



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Université de Lorraine

Rapport de stage de fin de cycle

Etude des échanges et flux d'eau entre les canaux d'irrigation, les cours d'eau et les niveaux aquifères de la nappe Plio-Quaternaire du Roussillon

Réalisation

ADOMBI Vincent De Paul

Du 25/03/2019 au 09/09/2019

Encadrement

LANINI Sandra (Hydrogéologue, BRGM)

OLTEAN Constantin (Maître de conférences, ENSG)



Bureau de Recherches Géologiques et Minières

1039 Rue de Pinville, 34000 Montpellier, France

Ecole nationale supérieure de géologie
2 rue du Doyen Marcel Roubault
TSA 70605
54518 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX
Tél : 03 83 59 64 15 – Fax : 03 83 59 64 64
ensg-contact@univ-lorraine.fr
www.ensg.univ-lorraine.fr



Notice analytique

Titre du document ***	Rapport de stage de fin de cycle ***
Document title	Last year internship report
Nature du travail ***	Etude des échanges et flux d'eau entre les canaux d'irrigation, les cours d'eau et les niveaux aquifères de la nappe Plio-Quaternaire du Roussillon ***
Work subject	Study of exchanges and water flows between the irrigation canals, the rivers and the aquifer levels of the Roussillon Plio-Quaternary groundwater
Période de stage ***	Du 25/03/2019 au 09/09/2019 ***
Internship period	From 25/03/2019 to 09/09/2019
Auteur ***	ADOMBI Vincent De Paul
Author	
Encadrement ***	LANINI Sandra (Hydrogéologue / Hydrogeologist, BRGM) ***
Supervisors	OLTEAN Constantin (Maitre de conférences / Associate professor, ENSG)
Résumé	Page 5
Abstract	Page 7
Mots-clés	Modélisation, recharge, nappe-rivière, plugin, QGIS
Keywords	Modeling, recharge, groundwater-river, plugin, QGIS
Pages	39
Annexes	4

Table des matières

Notice analytique.....	2
Table des matières.....	3
Fiche résumée.....	5
Abstract.....	7
Service d'accueil : DEPA/NRE.....	9
Introduction.....	10
1. Recharge artificielle des nappes d'eau souterraine.....	10
2. Echanges nappe-rivière.....	12
La plaine du Roussillon.....	13
1. Localisation de la plaine du Roussillon.....	13
2. Contexte hydrologique.....	13
3. Contexte agricole.....	13
4. Contexte géologique et hydrogéologique.....	14
Chapitre I : Modélisation analytique de l'expérimentation de la recharge artificielle.....	17
1. Expérimentation de la recharge artificielle.....	17
2. Analyse préliminaire des données acquises.....	18
3. Solutions analytiques.....	18
3.1. Solutions analytiques de l'écoulement souterrain.....	18
3.2. Solution analytique du transport de masse.....	21
4. Résultats, analyse et interprétation.....	21
4.1. Modélisation analytique des écoulements souterrains.....	21
4.2. Modélisation analytique du transport de masse.....	26
5. Conclusion partielle.....	28
Chapitre 2 : Modélisation hydrogéologique maillée restreinte au domaine de l'expérimentation.....	29
1. Synthèse des connaissances sur la zone d'expérimentation.....	29
1.1. Géologie et hydrogéologie.....	29
1.2. Hydrologie.....	29
1.3. Prélèvements sur la zone.....	30
1.4. Recharge de l'aquifère plio-quadernaire.....	30
2. Bilan global annuel des flux sur la zone à modéliser.....	31

2.1.	Entrées d'eau dans le système.....	31
2.2.	Sorties d'eau du système.....	31
2.3.	Synthèse.....	32
3.	Matériel et méthode.....	32
3.1.	Matériel.....	32
3.2.	Méthode.....	33
4.	Résultats, analyse et interprétation.....	34
4.1.	Géométrie du modèle.....	34
4.2.	Calage en régime permanent.....	35
4.3.	Calage en régime transitoire.....	36
4.4.	Validation du modèle.....	39
4.5.	Modèle conceptuel.....	40
5.	Conclusion partielle.....	40
Chapitre 3 : Réalisation d'un Plug-in pour une estimation de la recharge totale d'un aquifère à surface libre .		41
1.	Données nécessaires.....	41
2.	Matériel et méthode.....	42
2.1.	Matériel.....	42
2.2.	Méthode.....	42
3.	Application du plugin : cas de l'aquifère du quaternaire de la plaine du Roussillon.....	44
3.1.	Choix du maillage optimal.....	44
3.2.	Durée de calcul.....	44
3.3.	Cartes de recharge totale sur l'ensemble de la plaine.....	45
4.	Conclusion partielle.....	46
Conclusion.....		47
Annexes.....		48
1.	Mesures de l'expérimentation de la recharge artificielle.....	48
2.	Chronique des recharge par la pluie et les canaux.....	50
3.	Cartes piézométriques et localisation des principaux canaux du bassin versant de la Têt.....	51
Bibliographie et webographie.....		52

Fiche résumée

L'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon est un aquifère multicouche où l'eau s'écoule dans des niveaux sableux superposés, séparés par des barrières peu perméables (type argiles) sur une épaisseur de 250 m. Pour caractériser au mieux cette ressource, il faut localiser précisément les niveaux aquifères et leurs propriétés hydrodynamiques : principalement la porosité et la perméabilité. Pour estimer la ressource renouvelable que ce système aquifère contient, il faut déterminer comment se fait sa recharge et la quantifier. Ces questions sont au cœur d'un des volets du projet DEM' Eaux Roussillon, dont le BRGM est le coordonnateur et qui associe des laboratoires de recherche et des entreprises de la Région Occitanie. Ce projet est le cadre dans lequel s'est déroulé le stage.

Au cours de l'hiver 2016-2017, le Syndicat Mixte de la Nappe du Roussillon (SMNPR) a procédé à une expérimentation consistant à injecter de l'eau de la Têt (fleuve) via le canal de Perpignan dans le Boulès (affluent de la Têt) à l'aval d'Il-sur-Têt pour permettre l'infiltration de l'eau à travers les alluvions jusqu'à la nappe. Des suivis de la piézométrie, de la conductivité et de la température ont été réalisés sur 25 ouvrages répartis à l'aval de la zone d'injection. A partir des données recueillies de l'expérimentation deux objectifs ont été fixés :

- Le premier a consisté à quantifier les principaux paramètres hydrodynamiques du système aquifère plio-quaternaire et la recharge ainsi que **les transferts entre les différents compartiments de l'hydrosystème** à partir des données de conductivité et de charges piézométriques et de solution analytique simple de transport ;

L'analyse de la piézométrie à l'aide de la solution analytique de Hantush a permis de définir les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du quaternaire, données qui ont été utilisées par la suite dans la modélisation numérique distribuée. Les valeurs obtenues sont les suivantes : $T = 3.25 \times 10^{-2} m^2/s$ et $S = 7.35\%$. Par ailleurs, l'étude de la courbe dérivée de la solution de Hantush, approximée à celle de Théis, a permis de mettre en évidence un retard dans la recharge de l'aquifère du quaternaire via les canaux d'irrigation mais qui n'a pu clairement être quantifié. Une seconde solution analytique a été implémentée. C'est celle de Boussinesq. Elle a permis de déterminer approximativement la valeur moyenne de la recharge à introduire dans la modélisation maillée pour reproduire la piézométrie. Cette valeur est de $730.5 mm/an$ représentant environ 4 fois la recharge par la pluie. Ce résultat renseigne sur le fait que la pluie seule n'explique pas les niveaux piézométriques observés. Le syndicat mixte de la plaine estime que les canaux d'irrigation disposés sur la plaine participeraient à hauteur de 50 à 70% (voir 80%) à la recharge du système aquifère ; ceci corrobore les résultats de la modélisation. Enfin, l'emploi d'une solution analytique de transport de masse a permis de fournir les principaux paramètres hydrodispersifs de l'aquifère du quaternaire et de quantifier le retard dans la recharge de l'aquifère via les canaux à environ 3 mois. Enfin, l'aquifère du pliocène n'a pas fait l'objet d'analyse par manque de données.

- Le deuxième s'est axé sur la **caractérisation des paramètres d'échanges nappe-rivière et de drainance** à partir de la simulation numérique de l'expérimentation de recharge ;

Le modèle numérique maillé a pu être calé en régimes permanent et transitoire et validé. Ces calages ont permis de fixer les valeurs moyennes de transmissivité et de coefficient d'emménagement du pliocène et les paramètres d'échanges nappe-rivière et de proposer un modèle conceptuel d'échanges entre les différents compartiments de l'hydrosystème. Le pliocène a été caractérisé par une transmissivité de $2 \times 10^{-2} m^2/s$ et un coefficient $S_S = 5 \times 10^{-5}$. Le lit de la Têt a été calibré avec une pente de 5%, une rugosité de 0.02, une épaisseur de colmatage du lit de 10 cm et une perméabilité

de $K = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Quant au Boulès, la pente, la rugosité, l'épaisseur de colmatage et la perméabilité ont été calibrées respectivement à 5‰, 0.001, 10 cm et $K = 7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Le modèle conceptuel proposé est le suivant : les alluvions aquifères du quaternaire s'alimentent par les pluies tombées sur la surface affleurante. Par un effet de drainance, la nappe du pliocène est approvisionnée en eau par les alluvions. La vallée de la Têt est traversée par de nombreux canaux d'irrigation. Ceux-ci contribuent majoritairement à la recharge de la nappe du quaternaire. De même, une partie des eaux de la Têt s'infilte et contribue à la recharge de la nappe du quaternaire. Cependant, une très grande partie des eaux ayant servi à irriguer les terrains rejoignent, au bout d'un certain temps, la Têt via l'aquifère du quaternaire.

En plus des deux objectifs précédents, un troisième a été établi. Il concerne **la quantification spatialement distribuée de la recharge d'un aquifère à surface libre à l'aide de la solution analytique de Boussinesq**. Cela a nécessité l'écriture d'un plugin sur QGIS en langage Python. Compte tenu des contraintes sur les données, la recharge totale a été estimée sur l'aquifère du quaternaire uniquement sur les bassins de la Têt et de l'Agly. La soustraction de la recharge par la pluie à cette recharge totale estimée a permis d'identifier les zones influencées par les canaux d'irrigation. La superposition du tracé des canaux à ces zones confirme les résultats obtenus.

Abstract

The Plio-Quaternary aquifer of the Roussillon plain is a multilayer aquifer where water flows in superimposed sandy levels, separated by low permeability barriers (clays) over a thickness of 250 m. To best characterize this resource, it is necessary to precisely locate aquifer levels and their hydrodynamic properties: mainly porosity and permeability. To estimate the renewable resource that this aquifer system contains, it is necessary to determine how it is recharged and to quantify it. These questions are at the heart of one of the components of the DEM 'Eaux Roussillon project, whose BRGM is the coordinator and which brings together research laboratories and companies in the Occitanie Region. This project is the framework in which the internship took place.

During the winter of 2016-2017, the Roussillon groundwater manager (SMNPR) conducted an experiment consisting in injecting water from the Têt (river) via the Perpignan canal into the Boulès (tributary of Tet) downstream of Ill-sur-Têt to allow the infiltration of water through the alluvium to the aquifer. Piezometric, conductivity and temperature monitoring were carried out on 25 structures distributed downstream of the injection zone. From the data collected from the experiment two objectives were fixed :

- The first consisted in quantifying the main hydrodynamic parameters of the plio-quaternary aquifer system and the recharge as well as the transfers between the different compartments of the hydrosystem from the data of conductivity and piezometric loads and simple analytical solution of transport;

The analysis of piezometry using the Hantush analytical solution made it possible to define the hydrodynamic parameters of the Quaternary aquifer, which data were subsequently used in distributed numerical modeling. The values obtained are: $T = 3.25 \times 10^{-2} m^2/s$ and $S = 7.35\%$. Moreover, the study of the curve derived from the Hantush solution, approximated to that of Théis, revealed a delay in the recharge of the quaternary aquifer via the irrigation canals but which did not could clearly be quantified. A second analytical solution has been implemented. It's Boussinesq's. It made it possible to approximately determine the average value of the refill to be introduced in mesh modeling to reproduce the piezometry. This value is 730.5 mm / year representing approximately 4 times the recharge by the rain. This result indicates that rain alone does not explain the observed piezometric levels. The mixed union of the plain considers that the irrigation channels arranged on the plain would participate from 50 to 70% (see 80%) in the recharge of the aquifer system; this corroborates the results of the modeling. Finally, the use of an analytical solution for mass transport made it possible to provide the main water-dispersive parameters of the quaternary aquifer and to quantify the delay in aquifer recharge via the channels at around 3 months. Finally, the Pliocene aquifer was not analyzed for lack of data.

- The second focused on the characterization of the nappe-river and drainage exchange parameters from the numerical simulation of the recharge experiment;

The digital mesh model could be stalled in steady state and transient and validated. These calibrations made it possible to set the mean transmissivity and storage coefficient values of the Pliocene and the river-river exchange parameters and to propose a conceptual model of exchanges between the different compartments of the hydrosystem. Pliocene was characterized by a transmissivity of $2 \times 10^{-2} m^2/s$ and a coefficient $S_S = 5 \times 10^{-5}$. The bed of the Tet was calibrated with a slope of 5 ‰, a roughness of 0.02, a bed clogging thickness of 10 cm and a permeability of $K = 1 \times 10^{-6} m/s$. As for Boulès, the slope, the roughness, the clogging thickness and the permeability were calibrated at 5 ‰,

0.001, 10 cm and $K = 7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, respectively. The proposed conceptual model is as follows : quaternary aquifer alluvium feeds on rains on the flush surface. Through a draining effect, the Pliocene aquifer is supplied with water by the alluvium. The Tet valley is crossed by numerous irrigation canals. These contribute mainly to the recharge of the Quaternary aquifer. In the same way, a part of the waters of the Tet infiltrates and contributes to the recharge of the Quaternary aquifer. However, a large part of the water used to irrigate the land reaches, after a certain time, Tet river via the Quaternary aquifer.

