cadre d'études ponctuelles. Les mesures effectuées n'ont pas été pérennisées. De plus, une forte incertitude porte sur le volume effectivement consommé par les cultures. Des doutes existent aussi sur la surface du périmètre réellement irrigué et sur les cultures présentes

De l'eau agricole à l'eau environnementale

dans ce périmètre. À cela s'ajoute le mode de calcul, peu précis, basé sur l'utilisation de coefficients cultureaux.

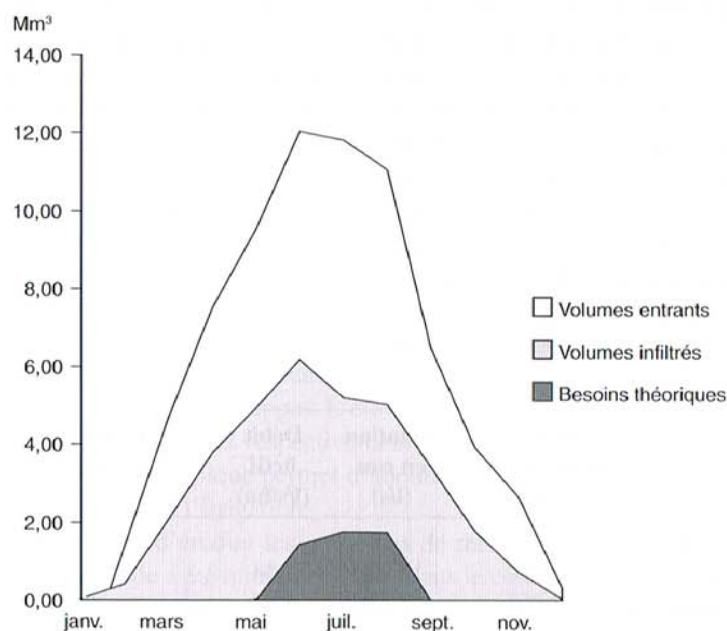


Figure 11.1. Répartition des volumes entrants sur les périmètres irrigués d'Avignon en 2003.

Source : Association du canal Crillon et Hydrosol Ingénierie, 2004.

Tableau 11.2. Bilan d'eau effectué, en 2003, pour les trois canaux (canaux Puy, Hôpital et Crillon) de la plaine d'Avignon (un Mm³= 1 million de m³).

	Volumes entrants (Mm ³)	Volumes sortants (Mm ³)	Volumes utilisés (Mm ³)	Besoin des cultures (Mm ³)	Volumes infiltrés (Mm ³)	Ratio entre volumes infiltrés et volumes utilisés (Mm ³)
Canal Hôpital	26,25	20,55	5,70	1,19	4,51	79 %
Canal Puy	10,92	4,88	6,04	0,63	5,41	90 %
Canal Crillon	34,18	7,36	26,81	3,13	23,68	88 %
Total	71,35	32,79	38,55	4,94	33,61	87 %

Source : Association du canal Crillon et Hydrosol Ingénierie, 2004.

Présentation du périmètre d'étude

Notre zone d'étude s'étend au confluent du Rhône et de la Durance, dans une plaine alluviale quaternaire de forme triangulaire. Ses limites naturelles sont : le Rhône au nord-ouest, la Durance au sud et les collines tertiaires de Châteauneuf de Gadagne à l'est. Le relief de cette plaine est peu marqué, du pied des collines (40 m d'altitude) à l'est jusqu'au confluent (16 m d'altitude) à l'extrême ouest.

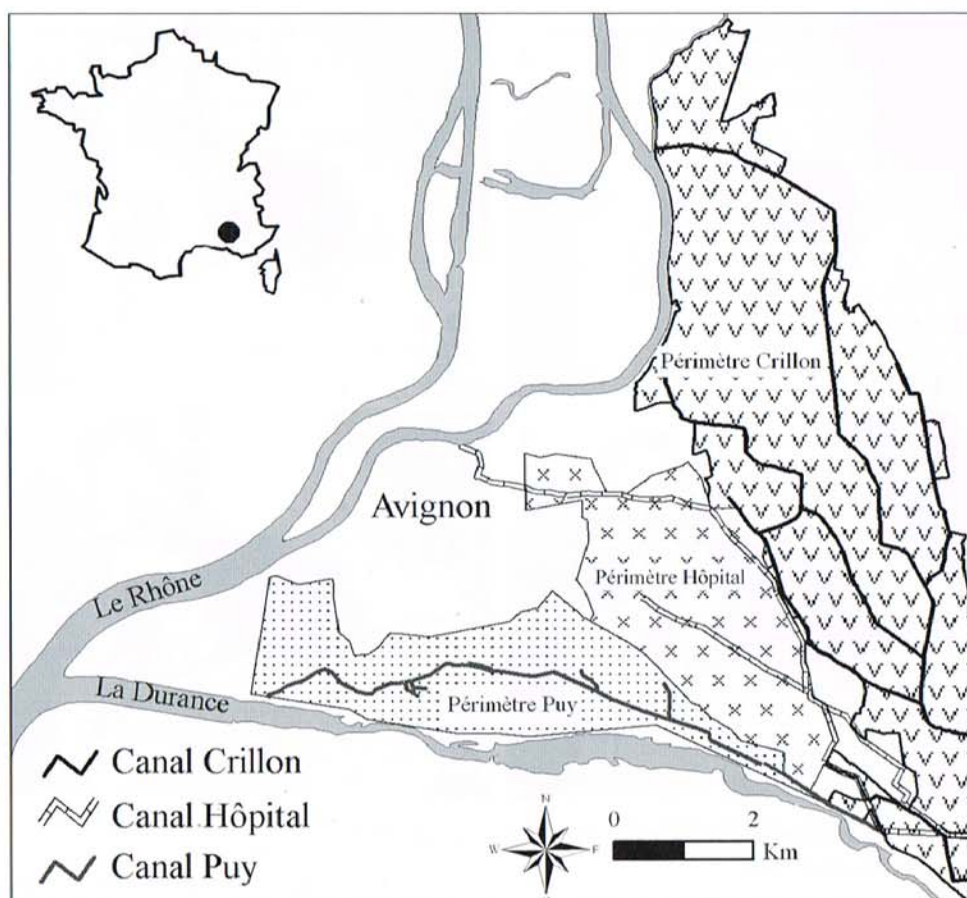
Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence

Figure 11.2. Réseaux et périmètres d'irrigation de la plaine d'Avignon. Carte élaborée d'après la base de données cartographique SIG de la COGA (Communauté d'agglomération du Grand Avignon).