In addition to the two previous objectives, a third has been established. It concerns the spatially distributed quantification of the recharge of a free-surface aquifer using the Boussinesq analytical solution. This required the writing of a plugin on QGIS in Python language. Given data constraints, total recharge was estimated on the Quaternary aquifer only in the Têt and Agly basins. The subtraction of the recharge by rain at this estimated total recharge allowed to identify the areas influenced by irrigation canals. The superposition of the channel layout to these zones confirms the results obtained.

Introduction

L'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon est un aquifère multicouche où l'eau s'écoule dans des niveaux sableux superposés, séparés par des barrières peu perméables (type argiles) sur une épaisseur de 250 m. Pour caractériser au mieux cette ressource, il faut localiser précisément les niveaux aquifères et leurs propriétés hydrodynamiques : principalement la porosité et la perméabilité. Pour estimer la ressource renouvelable que ce système aquifère contient, il faut déterminer comment se fait sa recharge et la quantifier. Ces questions sont au cœur d'un des volets du projet DEM' Eaux Roussillon, dont le BRGM est le coordonnateur et qui associe des laboratoires de recherche et des entreprises de la Région Occitanie. Ce projet est le cadre dans lequel s'est déroulé le stage.

Au cours de l'hiver 2016-2017, le Syndicat Mixte de la Nappe du Roussillon (SMNPR) a procédé à une expérimentation consistant à injecter de l'eau de la Têt (fleuve) via le canal de Perpignan dans le Boulès (affluent de la Têt) à l'aval d'Il-sur-Têt (Ouest de la plaine, *annexe 3, figure 46*) pour permettre l'infiltration de l'eau à travers les alluvions jusqu'à la nappe. Des suivis de la piézométrie, de la conductivité et de la température ont été réalisés sur 25 ouvrages répartis à l'aval de la zone d'injection. A partir des données recueillies de l'expérimentation deux objectifs sont à atteindre :

- Le premier a consisté à quantifier les principaux **paramètres hydrodynamiques** du système aquifère plio-quaternaire et la **recharge** ainsi que les **transferts entre les différents compartiments de l'hydrosystème** à partir des données de conductivité et de charges piézométriques et de solution analytique simple de transport ;
- Le deuxième est axé sur la **caractérisation des paramètres d'échanges nappe-rivière et de drainance** à partir de la simulation numérique de l'expérimentation de recharge.

En plus des deux objectifs précédents, un troisième a été établi. Il concerne **la quantification spatialement distribuée de la recharge d'un aquifère à surface libre**.

Finalement ce travail se résume à deux principales notions qui seront explicitées dans les paragraphes suivants. Il s'agit de la recharge artificielle des nappes d'eau souterraines et des échanges nappe-rivière.

1. Recharge artificielle des nappes d'eau souterraine

La recharge artificielle des nappes est une pratique qui vise à augmenter les volumes d'eau souterraine disponibles en favorisant, par des moyens artificiels, l'infiltration d'eaux extérieures (exemple : rivière) jusqu'à l'aquifère. C'est une des mesures qui peut être mise en œuvre pour sécuriser l'approvisionnement en eau, compenser certains effets du changement climatique et, plus généralement, aménager la pression quantitative et qualitative sur les masses d'eau souterraine.

Les objectifs recherchés par la recharge artificielle sont multiples dont les plus importants sont l'amélioration de la ressource en eau tant sur les plans quantitatif que qualitatif, la sauvegarde des nappes côtières sous l'effet de l'intrusion du biseau salé en créant une sorte de barrière hydraulique ainsi que la conservation de l'intégrité de l'environnement (Bouwer, 2002). En France, les objectifs de la mise en place d'une recharge artificielle sont les suivants [7] :

- Restauration d'une nappe surexploitée par excès de pompage et dont le rabattement est préjudiciable : c'est le but premier de la recharge artificielle ;

- Amélioration de la qualité des nappes : baisse des concentrations en certains éléments chimiques (par exemple nitrate, pesticides), soit par dilution, soit en utilisant le pouvoir d'autoépuration du sol. Ceci permet notamment la mise en œuvre de traitements de potabilisation finaux plus simples et plus économiques, mais également d'améliorer la protection de l'environnement ;
- Protection des aquifères côtiers contre l'intrusion d'eau salée ;
- Stockage des eaux pour une utilisation différée.

Les principales techniques de recharge artificielle sont :

- Les bassins d'infiltration
- Les méthodes d'injection directe
- La recharge artificielle indirecte

Les méthodes d'infiltration consistent à faciliter l'infiltration de l'eau jusqu'à la nappe à partir de bassins spécialement aménagés, souvent en profitant des capacités géo-épuratrices du sol et de la zone non saturée de l'aquifère pour assurer un complément de traitement des eaux infiltrées et améliorer la qualité générale de la ressource. Elles sont généralement utilisées pour réalimenter les nappes libres ou dans certains cas pour mettre en place des barrières hydrauliques. Les méthodes d'injection directe via des forages sont les méthodes les plus utilisées à travers le monde. Elles permettent de recharger des nappes captives afin d'en accroître le potentiel, ou encore de créer des barrières hydrauliques afin de contenir, maîtriser ou dévier des pollutions ou neutraliser un biseau salé, afin de préserver au mieux la ressource en eau exploitée. Elle nécessite un contrôle rigoureux de la qualité de l'eau utilisée. La « recharge artificielle indirecte », plus souvent appelée « réalimentation artificielle induite » ou « réalimentation induite » consiste à augmenter le transfert d'eau entre un cours d'eau et une nappe alluviale en mettant en place des sites de pompage souterrains à proximité des berges. Lors de ce transfert, l'eau du cours d'eau est souvent partiellement filtrée grâce au pouvoir épurateur des berges. Cette technique est connue de longue date, ce qui a souvent conduit les anciens exploitants des ressources en eau à placer des batteries de forages au droit des fleuves et rivières.

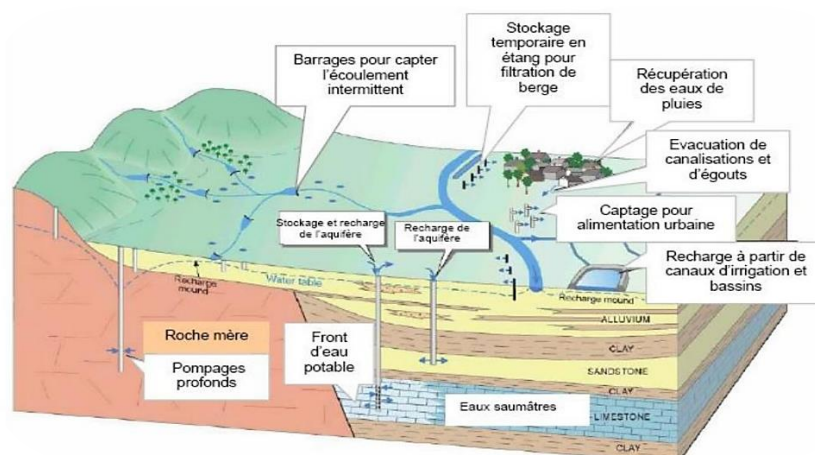


Figure 2 : Quelques modèles de recharge artificielle dans différents environnements hydrogéologiques (source : Gale et al., 2002, Pettenati, 2007)

2. Echanges nappe-rivière

La relation nappe-rivière se définit comme un échange d'eau dans un sens ou dans l'autre entre une nappe d'eau souterraine et un cours d'eau (figure 3). Suivant le niveau de la rivière et les saisons, la nappe alimente le cours d'eau ou est alimentée par celui-ci notamment lors des inondations.

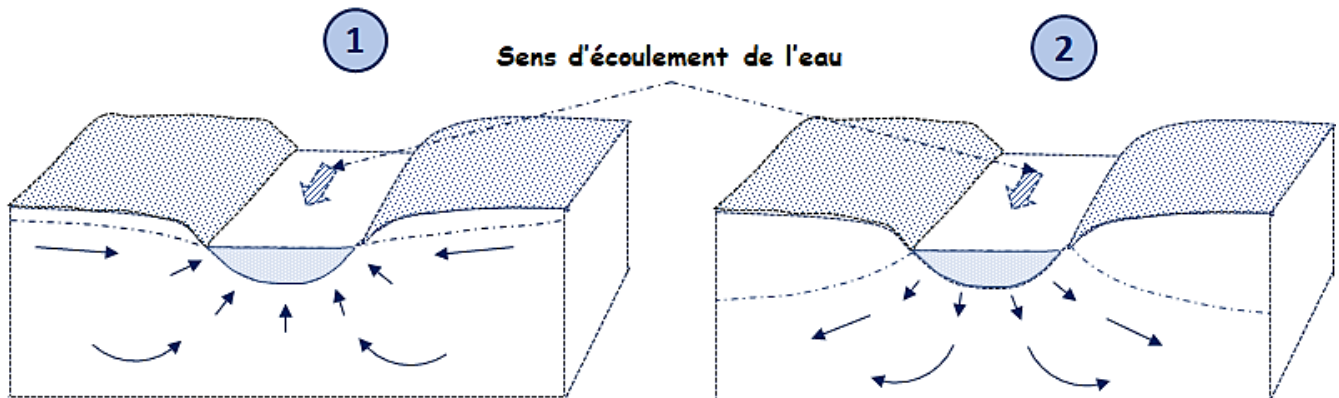


Figure 3 : Echanges nappe-rivière 1 : La nappe alimente la rivière - 2 : la rivière alimente la nappe

Différents facteurs (nature des berges, des alluvions, des terrains encaissants, ...) interviennent dans les relations nappe-rivière. Trois cas de relation hydrodynamique entre la nappe et la rivière peuvent être mis en évidence :

- **Cas 1** : la nappe et la rivière sont en relation : la nappe alimente la rivière (le niveau de la nappe est supérieur à l'altitude de la rivière) ;
- **Cas 2** : la nappe et la rivière sont en relation : la rivière alimente la nappe (le niveau de la nappe est inférieur à l'altitude de la rivière) ;
- **Cas 3** : pas d'échange entre la rivière et l'aquifère (formation imperméable entre le lit du cours d'eau et la nappe).

Ces trois types de relation peuvent se rencontrer le long d'un même cours d'eau. Pour une même portion de rivière, ces relations peuvent changer dans le temps en fonction des conditions saisons. Schématiquement, en état non influencé par des prélèvements, la nappe alimente la rivière en période d'étiage et la rivière alimente la nappe en période de crue. Dans le cas de prélèvements importants dans la nappe, notamment agricoles en période estivale, la rivière (et les zones humides associées) peut venir au contraire alimenter l'aquifère.

La plaine du Roussillon

1. Localisation de la plaine du Roussillon

La plaine du Roussillon (*figure 4*) est située au Sud de la France en région Occitanie à la latitude Nord ($42^{\circ}27'$; $42^{\circ}57'$) et à la longitude Est ($2^{\circ}30'$; $3^{\circ}06'$) à la terminaison orientale de la chaîne des Pyrénées.



Figure 4 : Localisation géographique de la plaine du Roussillon

2. Contexte hydrologique

La plaine du Roussillon est traversée par trois principaux fleuves qui sont du Nord au Sud, l'Agly, la Têt et le Tech. L'Agly, long de 76 km, prend sa source dans les Corbières tandis que le Tech a son origine dans le massif de Canigou avec une longueur de 82 km. La Têt est, quant à elle, longue de 120 km et prend sa source dans le massif du Carlit. Son principal affluent est le Boulès dont la confluence avec la Têt est localisée en aval de la commune de Millas à 91 m d'altitude. Cette rivière, longue de 34.5 km, est presque toujours à sec à partir de la commune de Bouleternère. En effet, elle se perd à son arrivée dans la plaine en s'infiltrant dans les alluvions grossières et puissantes. Le Boulès coule à nouveau à l'aval de Millas, quelques centaines de mètres avant sa confluence avec la Têt [2] (*réseau hydrographique : figure 5*).

3. Contexte agricole

De nombreux canaux d'irrigation sillonnent la plaine. Les zones qu'ils irriguent forment des bandes le long des vallées. C'est dans la vallée de la Têt que se retrouve le plus grand nombre de canaux. Il est fréquent qu'en **hiver**, certaines communes, notamment celles qui s'alimentent dans le quaternaire, **sollicitent les canaux** pour réalimenter leur champ captant. De même, il n'est pas rare que les agriculteurs qui possèdent un forage privé le réalimentent en ouvrant les vannes des canaux dans les secteurs à proximité de leur ouvrage. Ainsi, sur l'amont du bassin versant de la Têt à l'aval du barrage de Vinça, la nappe d'accompagnement du Boulès est en partie rechargée par les eaux du canal de Corbère, de Thuir et de Perpignan (*annexe 3, figure 46*) via des lâchers, en particulier, dans l'affluent le Boulès. Or, la nappe du

Boulès alimente la ville d'Ille-sur-Têt et contribue pour partie à l'AEP de Perpignan. Sur le bassin versant de la Têt, les retours d'eau vers la nappe et la Têt sont individuellement estimés entre 2 et 5 m³/s (avec une erreur de 1 m³/s) [8].

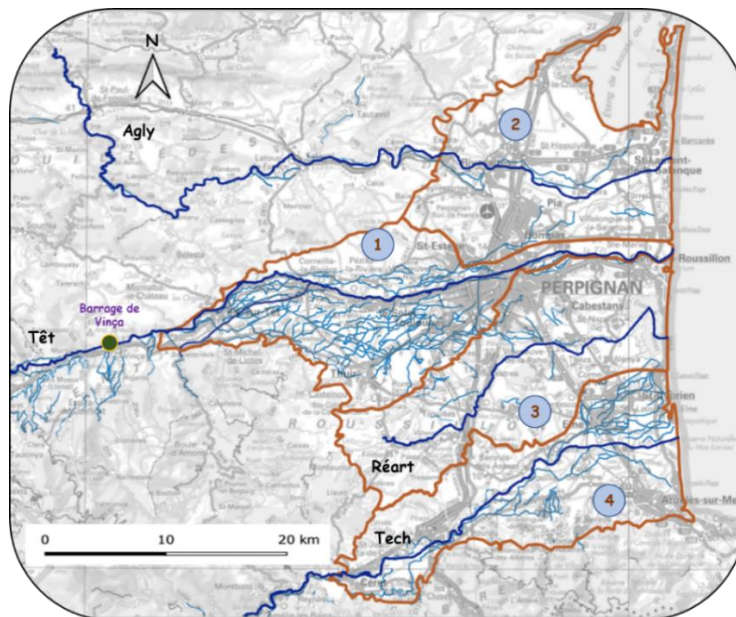


Figure 5 : Canaux d'irrigation (Bleu clair), Principaux cours d'eau (+affluent Boulès de la Têt) (Bleu foncé) et sous bassins versants de la plaine (1 à 4 : Têt, Agly + Salanque, Réart, Tech + Verm)

4. Contexte géologique et hydrogéologique

La plaine s'est formée lors de transgressions et régressions marines. Ces variations du niveau de la mer ont permis le dépôt de sables et d'argiles (Pliocène, -5.33 Ma à -2.58 Ma). Au cours du Quaternaire (Il y a 2.58 Ma), les rivières ont creusé des vallées dans les sédiments du Pliocène en formant ainsi des terrasses alluviales successives et étagées [1]. Les formations alluviales quaternaires et pliocènes de la plaine du Roussillon constituent un système aquifère puissant. Ce système aquifère est composé de deux grandes unités hydrogéologiques séparées localement par des **épontes** peu perméables ($K \approx 2.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$) et formant les nappes plio-quaternaire du Roussillon :

- Les nappes du Quaternaire

Les nappes Quaternaire se situent au sein des alluvions anciennes et récentes apportées par les principaux cours d'eau dans leur partie aval : Agly, Têt, Réart aval, Tech. Aussi, elles ne couvrent pas l'ensemble de la plaine roussillonnaise mais environ 500 km² sur un total de près de 900 km², les formations Pliocène affleurant sur près de 400 km². De fait, ces nappes sont variées, et importantes en termes de ressource en eau souterraine. Elles ont cependant toutes des propriétés communes qui justifient de les regrouper en une seule entité :

- **Faible profondeur et épaisseur** : ces nappes sont localisées à faible profondeur (le toit est généralement à quelques mètres du sol voir sub-affleurant dans certains cas) et leur base ne dépasse pas 30 m de profondeur. Elles sont dites « libres » : le toit de la nappe varie librement dans des terrains perméables (excepté sur la bordure littorale au niveau de la Salanque) et la zone saturée a généralement une épaisseur de l'ordre de 10 m (jusqu'à plus de 20 m en Salanque sur le littoral) ;
- **Liens forts avec les eaux superficielles** : même si une petite partie des eaux provient des massifs bordant la plaine, les nappes Quaternaire sont en grande partie directement alimentées par les eaux superficielles

(pluie, cours d'eau, canaux). L'un de leur principal exutoire naturel est constitué par les cours d'eau dont les niveaux conditionnent en grande partie celui des nappes alluviales. La mer doit aussi constituer un exutoire à ces nappes alluviales ;

- **Propriétés hydrodynamiques favorables à leur exploitation** : par nature, ces aquifères sont constitués de sables et de graves récents, par conséquent généralement propres (faible proportion en fines, argiles et silts) : les perméabilités sont donc élevées à très élevées (de l'ordre de 5×10^{-3} à 5×10^{-4} m/s) tout comme les **coefficients d'emmagasinement de l'ordre de 10%**, voire plus faible (**pouvant atteindre 3%**) lorsque la nappe est semi-captive, comme en Salanque).

Du point de vue de la ressource, ces propriétés se traduisent par deux éléments forts :

- **Nappes faciles à exploiter** : elles peuvent être très productives si les alluvions sont « propres » et qu'il existe des conditions de réalimentation à proximité (rivière ou canaux), ou à l'inverse peu exploitables si l'épaisseur est faible et les conditions de réalimentation médiocres ;
- **Nappes vulnérables** aux activités potentiellement polluantes et naturellement sensibles à l'intrusion d'eau saumâtre sur la bordure littorale.

L'écoulement souterrain des eaux se fait globalement d'Ouest en Est, orienté vers la mer (*annexe 3, figures 44*).

- Les nappes du Pliocène

Les matériaux Pliocène remplissent l'intégralité du bassin sédimentaire du Roussillon soit environ 900 km². Ils affleurent essentiellement entre la vallée de la Têt et celle du Tech. Sur le reste du territoire ils sont quasiment systématiquement recouverts par les alluvions Quaternaire. L'épaisseur des niveaux potentiellement productifs (Pliocène marin sableux et Pliocène continental) augmente de l'Ouest vers l'Est, passant de 100 m environ à Millas à plus de 200 m sur la bordure côtière. Même si, notamment dans le Pliocène continental, cette nappe se présente souvent sous forme de lentilles sableuses noyées dans une matrice argilo-silteuse peu perméable, la saturation de l'ensemble de la structure et les liens entre les différentes unités perméables (paléo-chenaux) permettent de considérer l'aquifère comme une entité « homogène ». Il s'agit d'un système aquifère captif sur à peu près l'ensemble du territoire : le recouvrement argileux imperméable ne permet pas la libre variation du niveau d'eau. Ce recouvrement isole les eaux du Pliocène et permet donc une protection naturelle des eaux du Pliocène vis à vis des activités en surface.

L'alimentation de l'aquifère Pliocène se fait par :

- Infiltration directe des eaux superficielles dans les zones d'affleurement (en particulier entre la vallée de la Têt et celle du Tech) ;
- L'apport des massifs bordant la plaine : l'importance du karst des Corbières dans l'alimentation de la partie nord des nappes Pliocène a été démontrée. Certaines études indiqueraient également des apports provenant du Granite fracturé de Millas (H. Salvayre) ;
- L'apport des nappes Quaternaire dans la partie amont de la plaine : dans le secteur « amont » de la vallée de la Têt, le suivi piézométrique à Millas indique clairement que la nappe Pliocène a une charge plus basse que les nappes Quaternaire et que ces dernières, par drainance, alimentent les nappes profondes.

Les exutoires des eaux du Pliocène sont :

- Les prélèvements anthropiques (pompages) de manière très majoritaire.
- Les nappes Quaternaire, en fonctionnement naturel, sont partiellement réalimentées par les nappes profondes sur la bordure littorale par drainance ascendante. Ceci est induit par le caractère fortement captif des nappes Pliocène (artésianisme). Cependant, la forte pression des prélèvements ne permet plus ce phénomène, excepté ponctuellement, en période hivernale.
- La mer : les matériaux Pliocène se prolongent en mer, comme en attestent des sondages pétroliers datant des années 50. Les liens (directs ou indirects) entre les eaux souterraines et la mer sont méconnus mais des résurgences sous – marines ne peuvent être exclues.

Les écoulements se font de l'ouest vers l'est en direction de la mer (*annexe 3, figures 45*). Le gradient est relativement important à l'amont de Perpignan (**entre 3‰ et 5‰**) alors qu'il est très faible voire quasi nul sur la partie aval. A proximité de la mer l'âge de l'eau a été daté par analyse isotopique à l'initiative du Rotary Club. Elle peut atteindre jusque 15 000 ans sur la bordure côtière. En termes de productivité, les propriétés hydrodynamiques du Pliocène sont variables d'un secteur à l'autre. On pourra noter que :

- **La vallée de la Têt** à l'amont de Perpignan présente de très bonnes propriétés (essentiellement le Pliocène marin sableux) avec des transmissivités allant jusque $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Le Pliocène marin est moins productif sur la partie aval de la plaine ;
- Sur la partie aval, certains secteurs sont très productifs (essentiellement le Pliocène continental) : Montescot, la Salanque, le secteur de Canet ;
- A l'inverse, en amont de Brouilla dans la vallée du Tech, les formations Pliocène sont à dominante argileuses ce qui rend peu exploitable cet horizon.

Le **coefficient d'emmagasinement moyen** a été estimé entre 10^{-4} et 5×10^{-5} , valeur typique d'un aquifère fortement captif.

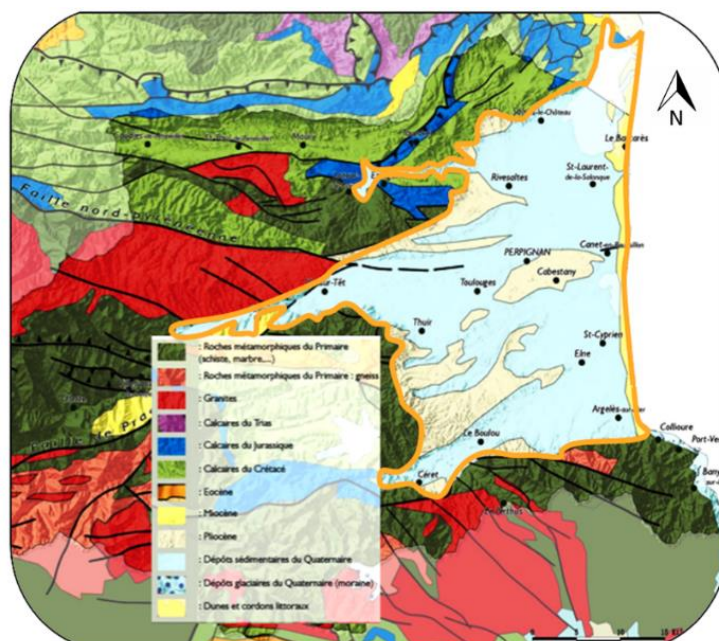


Figure 6 : Carte géologique de la plaine du Roussillon (limite de couleur orange, échelle : 1/250000)

Chapitre I : Modélisation analytique de l'expérimentation de la recharge artificielle

Ce chapitre traite de l'expérimentation de la recharge artificielle menée dans le bassin versant de la Têt entre les communes Ille-sur-Têt et Saint-Féliu d'Amont dans la période Décembre 2016 à Mars 2017. En particulier, le but est de réaliser une modélisation analytique de cette expérimentation afin d'évaluer les principaux paramètres hydrodynamiques (perméabilité et coefficient d'emménagement) et hydrodispersifs du système aquifère ainsi que la recharge moyenne nécessaire pour reproduire au mieux les niveaux piézométriques observés. Ceci constitue un préalable à la modélisation distribuée qui fait l'objet du chapitre 2 de ce rapport.

1. Expérimentation de la recharge artificielle

L'expérimentation a consisté à injecter en continu de l'eau dans l'affluent de la Têt (le Boulès) via le canal de Perpignan, eau qui s'infiltre naturellement dans le système aquifère, et d'observer l'évolution de la piézométrie, la conductivité électrique et la température dans le temps sur une vingtaine d'ouvrages repartis sur la zone d'expérimentation (figure 7).

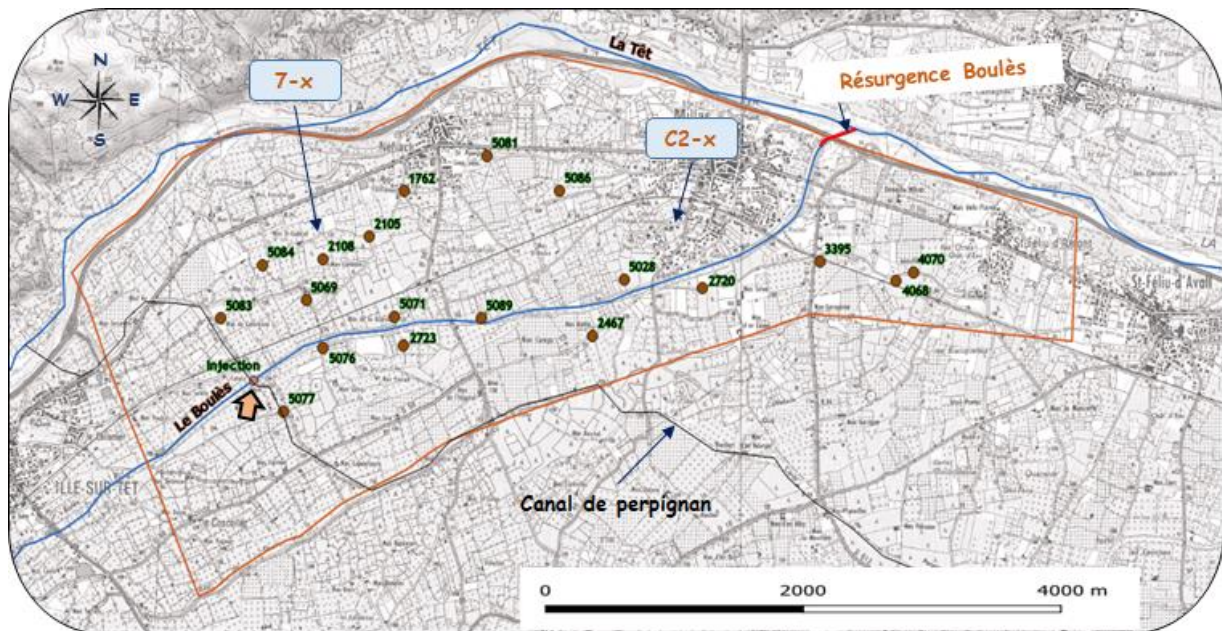


Figure 7 : Ouvrages suivi de la piézométrie, de la conductivité électrique et de la température (Limite en orange : zone d'expérimentation)

Les mesures ont été réalisées de manière discontinue dans le temps. Seuls quatre ouvrages disposaient de sondes de mesures automatique des paramètres suivis : ce sont les ouvrages C2-1 et C2-2 (Syndicat Mixte de la plaine) à Millas et 7-1 et 7-2 à Néfiach. Les ouvrages C2-1 et 7-1 sont implantés dans l'aquifère du Quaternaire tandis que le C2-2 et le 7-2 sont dans le pliocène. Tous les ouvrages dont les mesures ont été faites manuellement se trouvent dans le quaternaire à l'exception du 4070. Les lâchers d'eau se sont faits à un débit quasi-constant de 210 l/s du 20 décembre 2016 au 15 mars 2017 avec quelque interruption (figure 8). Quant aux mesures, elles ont débuté bien avant l'injection c'est-à-dire le 13 décembre 2016 et ont pris fin après l'interruption des lâchers, le 29 mars 2017. Il est important de noter que le Boulès est une rivière qui est presque toujours à sec à partir de Bouleternère (Juste en amont de la zone d'expérimentation). En effet, ce cours d'eau, pérenne dans les formations schisteuses des Aspres, se perd à son arrivée dans la plaine en s'infiltrant dans les alluvions grossières et puissantes. Le Boulès coule à nouveau à l'aval de Millas, quelques centaines de mètres avant sa confluence avec la Têt.