À partir de la Durance, trois principaux canaux d'irrigation permettent d'alimenter les terres agricoles en eau, de manière gravitaire à l'aide de nombreuses filioles. Ils jouent un rôle important dans l'aménagement de la région d'Avignon. Mis en service en 1808 et long de 10 km, le canal Puy dessert 140 ha irrigués (état en 2000) au sud, dans la ceinture verte d'Avignon au niveau des berges de la Durance. Créé en 1775, le canal Crillon s'étend du sud vers le nord sur près de 19 km, en comptant ses principales filioles. Il irrigue 700 ha de parcelles. Le canal de l'Hôpital-Durançole, en position intermédiaire, a été mis en service au XIII^e siècle. Il irrigue 266 ha au sud-est de l'agglomération et se termine en ville en traversant plusieurs quartiers de la ville d'Avignon (figure 11.2).

La basse vallée de la Durance est caractérisée par des sols fertiles ; l'activité agricole y est très développée grâce aux apports d'eau par irrigation. Mais, la plaine alluviale d'Avignon s'inscrit dans un contexte majoritairement urbanisé. Aujourd'hui, les territoires agricoles n'occupent plus que 30 % de la surface. Ce chiffre est le résultat d'une extension progressive de l'agglomération d'Avignon vers l'est, tendant à faire disparaître les surfaces agricoles au profit de zones urbanisées (figures 11.3 et 11.4).

De l'eau agricole à l'eau environnementale

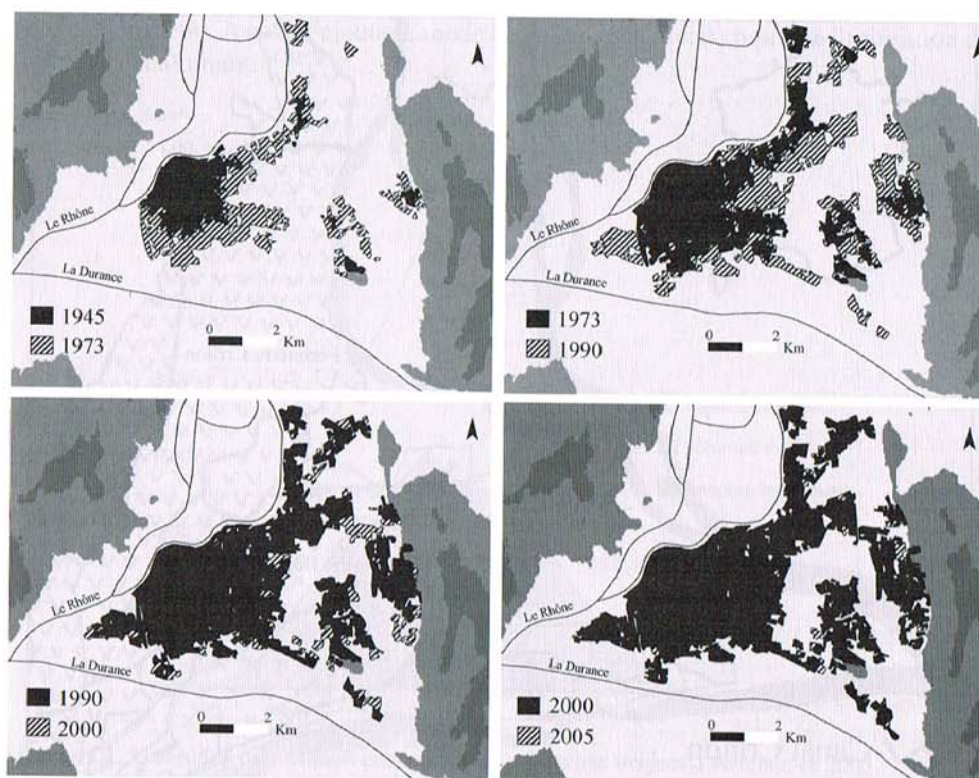


Figure 11.3. Extension de l'agglomération d'Avignon depuis 1945.
Source : Al Khalifeh, 2008.

Les eaux souterraines sont fortement sollicitées pour l'alimentation en eau potable. Situé à quelques kilomètres au sud-est d'Avignon, le champ captant de la Saignonne est la seule ressource en eau de la collectivité (pompage moyen de 40 000 m³ par jour). Elle alimente 120 000 usagers. Les eaux souterraines répondent aussi aux besoins industriels et à certains besoins agricoles (arrosage par aspersion). On note également la présence de nombreux puits et forages individuels qui alimentent les habitations en eau domestique ou en eau d'arrosage. La ressource sollicitée est localisée dans la nappe alluviale d'accompagnement de la Durance et du Rhône. Il s'agit d'une nappe principalement libre. Dans le fonctionnement général de la recharge de cette nappe, le rôle de l'irrigation des terres est primordial. Cette irrigation, encore très active, participe à la recharge de l'aquifère de telle sorte que le niveau d'eau de la nappe est maximal en été et minimal en hiver. L'impact de l'irrigation est particulièrement important à appréhender, dans un contexte d'urbanisation où la tendance est à une réduction des volumes irrigués (figure 11.4). Les scénarii de changement climatique dans la région, quant à eux, prédisent une augmentation de l'aridité. La nappe alluviale d'Avignon fonctionne aussi en lien étroit avec la Durance. Sur la majorité de son cours, cette rivière soutient les écoulements, alors que le fleuve Rhône draine la nappe. Le régime d'écoulement et les côtes hydrauliques de ces deux cours d'eau sont fortement contraints par l'homme (barrages de la compagnie nationale du Rhône sur le Rhône, barrages et seuils sur la Durance).

Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence

La qualité chimique et bactériologique de l'eau souterraine est également un enjeu majeur. Les pollutions éventuelles peuvent provenir de l'activité agricole, mais aussi (et de plus en plus) de l'urbanisation et de l'industrie (lessivage des routes, déversements accidentels de produits toxiques, rejets industriels, etc.)

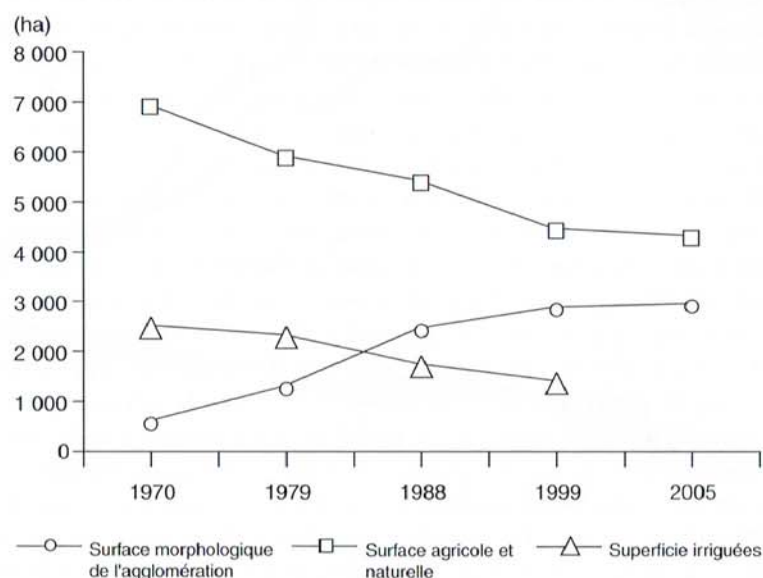


Figure 11.4. Évolution des superficies des zones urbaines, agricoles, naturelles et irriguées dans la plaine d'Avignon entre 1970 et 2005.

Sources : Alkhalifeh, 2008 ; Sogreah, 2000

La gestion raisonnée de la ressource est complexe à cause de la forte empreinte de l'homme sur ce milieu. De multiples acteurs sont impliqués dans cette gestion :

- l'Agence de l'eau RMC pour le financement et le contrôle des bons usages ;
- les associations d'irrigants ;
- la chambre d'agriculture du Vaucluse pour l'irrigation et la qualité de l'eau ;
- la compagnie nationale du Rhône ;
- la communauté d'agglomération du Grand Avignon en tant que responsable, entre autres, de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement ;
- le conseil général du Vaucluse par le biais du service environnement et du laboratoire départemental ;
- la Direction départementale des territoires du Vaucluse qui joue, entre autres, le rôle de police et du suivi des prélèvements agricoles ;
- EDF qui assure la dotation, en eau de la Durance, des canaux d'irrigation ;
- Veolia Eau en tant que fermier exploitant l'usine de la Saignonne ;
- la mairie d'Avignon par l'intermédiaire du service travaux, du service de l'urbanisme et du service environnement ;
- le Syndicat mixte d'aménagement de la vallée de la Durance qui assure la gestion des crues, l'amélioration de la sécurité, le transport solide et la gestion des différents usages.

Contexte géologique et hydrogéologique

Les alluvions grossières qui constituent la basse plaine d'Avignon ont une double origine. Elles ont été déposées par le Rhône dans leur majorité. Cependant, on trouve des alluvions amenées par la Durance dans la partie sud de la plaine. Il s'agit d'un cône de déjection de cette rivière au moment où elle abandonnait son ancien lit. Initialement, ce lit l'amenait directement à la Méditerranée via la Crau, pour faire irruption dans le bas-Rhône. Cet événement date probablement des dépôts du Würm récent et de l'Holocène. Les alluvions de la basse plaine, d'une épaisseur moyenne de 15 m, sont généralement recouvertes de limons d'inondation argilo-sableux de 1 et 4 m.

Le substratum de ces alluvions, reconnu par de nombreux forages, est constitué essentiellement par des marnes attribuées au Miocène (Burdigalien). Ces marnes affleurent à l'est dans les collines de Caumont – Chateauneuf de Gadagne. On les retrouve à l'ouest, sur l'autre rive du Rhône, ennoyant les reliefs de calcaire blanc du Crétacé inférieur (Barrémien) de Villeneuve-lès-Avignon. Cependant, certains forages ont rencontré les calcaires du Barrémien, directement sous les alluvions. D'ailleurs, on suppose, par places, la présence d'argiles pliocènes (Plaisancien) intercalées entre la molasse et les alluvions. Cette hétérogénéité du substratum s'accompagne aussi d'une morphologie complexe. En effet, des appointements de calcaire crétacé s'élèvent au-dessus de la plaine d'Avignon. C'est le cas du rocher des Doms qui supporte le Palais des papes, ainsi que le Mont de Vergues à Montfavet (figure 11.5). 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 (figure 11.6), rend compte de ce contexte.

Les alluvions 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 5.10^{-3} m/s. Calculé par essais de nappe, l'emménagement moyen est de l'ordre de 0,06 (Bogner, 2004). Cette valeur est quasi équivalente aux 5 % avancés par Burgéap (1995) pour la porosité efficace, car la nappe est généralement libre. La nappe est peu profonde, de 3 à 6 m sous la surface du sol. Elle circule assez rapidement dans les alluvions (plusieurs mètres par jour).