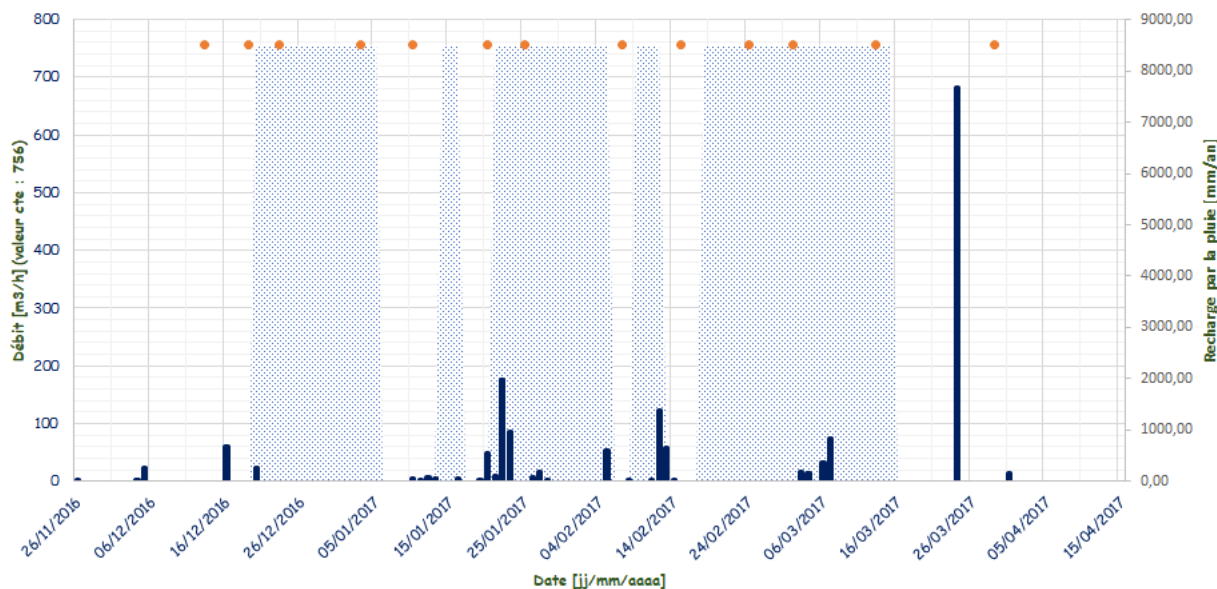


Figure 8 : Périodes d'injection (Hachures, 1 à 5 de la gauche vers la droite) et interruption d'eau dans le Boulès, date de mesure (points en orange) et la recharge de l'aquifère par la pluie

2. Analyse préliminaire des données acquises

Les données de charge piézométrique, de température et de conductivité électrique sont présentées en *annexe 1* du rapport. L'eau injectée dans le Boulès a une température ($T = 8.12^{\circ}C$) et une conductivité électrique ($\sigma = 124 \mu S/cm$) plus faibles que celles des aquifères du Quaternaire ($T = 16^{\circ}C$ et $\sigma = 157 \mu S$) et du Pliocène ($T = 15.5^{\circ}C$ et $\sigma = 257 \mu S$). Ainsi, l'eau injectée dans le Boulès et qui s'infiltre dans le système devrait renvoyer à la baisse sa température et sa conductivité électrique. Sur les ouvrages mesurés manuellement il est globalement constaté une baisse de la température en période de lâcher et une remontée plus ou moins prononcée lors des interruptions. Il en est de même pour la conductivité électrique à l'exception de l'ouvrage 5069 qui semble avoir un comportement inversé ; aucune mesure de température et de conductivité n'a été effectuée sur l'ouvrage 4070 (Pliocène). Cependant, les ouvrages suivis en continu semblent peu ou pas réagir. Seul l'ouvrage C2-1 (Quaternaire) donne un signal significatif. De ce fait, toute **la modélisation analytique ne concerne que l'aquifère du Quaternaire** car aucun ouvrage du pliocène ne peut être utilisé. De plus, l'analyse du paramètre température n'a pas été faite.

3. Solutions analytiques

Trois solutions analytiques ont été employées dans ce chapitre. Les deux premières concernent l'écoulement en milieu poreux souterrain et la troisième s'applique au transport de masse en milieu poreux.

3.1. Solutions analytiques de l'écoulement souterrain

3.1.1. Solution de Hantush

Il existe diverses méthodes analytiques pour décrire la réponse d'un aquifère à surface libre en termes de charge hydraulique à la suite de l'infiltration d'une quantité donnée d'eau pendant une certaine période à travers un bassin d'infiltration de forme circulaire ou rectangulaire. La méthode développée par Hantush est considérée comme la plus efficace (W. Warren et al., 1989). Celle-ci décrit l'augmentation de la charge hydraulique de l'aquifère dans le temps et dans l'espace pour une recharge supposée se faire en continue. Cette solution provient de la résolution d'une forme

modifiée de l'équation aux dérivées partielles décrivant l'écoulement souterrain de l'eau en deux dimensions (x et y) au moyen des transformées de Laplace. Pour ce faire, il a utilisé comme condition initiale une surface hydraulique horizontale et comme conditions aux limites une variation de charge maximale le long du bassin et nulle à l'infini. Sa solution est présentée ci-dessous.

$$h^2(x, y, t) - h^2(x, y, t - \Delta t) = \frac{vA}{2} \int_0^t \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{l+x}{\sqrt{4v\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{l-x}{\sqrt{4v\tau}} \right) \right\} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{a+y}{\sqrt{4v\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{a-y}{\sqrt{4v\tau}} \right) \right\} d\tau$$

Avec : $v = \frac{K\bar{b}}{\varepsilon}$; $A = \frac{2\omega}{K}$ où l [L]: dimension du rectangle selon x, a [L]: dimension du rectangle selon y, ω [L/T]: taux d'infiltration, K [L/T]: conductivité hydraulique, $\bar{b} = \frac{h(x,y,t)+b}{2}$: épaisseur moyenne spatio-temporelle de l'aquifère et ε [-]: la porosité efficace de l'aquifère. La figure ci-dessous présente une vue du système. A l'aide du principe de superposition, il est possible de contraindre le modèle par une limite à potentiel imposé. C'est cette dernière solution qui est appliquée dans le cadre de l'expérimentation de la recharge artificielle, le cours d'eau jouant le rôle du potentiel imposé est la Têt. L'objectif recherché par l'application de la solution de Hantush à l'expérimentation est d'évaluer les deux principaux paramètres hydrodynamiques du Quaternaire (perméabilité et coefficient d'emmagasinement). L'outil utilisé est une feuille Excel automatisant les calculs.

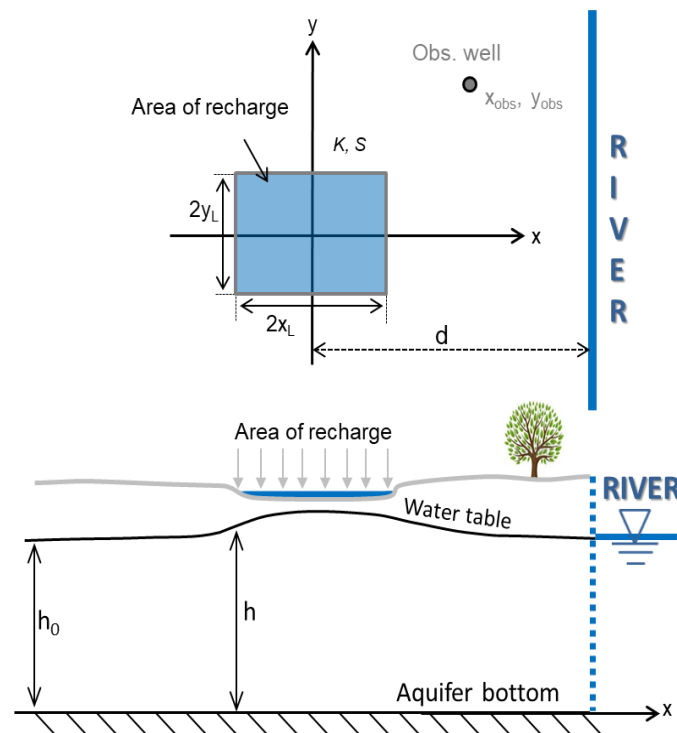


Figure 9 : Forme de la recharge artificielle, avec une limite à charge imposée (source : feuille de calcul Groundwater Mound, rivière - B. Dewandel)

Les paramètres d'entrée nécessaires pour appliquer cette solution au cas présent sont :

- La géométrie du bassin d'infiltration

Le Boulès, dans la zone d'expérimentation, est en moyenne large de 3 m (x). Le bureau d'étude chargé de réaliser l'expérimentation a mentionné qu'il n'y avait plus d'eau à environ 500 m du point d'injection. La longueur du bassin a donc été prise égal à 500 m.

- Débit d'injection : il a été estimé à 210 l/s soit 756 m³/h).
- Epaisseur moyenne de l'aquifère du Quaternaire dans la zone d'expérimentation : 12.5 m
- Distance Têt-Bassin : 2000 m environ
- Durée de l'expérimentation : compte tenu des interruptions de lâcher, la modélisation a été faite sur les trois périodes de lâcher les plus longues (les périodes 1, 3 et 5), les périodes 2 et 4 sont trop courtes pour être représentatives de la réponse de l'aquifère. La première période a duré 19 jours, la 3^{ème} en a duré 17 et la 5^{ème} compte 27 jours.

Deux paramètres sont à calibrer :

- La perméabilité : le *paragraphe 4* renseigne sur la gamme de valeur de la perméabilité du quaternaire dans la vallée de la Têt. Elle est comprise entre 5×10^{-3} à 5×10^{-4} m/s
- Le coefficient d'emménagement varie entre 3% et 10%

Enfin, le résultat obtenu après les calculs est la variation de charge hydraulique le long d'un transect x donné sur un axe y fixe au bout d'un temps $t = \text{durée du lâcher}$: $\Delta h(x) = h(x) - h_0$. C'est l'ajustement de ce résultat aux données effectivement mesurées qui permettra de calibrer les paramètres hydrodynamiques.

3.1.2. Solution de Boussinesq

Boussinesq a développé une solution analytique qui permet d'estimer la recharge nécessaire à un aquifère pour reproduire sa piézométrie en connaissant sa perméabilité. Pour cela, il considère un aquifère à surface libre délimité par une frontière à flux nul (limite d'affleurement de l'aquifère) et une frontière à charge imposée (en particulier, un cours d'eau). Dans un tel aquifère, l'équation régissant l'écoulement est donnée en 1D par :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh(x, t) \frac{h(x, t)}{\partial x} \right) = S \frac{h(x, t)}{\partial t} - R(t) \quad (1)$$

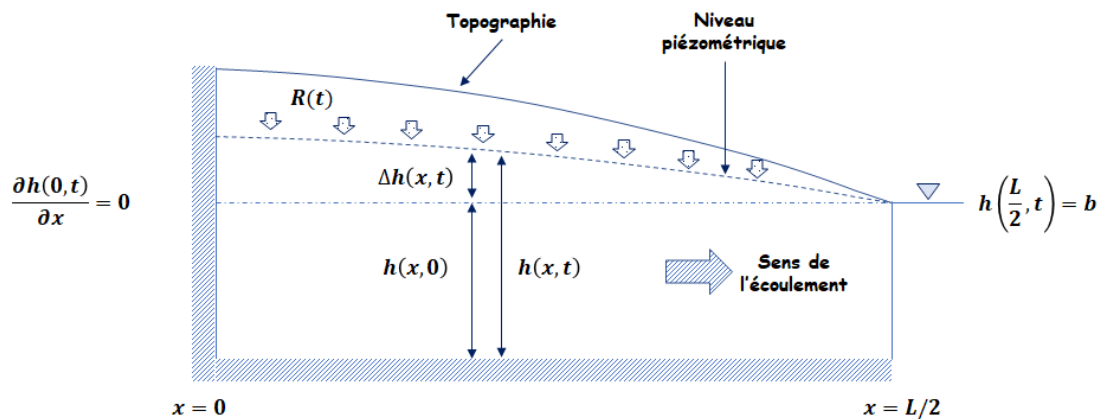


Figure 10 : Géométrie et conditions aux limites de l'aquifère modèle avec indication du sens d'écoulement latéral

La résolution de l'équation (1) en régime permanent incluant les conditions aux limites précédemment définies permet de faire ressortir l'expression de la solution de Boussinesq (en 1D) :

$$h^2 = b^2 + \frac{R}{K} \left(\left(\frac{L}{2} \right)^2 - x^2 \right)$$

Où :

- h : Charge hydraulique relative ($h = h_{mNGF} - Z(sub)_{mNGF}$) à l'abscisse x [L] avec $Z(sub)$ la côte du substratum de l'aquifère
- b : Charge hydraulique relative au cours d'eau [L],
- K : Perméabilité de l'aquifère [$L.T^{-1}$]
- $\frac{L}{2}$: Distance cours d'eau – limite à flux nul [L]
- R : Recharge [$L.T^{-1}$]

La charge hydraulique relative calculée est ajustée aux observations ; ce qui permet de calibrer la recharge. La perméabilité utilisée dans cette solution est celle calibrée à partir de la solution de Hantush.