Les modes de recharge de la nappe alluviale

La réalimentation de l'aquifère alluvial d'Avignon se fait, entre autres, par les surplus de l'irrigation gravitaire. Elle est mise en évidence par les variations de niveau de trois piézomètres de l'ancien réseau de surveillance de la Duren-Paca (figure 11.7). Les points de mesure sont localisés sur la figure 11.8.a. Les deux piézomètres amont accusent classiquement des oscillations de plus de 3 m alors que le piézomètre aval, proche du niveau de base constitué par 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. Tandis que les basses eaux apparaissent en hiver (février et mars), quand les canaux d'irrigation sont au chômage. Cette particularité persiste, comme le montrent les enregistrements réalisés actuellement sur trois autres piézomètres

Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence

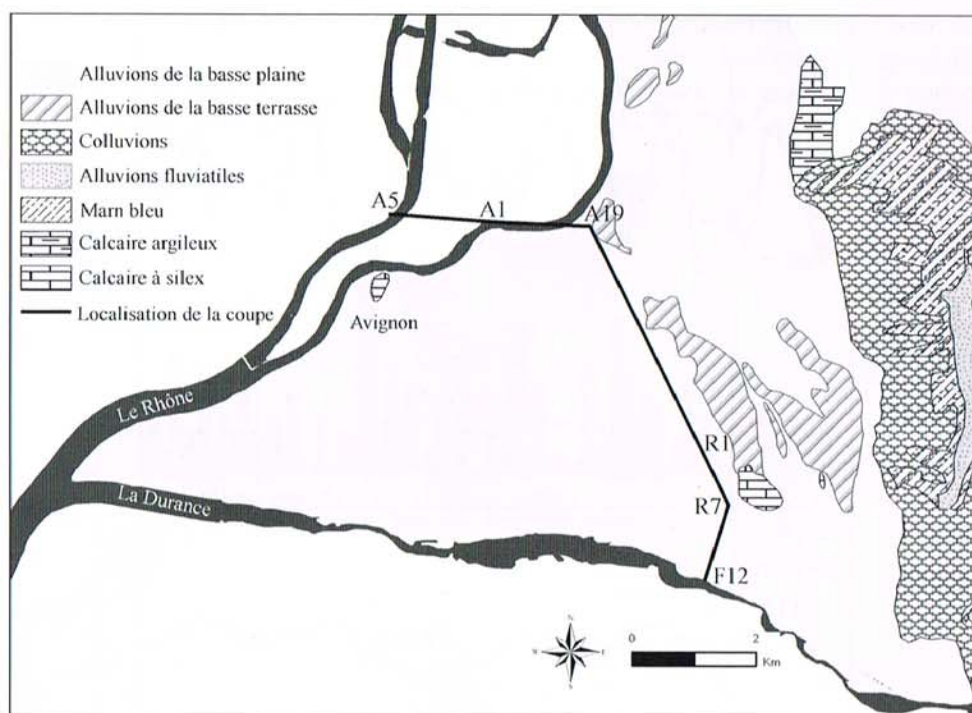


Figure 11.5. Carte géologique synthétique de la zone d'étude.
Source : modifiée d'après Infoterre BRGM. <http://infoterre.brgm.fr>

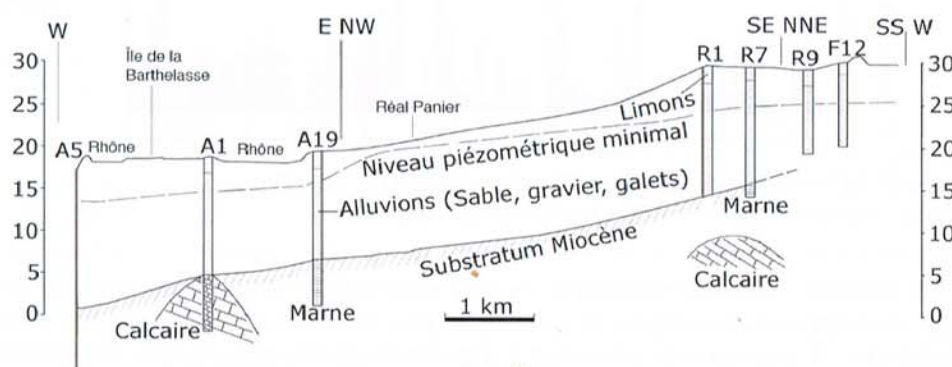


Figure 11.6. Coupe géologique (localisée sur la figure 11.5).
Source : modifiée d'après Durozoy *et al.* 1964.

(figure 11.7). Sur ces trois piézomètres, les variations semblent être d'amplitude plus faible. Cependant, la localisation différente des points de mesure, avec deux points au sud de la zone d'étude et un à l'extrême nord, rend difficile toute interprétation en matière de changement des modes de recharge.

De l'eau agricole à l'eau environnementale

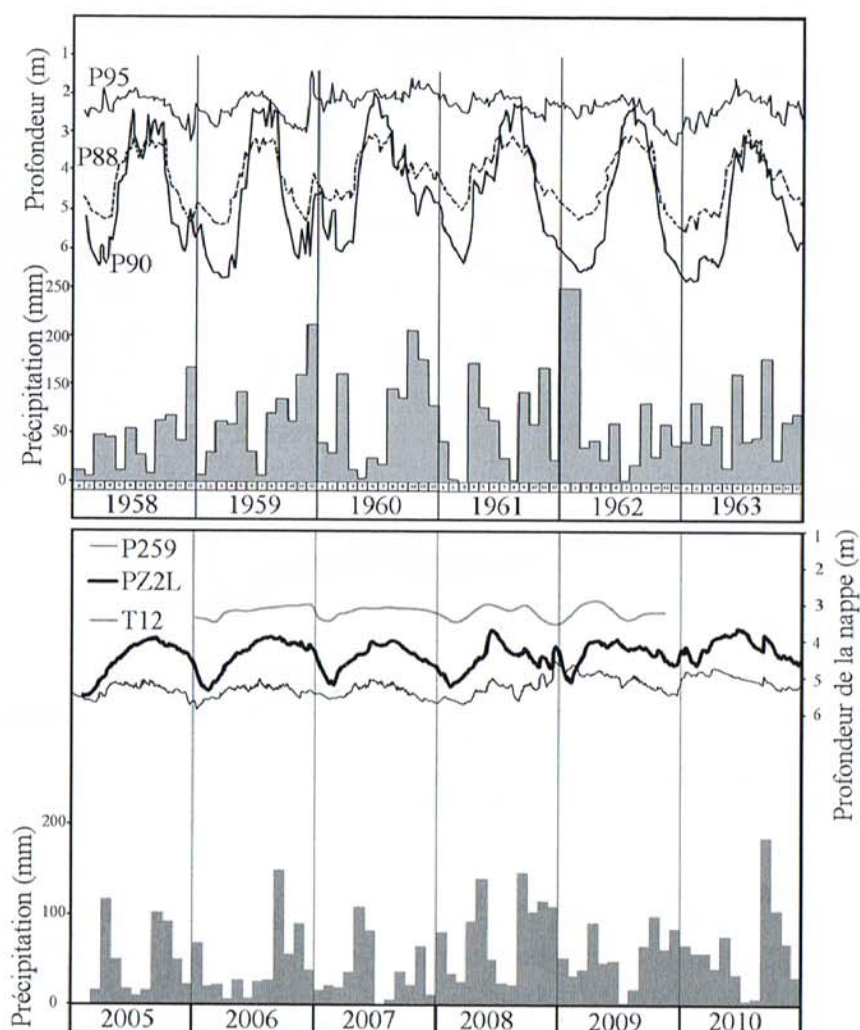


Figure 11.7. Chroniques piézométriques - Périodes 1958-1963 et 2005-2010.
Sources : Durozoy *et al.* 1964 et ADES <http://ades.eaufrance.fr>

Une première carte piézométrique détaillée a été établie en novembre 2010, en période de moyennes eaux (figure 11.8.a) et une autre en février 2011, en étiage d'hiver (figure 11.8.b). Ces cartes ne présentent pas de différences fondamentales à l'échelle de la plaine alluviale. Elles montrent un écoulement général E. SE-W. NW dans la partie sud-est de la plaine. Elles révèlent ainsi une alimentation par la Durance en sa bordure, accentuée et perturbée par les importants pompages du champ captant d'Avignon. Plus au nord, les écoulements sont franchement est-ouest. La comparaison des deux cartes piézométriques propose une répartition géographique de l'amplitude des variations piézométriques. La carte figure 11.8.c montre que la zone d'influence maximale des irrigations sur la réalimentation de la nappe (correspondant à l'abaissement maximal, supérieur à 40 cm) se situe à l'est d'Avignon (zone essentiellement irriguée). Elle s'atténue lorsque l'on se rapproche de la Durance, en même temps que l'influence de la réalimentation

Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence

par la Durance grandit. Le même phénomène est constaté lorsque l'on se rapproche des versants, à l'extrémité est. À la limite extrême de ces versants, il est même constaté une remontée de la nappe (+ 86 cm); ce qui montre un comportement de ces zones plus en accord avec le climat.

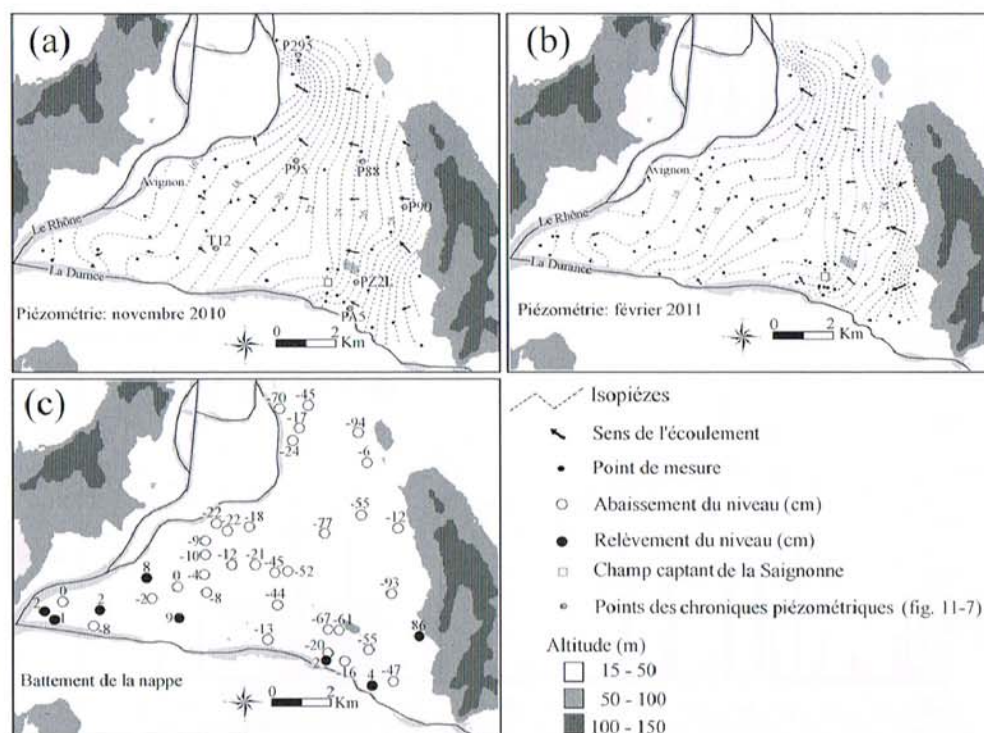


Figure 11.8. Cartes piézométriques de novembre 2010 (a), de février 2011 (b) et carte de battement de la nappe entre ces deux périodes (c).