3.2. Solution analytique du transport de masse

Cette solution est basée sur le principe du traçage d'un soluté injecté en continu à un débit Q en un point A au travers d'un puits à une concentration C_0 et mesurée dans un autre puits situé en B à une distance x de A après migration à la vitesse réelle u dans l'aquifère d'épaisseur e d'extension semi infinie. Cette solution a été adaptée au cas présent sur la conductivité électrique mesurée en continu sur l'ouvrage C2-1 (Quatenaire). Pour ce faire, il a fallu d'abord convertir la conductivité électrique en concentration (ppm) à travers la relation suivante : $1ppm = 640 mS/cm$. Ensuite, choisir une période représentative de l'expérimentation, en particulier une période suffisamment longue pendant laquelle une décroissance de la conductivité électrique est observée en période d'injection suivie d'une augmentation lors d'une interruption. Enfin, recalculer les paramètres d'entrée que sont le temps et la concentration de la manière suivante :

- $t_i = t_i^{réel} - t_0$ (Temps écoulé depuis le début jusqu'au pas i)
- $C_i = C_0 - C_i^{réelle}$ (Concentration accumulée depuis le début jusqu'au pas i)

Le résultat fournit par cette solution est la concentration. Son ajustement aux données réellement mesurées permet de calibrer trois paramètres : la vitesse réelle de déplacement du soluté, la dispersivité longitudinale et le coefficient de retard.

4. Résultats, analyse et interprétation

4.1. Modélisation analytique des écoulements souterrains

4.1.1. Solution de Hantush

D'après le *paragraphe 3.1.1*, les données de référence pour l'ajustement constituent une loi $\Delta h^{réelle} = f(x)$ où x est la distance ouvrage – bassin d'infiltration. L'ajustement est d'autant meilleur que la loi simulée est proche de la loi réelle : $\Delta h^{sim} \approx \Delta h^{réelle}$ où $\Delta h^{sim} = g(x)$ la loi simulée à l'aide de la solution analytique. Les résultats des périodes 1, 3 et 5 sont présentées à la *figure 11* sur l'axe $y = 0$, c'est-à-dire que la distance x correspond au projeté orthogonal de l'ouvrage sur le Boulès (Bassin d'infiltration étendu).

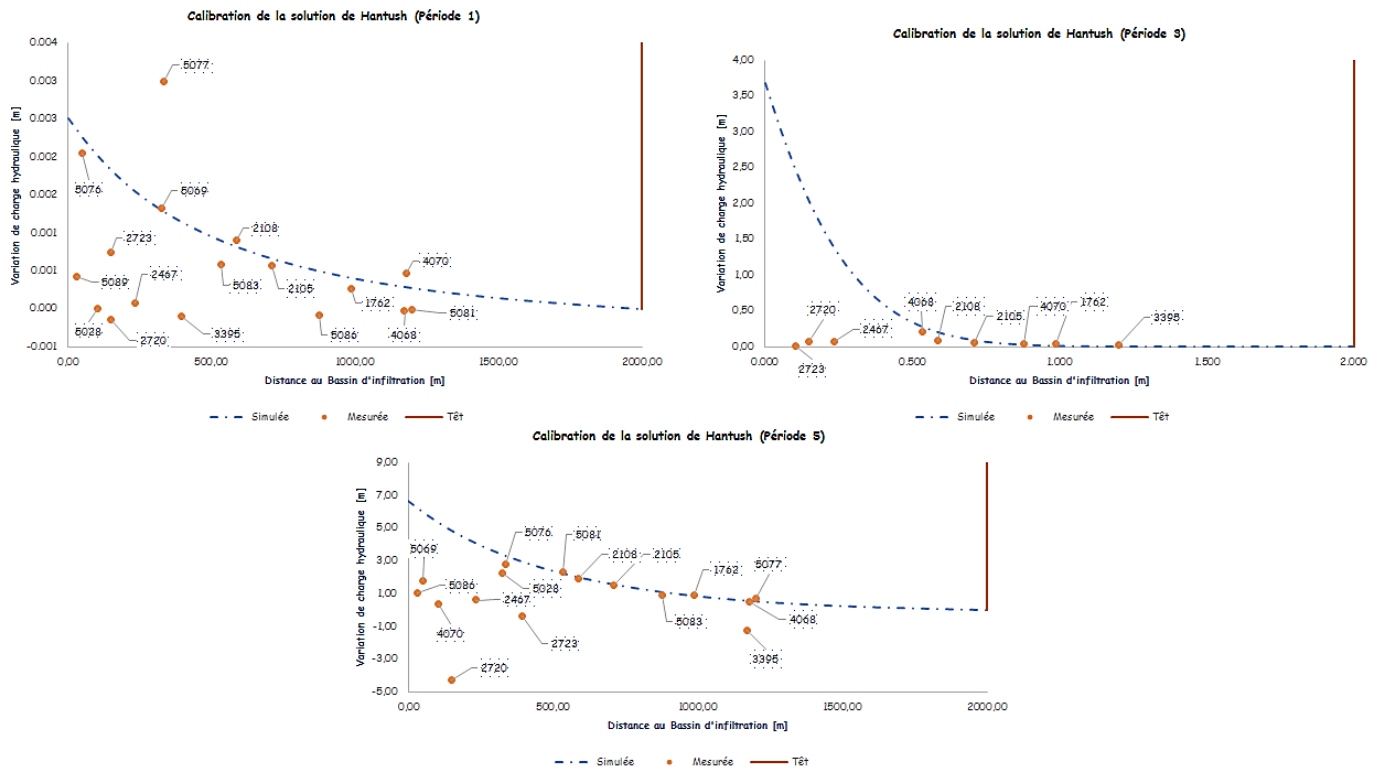


Figure 11 : Ajustement de la solution de Hantush aux mesures de terrain sur les périodes 1, 3 et 5

Le tableau ci-dessous donne un récapitulatif des paramètres calibrés pour chacune des périodes et les confronte aux gammes de valeurs réelles.

Tableau 1 : Paramètres issus de l'ajustement de la solution de Hantush aux données de terrain sur les périodes 1, 3 et 5

Période	Perméabilité calibrée [m/s]	Emmagasinement calibré [-]	Gamme de valeurs de la perméabilité	Gamme de valeurs de l'emmagasinement
1	2.6×10^{-3} m/s	7.35%	5×10^{-4} à 5×10^{-3} m/s	3% à 10%
3	1×10^{-3} m/s	25%		
5	8×10^{-4} m/s	5%		

Le tableau montre qu'en période 3, il faut une porosité de 25% (soit 2.5 fois la porosité maximale) pour réussir à ajuster la solution au plus grand nombre de points. Cette valeur est largement en dehors de l'intervalle d'acceptation. Les résultats de cette période ne peuvent être admis. La probable raison d'une telle valeur de porosité est l'influence de la pluie sur la piézométrie. En effet, cette période est marquée par la plus grande fréquence de recharge par la pluie (figure 8) ce qui augmente le niveau piézométrique et diminue considérablement la variation de charge hydraulique.

Les périodes 1 et 5 ont été ajustées avec des paramètres qui demeurent dans les intervalles d'acceptation. Cependant, tandis que certains points de données corrént fortement avec la courbe simulée d'autres s'en éloignent significativement. La raison est que ces points divergents ne satisfont pas les hypothèses de la solution. Une autre formulation des hypothèses de la solution donne les énoncés suivants :

- Pour une expérience d'injection d'eau dans un aquifère, en l'absence de prélèvements significatifs, la charge hydraulique de l'aquifère doit impérativement augmenter rendant la variation de charge exclusivement positive. Ceci permet de supprimer les points pour lesquels la variation de charge est négative.
- Plus l'on s'éloigne du bassin d'infiltration et plus faible est la variation de charge. En d'autres termes, la variation de charge est maximale le long du bassin d'infiltration et tend à s'annuler lorsque l'on s'en éloigne davantage. De ce fait, tous les points relativement proches du bassin ayant une variation de charge faible (voire très faible) sont à ignorer.

Ces deux énoncés conduisent au nouveaux graphiques suivants et permettent d'estimer le degré de dépendance entre les données calculées et les données mesurées.

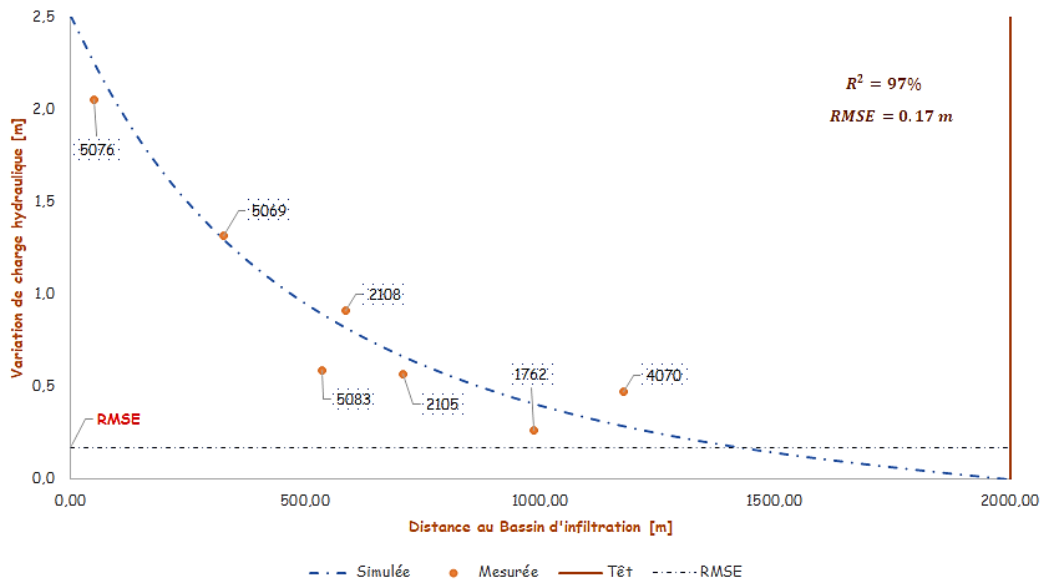


Figure 12 : Calibration de la solution de Hantush sur la période 1

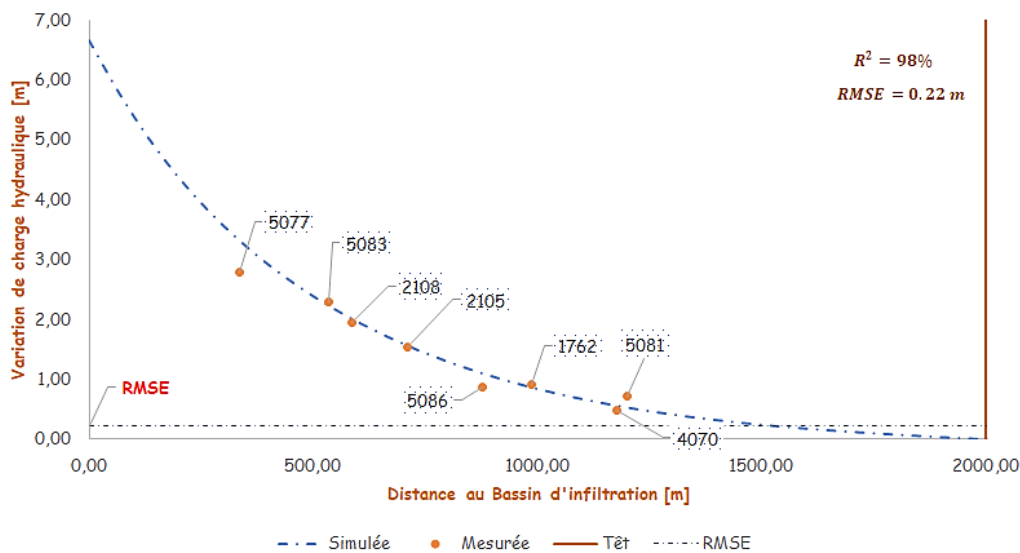


Figure 13 : Calibration de la solution de Hantush sur la période 5

Ces deux périodes sont calibrées à plus de 97% avec une erreur quadratique moyenne très faible (0.17 m pour la période 1 contre 0.22 m pour la période 5). Elles sont toutes deux valides mais une préférence est portée pour la période 1 car

c'est la période la moins influencée par la recharge par la pluie. Ainsi, pour la suite, les paramètres hydrodynamiques retenus sont ceux de la période 1.

Une étude de sensibilité a été effectuée sur la perméabilité (pour $S = 7.35\%$) et le coefficient d'emmagasinement (pour $K = 2.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$) et résumée par les figures 14 et 15. Ces figures montrent que la réponse de l'aquifère est grandement modifiée par suite d'une nette variation d'au moins l'un des paramètres hydrodynamiques. Cet aquifère semble être « nerveux ».