La figure 11.9 présente le résultat de l'évaluation de l'excédent d'eau des précipitations sur notre zone d'étude. Le calcul est réalisé par le bilan hydrologique du type Thornthwaite, au pas de temps mensuel, avec une réserve facilement utilisable de 100 mm. Le caractère variable du régime pluviométrique méditerranéen se traduit par une très forte disparité intra et interannuelle de cet excédent. Pendant les périodes de pluviométrie faible à normale (périodes 1990-1993, 1997-2000 et 2004-2007), la piézométrie du point PA5 montre que le comportement de la nappe répond à l'alimentation par l'irrigation. Le cycle est alors bimodal avec des hautes eaux en été et des basses eaux en hiver. Pendant les périodes humides (1993-1997 et 2000-2004), la nappe réagit sous la double influence de l'irrigation et de la pluviométrie.

Compte tenu de l'ensemble des informations piézométriques disponibles, on constate que l'alimentation principale de l'aquifère alluvial d'Avignon se fait, sur sa frontière sud-est, par des entrées en provenance de la Durance et par l'irrigation gravitaire des terres agricoles. Les pluies efficaces et l'alimentation en provenance des versants molassiques ne jouent probablement qu'un rôle mineur en période de pluviométrie faible à moyenne. Le double mode d'alimentation de cette nappe est donc confirmé.

De l'eau agricole à l'eau environnementale

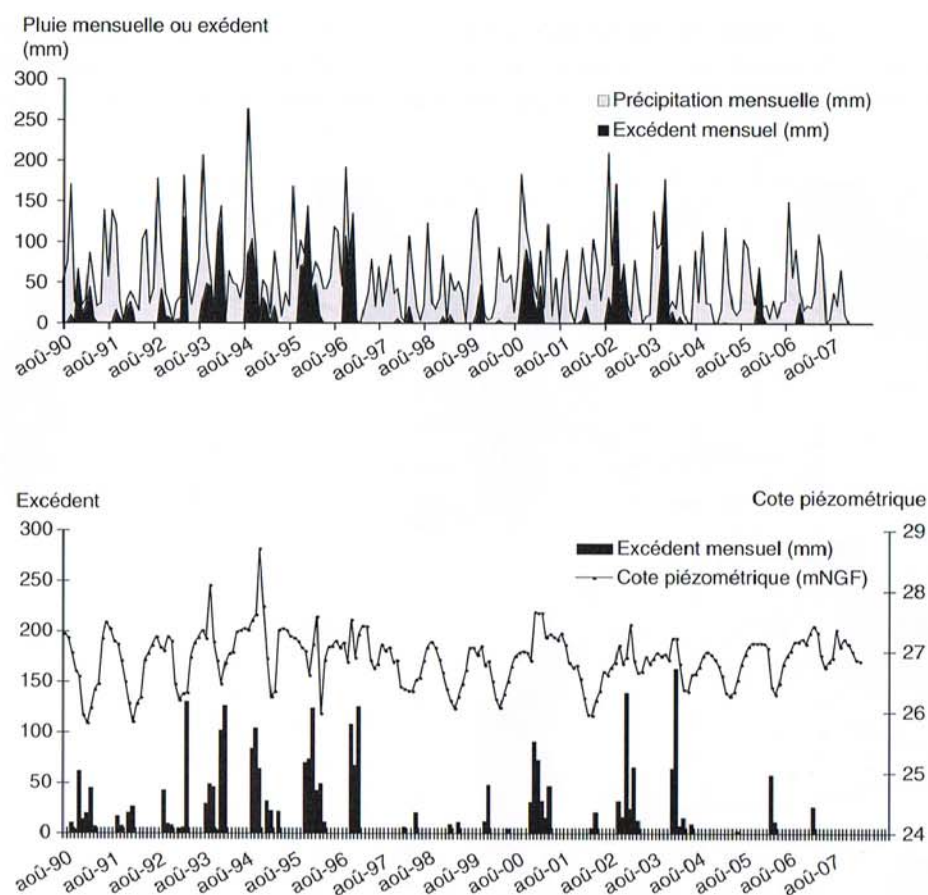


Figure 11.9. Bilan hydrologique mensuel et piézométrie, 1990-2007.

Source : Base de données ADES (piézométrie) et Inra d'Avignon – Base de données Climatik (données climatiques).

Pour bien faire la part spatio-temporelle entre les différents processus de recharge de cet aquifère, nous avons mené une étude basée sur le traçage naturel. Nous avons analysé les teneurs en oxygène 18 et en deutérium de l'eau. Pour ce traçage, on utilise les rapports d'abondance des deux isotopes d'un même composé (isotope rare sur isotope léger banal). Par exemple pour l'oxygène, $R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$. Comme la concentration en valeur absolue de l'isotope rare est très faible, on s'intéresse davantage aux variations relatives des deux isotopes. Les valeurs sont exprimées en $\delta\text{‰}$ par rapport à un standard : $\delta\text{‰} = (R_x/R_s - 1) \times 1000$. Les indices x et s font référence respectivement à l'échantillon et au standard. Pour les isotopes de la molécule d'eau, le standard de référence ($\delta\text{‰} = 0\text{‰}$) correspond à une valeur voisine de celle des océans (SMOW), le réservoir d'origine de la vapeur d'eau. La modification des rapports isotopiques, encore appelée «fractionnement», intervient essentiellement lors des changements de phase, principalement lors des phénomènes de condensation ou d'évaporation. Ce fractionnement est thermo dépendant. Lors de la condensation par exemple, il peut être relié à la température

Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence

sous le nuage et, par extension, à la température au sol. Cette température diminuant avec l'altitude, les précipitations sur les bassins d'altitude seront significativement appauvries en isotope lourd. Les systèmes fluviaux conservent les empreintes de ses différents processus acquises sur leurs bassins d'alimentation. Ils peuvent ainsi véhiculer des eaux avec des signatures isotopiques bien différenciées.