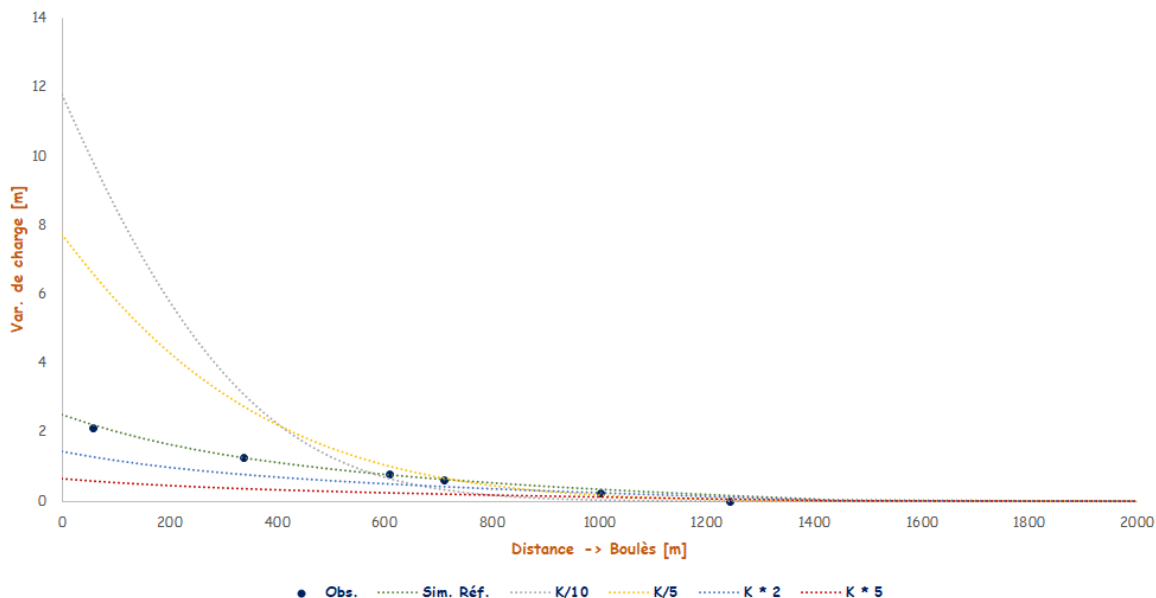


Figure 14 : Etude de sensibilité sur la perméabilité

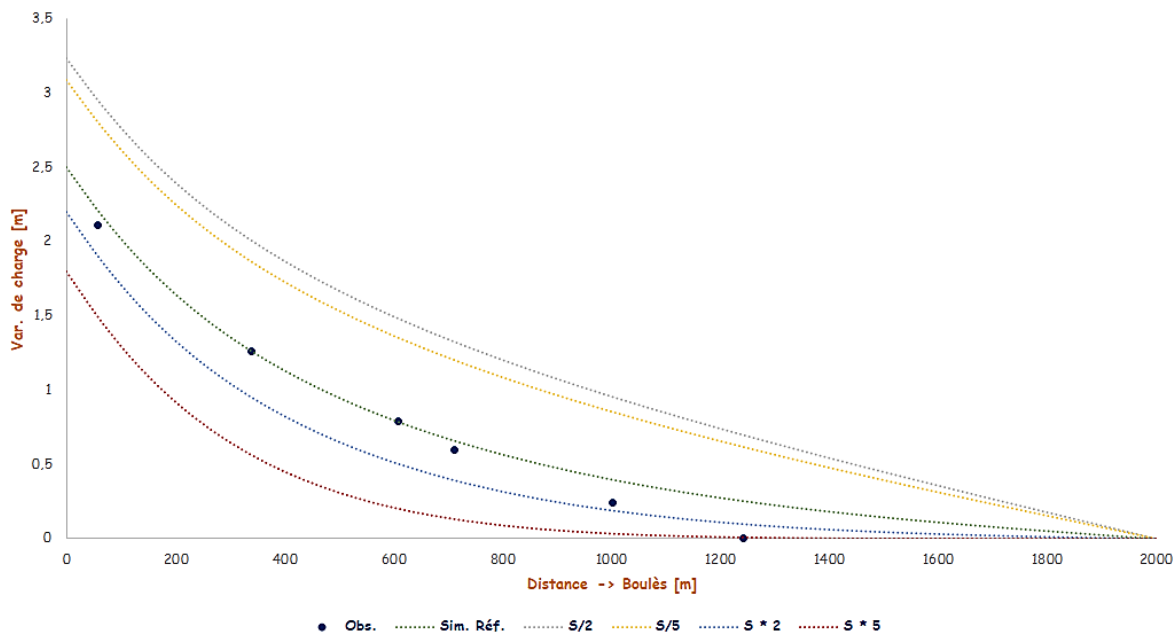


Figure 15 : Etude de sensibilité sur le coefficient d'emmagasinement

Par la suite, l'évolution temporelle du rayon de propagation de l'injection d'eau a été étudié. Cette étude a consisté à analyser la courbe dérivée de la solution de Hantush qui donne la progression du front d'influence dans le temps. Cette solution s'approche aisément à la solution de Théis dont la dérivée est donnée par :

$$t = -\frac{r^2 S}{4T} \frac{1}{\ln\left(\frac{2\pi T r \varepsilon}{Q}\right)}$$

Où Q, T, r, S et ε sont respectivement le débit injecté, la transmissivité de l'aquifère, le rayon de propagation au temps t , le coefficient d'emmaganement et enfin le critère de convergence, qui est pris égal à 1 cm . Pour confirmer l'approximation, une confrontation de la courbe dérivée aux données de terrain est nécessaire ; le résultat est présenté en *figure 16*.

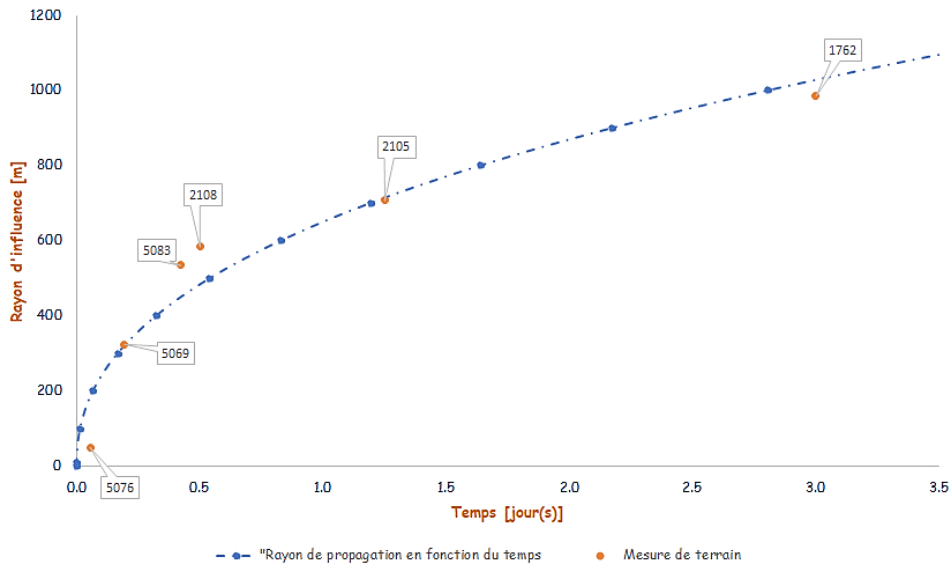


Figure 16 : Courbe de validation de l'approximation de la solution de Théis à celle de Hantush

Le coefficient de corrélation entre les données de terrain et celles fournies par la solution de Théis est de 99%. Visuellement, l'approximation est satisfaisante. Il ressort de cette courbe que plus l'on s'éloigne du point d'injection et plus faible est la vitesse de propagation. L'on passe par exemple de 167 m/j la 10^{ème} journée (rayon : 1670 m) après l'injection à 47 m/j après 2 mois 15 jours (rayon : 3500 m) (*figure 17*). Ce résultat met en évidence le retard lié à la propagation de l'eau des canaux situés sur la plaine et il est à considérer dans une modélisation distribuée.

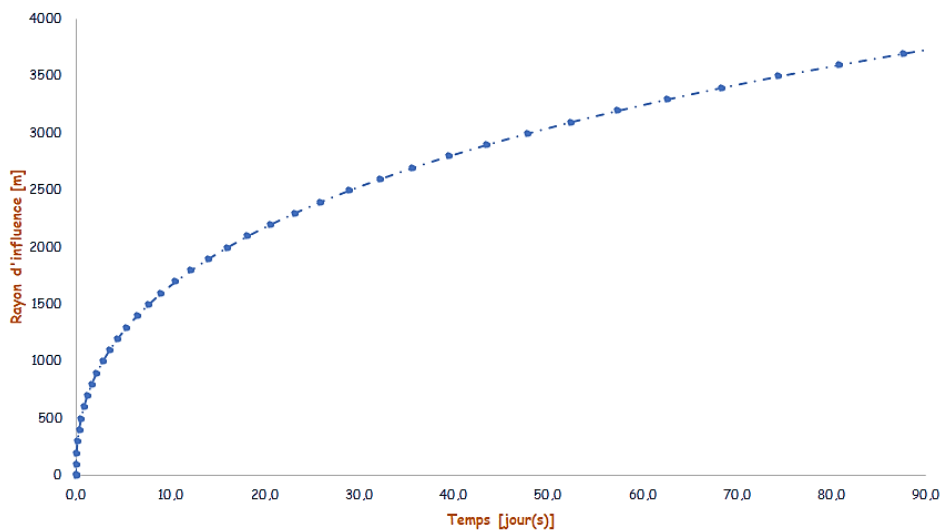


Figure 17 : Evolution dans le temps du rayon d'impact de l'injection d'eau dans le Boulès

4.1.2. Solution de Boussinesq

La solution de Boussinesq s'applique en régime hydraulique permanent. De ce fait, l'ajustement sera fait à la date du 19/12/2019 (veille de l'injection dans le Boulès). La *figures 18* représente le résultat obtenu.

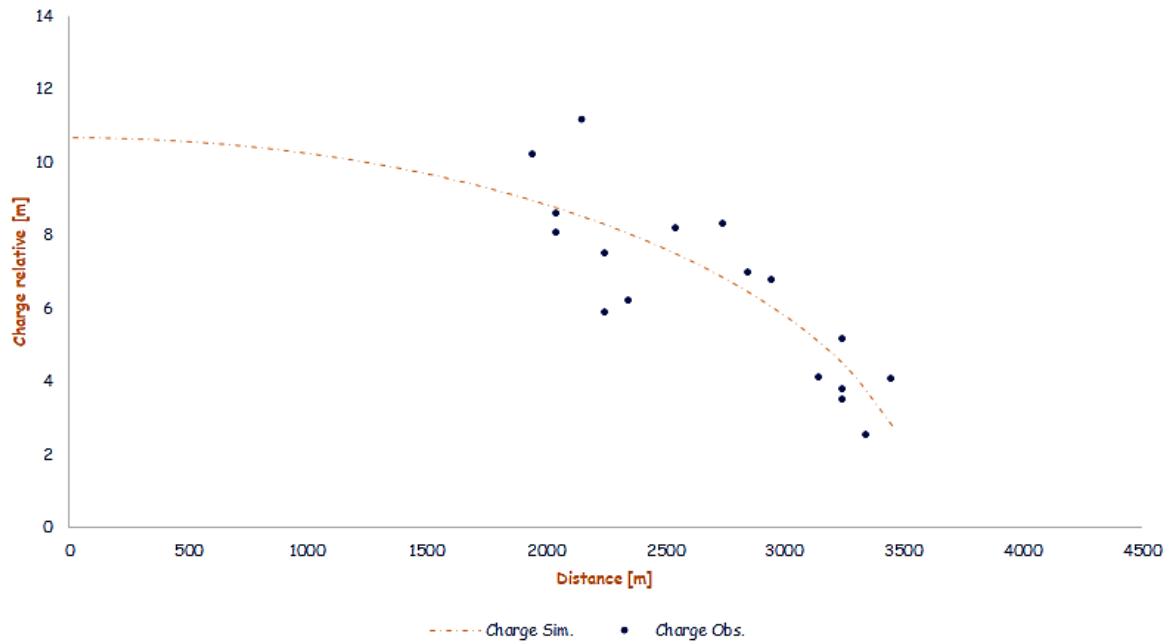


Figure 18 : Ajustement de la solution de Boussinesq aux données de terrain à la date du 19/12/2016

La solution a été ajustée avec une perméabilité de $2.6 \times 10^{-3} m/s$ et une recharge de $730.5 mm/an$. La recharge par la pluie moyenne est de $139 mm/an$ (estimée à l'aide d'un coefficient d'infiltration de 50%, voir annexe 2, figure 42) et correspond à environ 20% de la recharge totale estimée. Ce résultat renseigne sur le fait que la pluie seule n'explique pas les niveaux piézométriques observés. Le syndicat mixte de la plaine estime que les canaux d'irrigation disposés sur la plaine participeraient à hauteur de 50 à 70% (voir 80%) à la recharge du système aquifère ; ceci corrobore les résultats de la modélisation.

4.2. Modélisation analytique du transport de masse

La période (20/12/2016 au 31/01/2017) est une période peu influencée par la pluie. C'est aussi la période pendant laquelle le forage C2-1 a connu une baisse significative de sa conductivité électrique puis une augmentation lors de l'interruption du 06/01/2017 et sur laquelle le calibrage a été réalisé. A l'origine, l'expérimentation de la recharge n'est pas un essai de traçage et son adaptation pour une modélisation analytique du transport de masse suscite une question dont la réponse ne semble pas évidente : elle porte sur la nature réactive du « traceur ». N'ayant a priori pas de réponse à cette interrogation, les deux cas sont traités dans ce paragraphe. Les *figures 19 et 20* représentent les résultats obtenus avec un Nash d'au moins 98%, le débit d'injection étant égal à $756 m^3/h$ et le forage se trouvant à 3500 m du point d'injection. L'utilisation des équations de Xu et Eckstein (*annexe 3*) permettent de proposer une gamme de valeurs fiable de la dispersivité longitudinale. Dans le cas de cette modélisation les valeurs de dispersivité doivent être comprises entre 17.60 m et 50.65 m.