Dans notre cas, on considère que la nappe est un mélange de deux eaux. En effet, les eaux de la Durance (directement ou via l'irrigation) sont très appauvries en ^{18}O ($\delta^{18}\text{O} = -10$ à -11 ‰) (Mallessard, 1983; Lacroix *et al.* 1995). Ce faible taux de ^{18}O s'explique par son alimentation alpine par des bassins de haute altitude, d'une part, et par les eaux de pluie locales (moyenne pondérée de $-6,40$ ‰, réseau UAPV, 1999-2009), d'autre part. Les eaux de pluie se rencontrent particulièrement dans les puits situés au pied des coteaux. Ces puits sont directement alimentés par le ruissellement. Le marquage des alimentations de l'aquifère alluvial montre que les eaux dérivées de la Durance ont des teneurs en ^{18}O voisines de -10 ‰, tandis que celles qui sont issues de la pluie sont de l'ordre de -6 à -8 ‰. Ces résultats sont obtenus à partir d'une analyse des eaux de la nappe et en appliquant l'équation de mélange.

Un réseau de suivi a depuis été mis en place de manière à noter mensuellement l'évolution de l'eau, depuis son infiltration jusqu'à l'exutoire de l'aquifère. Sur la figure 11.10, nous retrouvons, sans surprise, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ les plus négatives dans la zone irriguée (pôle de l'irrigation) où il a été observé un battement maximal de la nappe. La valeur de

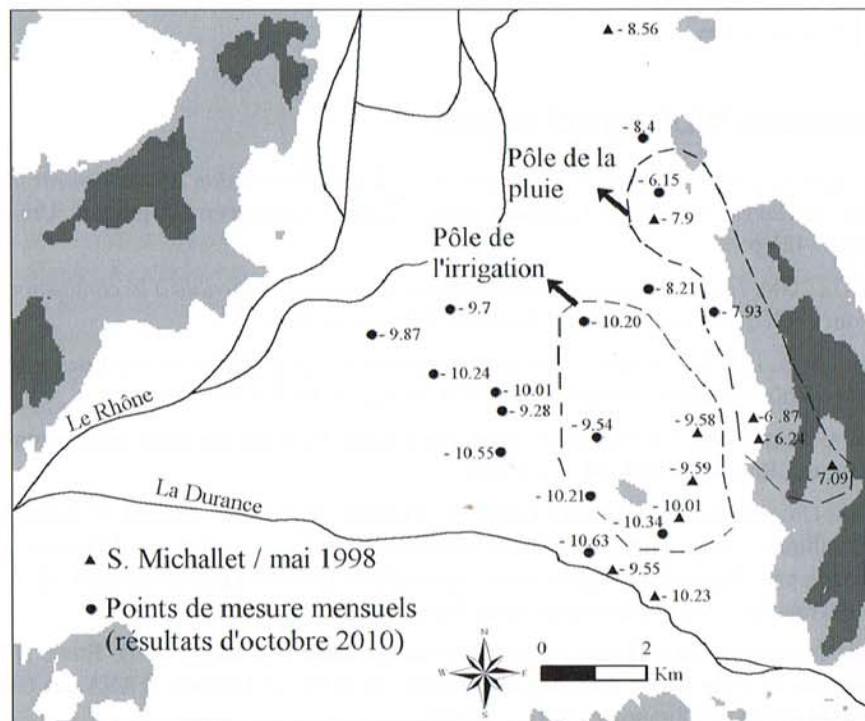


Figure 11.10. Résultat du traçage isotopique (^{18}O) - Réseau de mesures mensuelles (résultats d'octobre 2010) et points d'analyses préexistants. Source : Michallet, 1998.

De l'eau agricole à l'eau environnementale

$\delta^{18}\text{O}$ la plus positive à l'extrémité est (pôle de la pluie). Les résultats de nos campagnes de mesures isotopiques permettront de suivre l'évolution spatio-temporelle de la recharge. En couplant avec les mesures piézométriques, il sera possible de quantifier cette évolution et de préciser les caractéristiques de l'écoulement. Les résultats seront utilisés pour calibrer et valider un modèle mathématique de fonctionnement de la nappe. Ce modèle aura comme premier objectif, une meilleure prise en compte de la recharge par l'irrigation. Ensuite, il devrait permettre de simuler les conséquences des changements d'occupation des sols et des possibles fluctuations climatiques sur le comportement hydrodynamique de cette nappe.

Conclusion

Les premiers résultats de notre étude ont confirmé l'écart important qui existe entre les volumes d'eau prélevés en Durance par un réseau d'irrigation gravitaire et les besoins des cultures auxquelles ils sont destinés. Mais, il a été également démontré que les grands volumes d'eau non utilisés à des fins agricoles, loin de constituer un gaspillage, représentent un gain non négligeable pour la recharge de la nappe. L'analyse isotopique apporte une confirmation quantitative du rôle prépondérant que jouent les irrigations gravitaires dans l'alimentation de la nappe. Cependant, l'extension urbaine, qui se fait au détriment des zones irriguées, peut conduire à de lourdes conséquences sur le système aquifère. Une simulation de l'évolution du comportement de la nappe permettrait de montrer plus précisément les effets, en cas de modification ou de cessation de l'alimentation en eau par les activités agricoles.