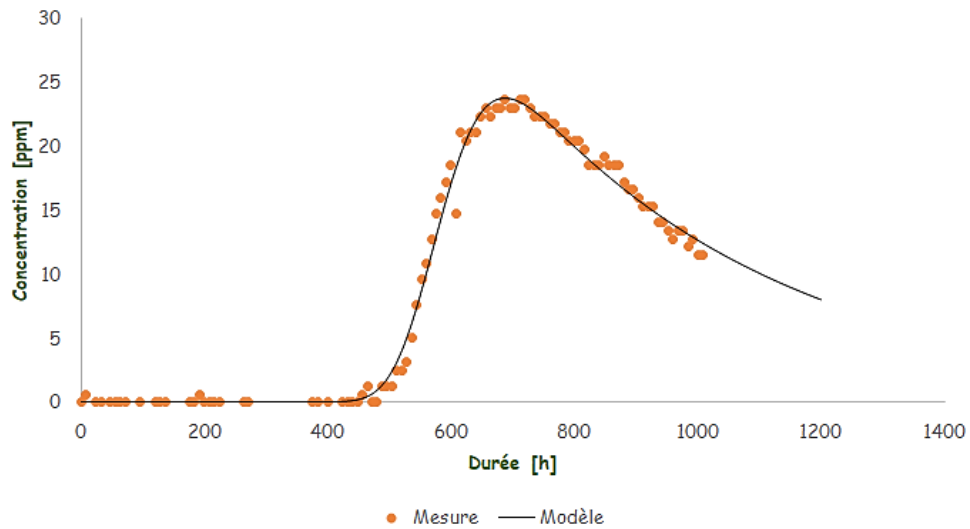


Figure 19 : Ajustement de la solution du transport de masse aux données de conductivités mesurées (en ppm) – Traceur non réactif

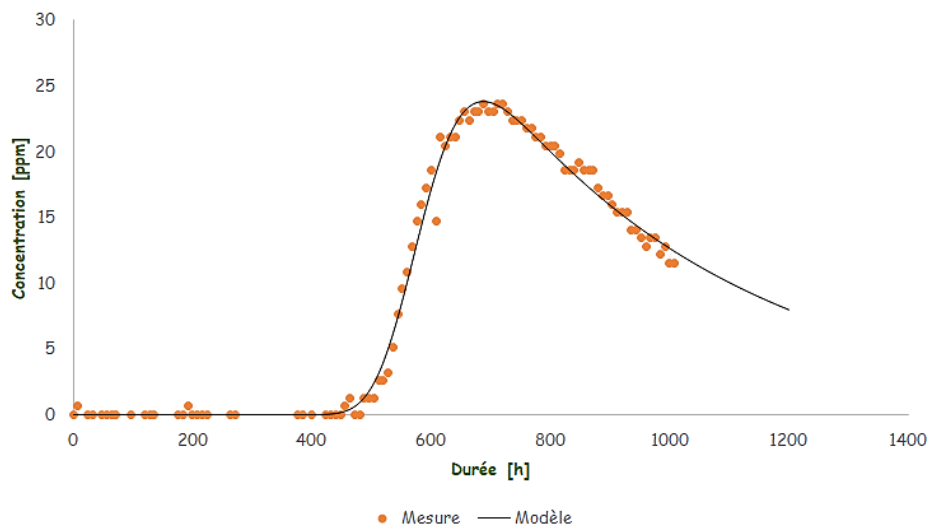


Figure 20 : Ajustement de la solution du transport de masse aux données de conductivités mesurées (en ppm) – Traceur réactif

✓ **1^{er} cas : traceur non réactif**

Les paramètres calibrés sont :

- La vitesse réelle de transport : $1.63 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
- Concentration de l'injection : 0.1259 kg/m^3
- La dispersivité longitudinale : 19.77 m
- Le coefficient de retard : 1

La vitesse réelle reste acceptable. En effet, elle est de l'ordre de la perméabilité de l'aquifère.

✓ **2^{ème} cas : traceur réactif**

Les paramètres calibrés sont :

- La vitesse réelle de transport : $8.81 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

- Concentration de l'injection : 0.6786 kg/m^3
- La dispersivité longitudinale : 19.71 m
- Le coefficient de retard : 5.408

Les deux simulations donnent une dispersivité longitudinale de l'ordre de 19.7 m .

Le coefficient de retard est défini comme le rapport entre la vitesse réelle et la vitesse de Darcy :

$$R = \frac{u_r}{u_D} = \frac{d/\Delta t_r}{d/\Delta t_D} = \frac{\Delta t_D}{\Delta t_r}$$

Soit $\Delta t_D = R \cdot \Delta t_r$ où Δt_r (resp. Δt_D) est le temps nécessaire pour mesurer les premières diminutions de concentration à la vitesse réelle (resp. à la vitesse de Darcy). Une lecture directe sur le graphique donne $\Delta t_r = 400 \text{ h}$ (*17 jours*). Ce qui permet d'obtenir $\Delta t_D = 3 \text{ mois}$. Cela signifie qu'il faudrait théoriquement 3 mois pour qu'une particule d'eau injectée dans le Boulès atteigne un ouvrage situé à 3500 m alors qu'en réalité 17 jours suffisent. **Ce retard doit être intégré à la chronique de recharge de l'aquifère par les canaux lors d'une modélisation distribuée.**

5. Conclusion partielle

L'analyse de la piézométrie à l'aide de la solution analytique de Hantush a permis de définir les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du quaternaire, données qui sont utilisées par la suite dans la modélisation numérique distribuée. Les valeurs obtenues sont les suivantes : $T = 3.25 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 7.35\%$. Par ailleurs, l'étude de la courbe dérivée de la solution de Hantush, approximée à celle de Théis, a permis de mettre en évidence un retard dans la recharge de l'aquifère du quaternaire via les canaux d'irrigation mais qui n'a pu clairement être quantifié. Une seconde solution analytique a été implémentée. C'est celle de Boussinesq. Elle a permis de déterminer approximativement la valeur moyenne de la recharge à introduire dans la modélisation maillée pour reproduire la piézométrie. Cette valeur est de 730.5 mm/an représentant environ 4 fois la recharge par la pluie. Ce résultat renseigne sur le fait que la pluie seule n'explique pas les niveaux piézométriques observés. Le syndicat mixte de la plaine estime que les canaux d'irrigation disposés sur la plaine participeraient à hauteur de 50 à 70% (voir 80%) à la recharge du système aquifère ; ceci corrobore les résultats de la modélisation. Enfin, l'emploi d'une solution analytique de transport de masse a permis de fournir les principaux paramètres hydrodispersifs de l'aquifère du quaternaire et de quantifier le retard dans la recharge de l'aquifère via les canaux à environ 3 mois. Enfin, l'aquifère du pliocène n'a pas fait l'objet d'analyse par manque de données.

Chapitre 2 : Modélisation hydrogéologique maillée restreinte au domaine de l'expérimentation

Ce chapitre traite de la modélisation distribuée réalisée sur la zone qui a été soumise à l'expérimentation de la recharge artificielle de 2016. Cette modélisation a pour but d'étudier sur une zone restreinte le comportement hydrogéologique du système aquifère de la plaine (Quaternaire + Pliocène), d'évaluer les échanges nappe-rivière et, en fonction des résultats obtenus, proposer un modèle conceptuel d'échanges et de transferts entre les canaux d'irrigation, les cours d'eau, la nappe du Quaternaire et celle du Pliocène, qui sera ensuite implémenté dans le modèle hydrogéologique numérique de la Plaine du Roussillon.

1. Synthèse des connaissances sur la zone d'expérimentation

1.1. Géologie et hydrogéologie

La zone d'expérimentation est localisée dans le bassin versant de la Têt, le cours d'eau le plus important de la plaine. Elle est située entre les communes Ille-sur-Têt et Saint-Féliu d'Amont. Cette zone est constituée, comme presque partout sur la plaine, de deux entités de natures géologique et hydrogéologique différentes : les aquifères du quaternaire et du pliocène. Ces deux entités sont séparées par une éponte très peu perméable dont la perméabilité est estimée à $2.5 \times 10^{-9} m/s$. Les caractéristiques hydrodynamiques de chacune d'elles sont les suivantes :

- **Système aquifère du quaternaire** : ce système considéré comme un seul bloc est dit à surface libre. Sa perméabilité varie entre 5×10^{-4} et $5 \times 10^{-3} m/s$ sur l'ensemble de la plaine tandis que son coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 3% à 10%. Sur la zone de l'expérimentation, il y a peu d'information sur ses propriétés. La modélisation analytique réalisée au chapitre I a permis de donner un ordre de grandeur : $2.6 \times 10^{-3} m/s$ pour la perméabilité et 7.35% pour le coefficient d'emmagasinement. Son épaisseur varie sur la zone entre 0.13 m et 24.34 m avec une moyenne à 8.14 m pour un écart-type de 4.46 m.
- **Système aquifère du pliocène** : ce système est essentiellement captif et est répandu sur toute la plaine. Dans la vallée de la Têt, il a de très bonnes propriétés. Sa transmissivité peut y atteindre $10^{-2} m^2/s$. Son coefficient d'emmagasinement moyen a été estimé entre 10^{-4} et 5×10^{-5} . Son épaisseur varie sur la zone entre 0.02 m et 107.36 m avec une moyenne à 41.25 m pour un écart-type de 17.6 m.

L'écoulement des eaux se fait globalement d'Ouest en Est avec un gradient allant de 5‰ à 3‰.

1.2. Hydrologie

La vallée de la Têt est parcourue par son fleuve, la Têt. Il a été montré que la Têt, entre le barrage de Vinça et Perpignan, perd une partie de ses eaux dans le Quaternaire [x]. Il est estimé à $10 Mm^3$ le volume annuel total transitant de la Têt vers la nappe sur l'ensemble de la vallée. Si l'on rapporte ce volume à la zone à modéliser en prenant en compte l'amont hydraulique de cette zone (surface du bassin versant de la Têt : 215 km² contre 68 km² pour la zone à modéliser + zone amont), le volume libéré par la Têt à la nappe est de $3.16 Mm^3$. Quant à son affluent, le Boulès, il est presque toujours à sec sur la zone de l'expérimentation et ne resurgit qu'à quelques centaines de mètres avant sa confluence avec la Têt. Enfin, la Têt reçoit une partie des eaux des canaux d'irrigation du bassin dont les débits ont été estimés entre 2 et 4 m³/s.

1.3. Prélèvements sur la zone

Il existe deux types de prélèvements sur la zone de l'expérimentation : des prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP) et pour l'irrigation. La *figure 21* localise ceux qui ont pu être identifiés comme fonctionnels avec leur débit moyens à l'année 2016 pour l'irrigation (ou dont les chroniques de débit de pompage ne sont pas disponibles) et les forages AEP avec disponibilité des chroniques de débit de pompage ainsi que les deux ouvrages dont la piézométrie est suivie en continu par le Syndicat Mixte (C2-1 pour le Quaternaire et C2-2 pour le pliocène).

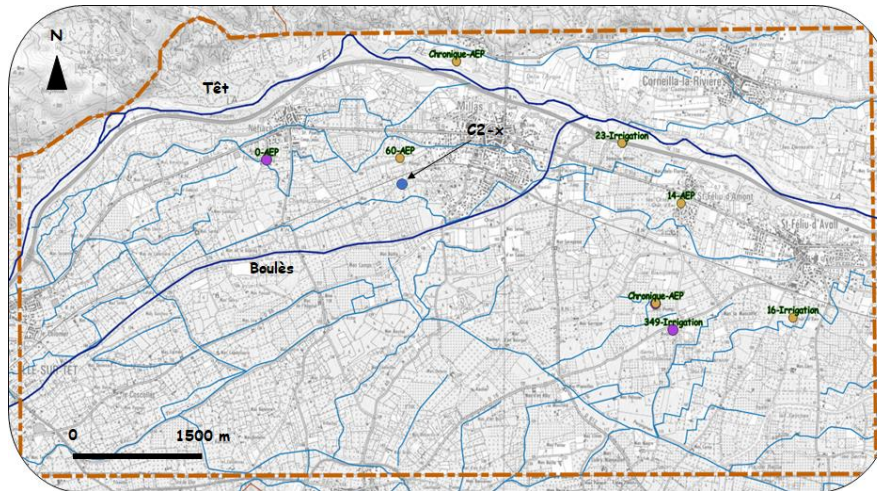


Figure 21 : Ouvrages de prélèvement dans le Quaternaire (Jaune) et le pliocène (Violet) avec les débits moyens (ou la disponibilité de chronique de débits)

1.4. Recharge de l'aquifère plio-quaternaire

La vallée de la Têt regorge le plus grand nombre de canaux d'irrigation. Lors de leur mise en charge, en hivers généralement, ces canaux alimentent directement la nappe du quaternaire à hauteur de 2 à 5 m³/s. Ce qui constitue 50 à 80% de la recharge totale de la nappe plio-quaternaire de la zone étudiée. Cette donnée doit être intégrée dans le modèle sous forme de chronique de recharge. Pour ce faire, une conversion des débits en hauteur de recharge a d'abord été faite par le biais du calcul suivant : $R[mm/an] = \frac{Q \times \Delta t}{S}$ avec $\Delta t = 3600 \times 24 \times 365.25$ s et S la superficie de la zone à modéliser, soit une recharge comprise entre 631 et 3156 mm/an. Il est important de rappeler que la recharge par les canaux peut être intégrée de deux manières dans le logiciel Marthe : soit en représentant l'ensemble des canaux et en leur attribuant des propriétés géométriques et hydrodynamiques, soit en intégrant cette recharge de manière similaire à la recharge par la pluie. C'est la deuxième option qui a été choisie car elle permet d'éviter de devoir caler certains paramètres tel que la perméabilité du lit des canaux et de définir les relations existant entre eux. Après la conversion, la chronique de recharge par les canaux a été construite et ce, selon deux éventualités qui résultent des *paragraphes 4.1.1 et 4.2* du chapitre I :

- **1^{ère} éventualité** : la recharge par les canaux s'effectue sans retard. Dans ce cas, la recharge par les canaux est nulle toute l'année sauf entre le 15/12 de l'année précédente et le 16/03 de l'année suivante.
- **2^{ème} éventualité** : la recharge par les canaux s'effectue avec un retard estimé à 3 mois au *paragraphe 4.2* du chapitre I. Dans ce cas, les canaux rechargent la nappe trois mois après leur mise en charge. En d'autres termes, la recharge par les canaux est nulle toute l'année sauf entre le 15/03 de l'année en cours et le 16/06 de la même année.