Références bibliographiques

- Al Khalifeh S., 2008. *L'apport de la télédétection dans l'observation de l'étalement urbain, l'exemple de l'agglomération d'Avignon-France*. Thèse de doctorat en Géographie, Université d'Avignon, 421 p.
- Bogner C., 2004. *Hydrodynamique et hydrochimie 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.
- Durozoy G., Gouvernet Cl., Margat J., 1964. Recherches hydrogéologiques dans la zone Avignon Sorgues, Rapport DSGR.64. A 22, 59 p.
- Faguet B., Cruciani P.-M., Jacob J.-P., Paulet H., Vairel D., Vallée J.-P., Auzet J.-P., 1980. Schéma hydraulique – Programme général de modernisation des irrigations en Vaucluse, 2- La ressource en eau, Rapport du Ministère de l'agriculture, Direction Départementale de l'Agriculture du Vaucluse, Service du Génie rural des eaux et des forêts, 17 p. + annexes.
- Hydrosol Ingénierie, 2004. Bilan Hydraulique de la saison d'arrosage 2003, Étude réalisée pour l'agence de l'eau RMC, ASL des arrosant du Canal Puy d'Avignon et ASA des Usagers du Canal de l'Hôpital Durançole, 27 p. + annexes.
- Lacroix M., Blavoux B., 1995. Irrigation en Basse Durance : effet bénéfique de l'agriculture. *Hydrogéologie*, n°1, p. 13-20.

Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence

Mallessard G., 1983. *Sur la présence de fer et de manganèse dans l'Aquifère alluvial de la plaine d'Avignon (Vaucluse): relations avec l'hydrochimie et l'hydrogéologie*. Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université d'Avignon, 131 p.

Michallet S., 1998. *Incidence des apports d'eau du canal du Crillon sur l'alimentation de la nappe*. Rapport de stage de DESS (Hydrogéologie et Environnement), Université d'Avignon, 39 p.

Sogreah, 2000. Schéma directeur d'hydraulique agricole de Vaucluse. Rapport de diagnostic provisoire N°810040R1.

Hydrodynamic study of Avignon's alluvial aquifer : Impact of land use on the mechanisms of recharge

The occurrence of groundwater in the alluvial aquifer of Avignon is controlled by surface water. In fact, Durance River could recharge the aquifer directly and indirectly by irrigation which, via infiltration, rise up locally the piezometric head during irrigation's period in summer. Different factors and processes taking place on surface of soil could impact this aquifer which is close to the surface. Especially it is known that natural and irrigated lands are progressively being reduced by urban development which could consequently cause a decrease of recharge by irrigation.

To anticipate the consequences of such future change, the aim of this study was making a monthly water balance and build up a numerical model which integrate the rule of land use.

This work is based of multi-approches using in particular piezometric measurement coupled with natural tracing of water.

The results of different measurements indicate the recharge zones by irrigation where the maximal volume of this recharge comes from Crillon perimeter with a mean of 15 Mm³ per year calculated by a water balance. It was also possible to prove the minimal effect of the rainfall on the groundwater comparing to the irrigation. This effect is reduced in the urban area as showed by the natural tracing.

The results of numerical modelling show and evaluate the decrease in piezometric head if the irrigation disappears. Then the recharge will depend on the rainfall and on the Durance, and the impact of this later could increase fairly on the aquifer.

Key words: Alluvial Aquifer, Hydrodynamic, Recharge, Land use, Natural tracing, Modelling, Avignon.

Étude hydrodynamique de la nappe alluviale d'Avignon : Impact de l'usage du sol sur les mécanismes de recharge

La nappe superficielle de la plaine d'Avignon, située entre Le Rhône et La Durance, présente les caractéristiques d'une nappe péri urbaine, avec un secteur agricole étendu, mais dont la surface se réduit rapidement sous l'effet de l'extension urbaine et du développement économique. Peu profonde et proche de la surface, cette nappe est directement sous l'influence des eaux de surface. En particulier, l'eau de La Durance participe fortement à la recharge soit directement soit indirectement via les nombreux canaux d'irrigation et donc localement de manière décalée par rapport au régime hydrologique méditerranéen. L'occupation des sols, et en particulier l'urbanisation, ainsi que les niveaux d'eau en Durance jouent donc un rôle important sur le fonctionnement hydrodynamique de cette nappe. En particulier le recul des terres agricoles et la diminution parallèle des volumes d'irrigation tendent à réduire la recharge de la nappe.

Pour essayer d'anticiper les conséquences de cette évolution, la présente étude vise à proposer un modèle de fonctionnement hydrogéologique de la zone intégrant le rôle du sol et de son usage. Ce travail a permis de compléter les connaissances sur le fonctionnement de la nappe, de préciser les conditions aux limites et d'établir un bilan en eau au pas de temps mensuel. Il repose sur une démarche multi-approches utilisant, en particulier, la complémentarité entre le suivi piézométrique et la technique du traçage naturel de l'eau (traceurs chimiques et isotopiques).

Les différentes approches ont permis de localiser et de quantifier les deux principales composantes de la recharge: la recharge latérale par la rivière Durance et la recharge verticale par les retours d'irrigation et les précipitations. Cette seconde composante de la recharge est contrôlée surtout par la nature et l'usage du sol. Très clairement, la majeure partie de cette recharge se localise dans des zones encore irriguées qui apportent un volume moyen annuel de 19 Mm^3 (1165 mm/an). Avec une moyenne annuelle de 135 mm, la recharge par la pluie joue un rôle secondaire.

L'importance de la recharge par la rivière Durance a été confirmée par une modélisation hydrodynamique et le traçage isotopique. Elle constitue l'entrée principale du système avec un volume moyen annuel de $70 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

Les résultats de différents scénarios du modèle numérique valident les ordres de grandeur de contribution des différentes composantes et les caractéristiques de l'écoulement (direction, vitesse...) et montrent que dans le cas d'un abandon de l'irrigation, la baisse piézométrique serait de l'ordre de 3 m sous les périmètres irrigués. La nappe retrouverait alors les fluctuations piézométriques naturelles sous la dépendance de la pluie d'une part et de La Durance d'autre part. Le fonctionnement de la nappe deviendrait alors plus sensible aux évolutions futures des précipitations et des niveaux d'eau en Durance.

Mots clés : Nappe alluviale, Hydrodynamique, Recharge, Usage du sol, Traçage naturel, Modélisation, Avignon.