L'aquifère est aussi rechargé par les pluies. L'estimation de cette donnée a été effectuée à l'aide de l'outil ESPERE (BRGM). Les données d'entrée sont : les chroniques de pluie et d'ETP de la maille SAFRAN numérotée 9671 et un coefficient d'infiltration de 50% dont le choix a été guidé par l'analyse de l'indice IDPR de la zone de modélisation ; la loi d'estimation de la recharge est la loi GR4J-Gardénia.

Pour finir, la recharge totale à entrer dans le modèle est calculée en faisant la somme des deux chroniques précédentes. Les données sont disponibles en *annexe 2, figure 43*.

2. Bilan global annuel des flux sur la zone à modéliser

Les limites Ouest et Est de la zone à modéliser sont des limites artificielles car elles ne correspondent pas à des limites d'affleurement. Ainsi, la limite Ouest joue un rôle hydraulique à flux non nul. Quant à la limite Est, elle constitue l'exutoire du système. Le bilan global des flux est un résumé des entrées et sortie d'eau de la zone modélisée. Dans le cas présent, il existe 4 entrées au système : les flux de la limite amont (Ouest), la recharge par la pluie, la recharge par les canaux et les transits d'eau de la Têt à l'aquifère. Et trois sorties de système : les prélèvements (pompages), les flux de sortie à l'exutoire et les retours d'eau à la Têt.

2.1. Entrées d'eau dans le système

2.1.1. Transit d'eau de la Têt vers l'aquifère

Les transits d'eau de la Têt vers l'aquifère sont estimés à 3.2 Mm^3 dans la zone à modéliser.

2.1.2. Recharge par la pluie et les canaux

La recharge par la pluie moyenne est de 183 mm/an . Ceci constitue un volume annuel de 9.15 Mm^3 (La superficie de la zone modélisée est environ égale à 50 km^2). Les canaux fournissent 2 à $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\pm 1 \text{ m}^3/\text{s}$) pendant 3 mois dans l'année, ce qui constitue entre 15.55 Mm^3 et 38.88 Mm^3 .

2.1.3. Volume entrant à la limite amont

Le volume de l'amont peut être défini comme étant le volume équivalent de recharge par la pluie contenue par l'amont du domaine étudié. Cet amont hydraulique occupe une superficie de 10.8 km^2 et la pluie moyenne est de 183 mm/an , ce qui donne un volume de 1.98 Mm^3 .

2.2. Sorties d'eau du système

2.2.1. Prélèvements

Ne disposant pas des chroniques de prélèvement des ouvrages recensés, à l'exception des quatre ouvrages C1-1, C1-2, C3-1 et C3-2 qui sont en fonctionnement sur 3 mois dans l'année, ceux-ci sont considérés en fonctionnement sur toute l'année. La somme de leur débit moyen est de $686 \text{ m}^3/\text{h}$ contre $344 \text{ m}^3/\text{h}$ pour les ouvrages C1-x et C3-x. Ceci constitue un volume total annuel de 6.756 Mm^3 .

2.2.2. Volume sortant à la limite avale

Aucune information n'est disponible pour évaluer ce volume.

2.2.3. Retour d'eau vers la Tête

Une partie des eaux d'irrigation (canaux) retourne à la Tête. Le débit de ces eaux a été estimé entre 2 et 4 m^3/s , correspondant à un volume de 15.56 à 31.1 Mm^3 .

2.3. Synthèse

La figure x est un résumé graphique du bilan de flux de la zone à modéliser.

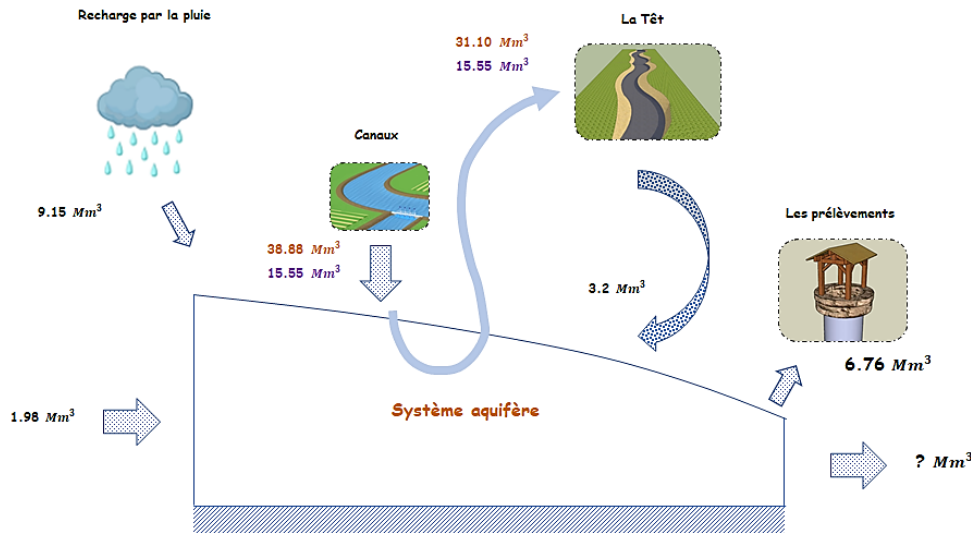


Figure 22 : Bilan global des volumes d'eau de la zone modélisée

3. Matériel et méthode

3.1. Matériel

L'outil utilisé pour la modélisation est le logiciel Marthe du BRGM.

3.1.1. Logiciel Marthe

MARTHE (Modèle d'Aquifère avec un maillage Rectangulaire, Transport et Hydrodynamique) est un code de calcul développé par le BRGM permettant une modélisation 2D ou 3D des écoulements et transferts dans les systèmes aquifères en intégrant les influences climatiques, anthropiques et les réactions géochimiques éventuelles. Il est basé sur la méthode des volumes finis et intègre :

- Les aquifères monocouches, multicouches et 3D
- Les réseaux hydrographiques (rivière, cours d'eau, drains)
- Les échanges avec l'atmosphère (pluie, neige, évapotranspiration)

Le calcul peut également prendre en compte :

- Les transferts de masse et les effets de la température
- L'influence de la salinité et la dégradation des polluants
- Les transferts à travers la zone non saturée et les interactions géochimiques

L'équation générale aux dérivées partielles utilisée dans le code MARTHE pour résoudre l'écoulement transitoire au sein d'un aquifère tridimensionnel, poreux, captif, hétérogène et anisotrope est la suivante :

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

Avec :

- h : Charge hydraulique [L]
- K_{ii} : Conductivité hydraulique selon la direction « i » [$L \cdot T^{-1}$]
- S_s : Le coefficient d'emménagement spécifique [L^{-1}]
- W : Le terme source (flux unitaire entrant et sortants dans l'aquifère [T^{-1}])
- t : Le temps [T]

3.1.2. Intégration des échanges nappe-rivière dans Marthe

Dans Marthe, un réseau hydrographique est représenté comme un système arborescent de tronçons de rivière organisés en affluents. Ce réseau est en contact uniquement avec la couche qui affleure localement. Chacun des tronçons est identifié par le numéro d'affluent auquel il est raccordé et par son numéro de tronçon. Dans un même affluent, les tronçons sont numérotés dans l'ordre croissant. Cette typologie de numérotation permet à Marthe de connaître l'amont et l'aval de l'affluent. Un même tronçon ne peut avoir qu'un seul tronçon aval mais peut, par contre, recevoir jusqu'à trois tronçons amont. Un exutoire correspond à l'extrémité d'un affluent sans affluent aval (numéro égal à 0) et une source à celle d'un affluent sans affluent amont. Mis à part les numéros de tronçon et d'affluent, d'autres propriétés du tronçon doivent être renseignés dans chacune des mailles : les propriétés des tronçons d'affluent à savoir sa géométrie, ses propriétés physiques, son terme source et son état. Il existe deux options de calcul des débits et hauteurs d'eau dans Marthe selon que l'on dispose d'une loi débit-hauteur ou non. Enfin, les variables résultat possible à récupérer sont :

- Débit dans un tronçon de rivière (débit à l'aval du tronçon)
- Débit d'échange rivière-nappe (> 0 si la rivière alimente la nappe)

3.2. Méthode

La modélisation numérique distribuée consiste en quatre grandes étapes explicitées ci-après.

3.2.1. Géométrie du modèle, conditions aux limites et initiale et entrées-sorties

Le modèle considère deux couches aquifères séparées l'une de l'autre par une épente de 1 m très peu perméable. Les données disponibles pour la construction de la géométrie sont les couches x-y-valeur de substratum du Quaternaire et du Pliocène et la couche x-y-valeur du MNT. Le maillage du modèle est carré de 100 m de côté. Ces données sont transférées dans des grilles dans Marthe construisant automatiquement la géométrie. Après cette étape, la condition initiale est fixée. Cette modélisation ne traitant que de l'écoulement souterrain, la condition initiale est une condition de charge hydraulique. Deux cartes piézométriques, l'une pour le quaternaire et l'autre pour le pliocène, d'août 2012 ont été utilisées pour définir l'état piézométrique initiale du système. Puis, les conditions aux limites sont définies. La *figure 23* résume ces conditions.

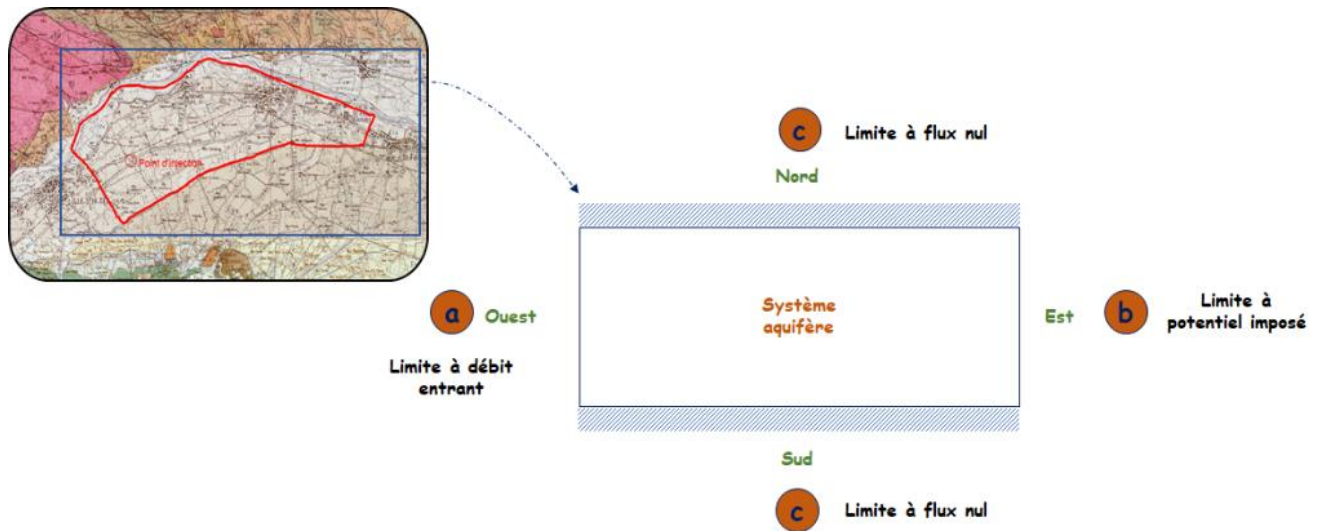


Figure 23 : Condition aux limites du modèle

- **Limite (a) :** cette limite amont est « artificielle » car elle ne correspond ni à une limite d’affleurement ni à une limite de partage des eaux. Un débit entrant doit être assigné aux mailles correspondantes, représentant les apports d’eau par l’amont de cette limite. C’est donc une limite à débit entrant ;
- **Limite (b) :** elle correspond à une limite à potentiel imposé. Cependant, en régime transitoire, cette contrainte sera supprimée du modèle après le pas de temps initial, ce qui est recommandé.
- **Limites (c) :** Ces limites correspondent à des limites d’affleurement. La modélisation par limite à flux nul est recommandée [x].

Enfin, la recharge totale, les prélèvements et le débit écoulé dans la Têt doivent être introduits dans le modèle.

3.2.2. Calage du modèle

Une fois la géométrie du modèle, les conditions et les entrées et sorties du modèle sont renseignées, la prochaine étape est le calage. Il consiste en deux sous étapes presque pas dissociables : les calages en régimes hydrauliques permanent et transitoire. Grossièrement, le calage en régime permanent permet de fixer la perméabilité des différents compartiment du modèle permettant de reproduire globalement la piézométrie et les gradients hydrauliques. Le calage en transitoire permet, quant à lui, de fixer les coefficients d’emmagasinement libre et/ou captif. Toutefois, l’étape du calage est le plus souvent un processus itératif entre le régime permanent et le régime transitoire, ce qui a été le cas de cette modélisation. Il est important de noter que le calage en régime transitoire doit se faire sur au moins un cycle hydraulique de l’aquifère.

3.2.3. Validation du modèle

Lorsque le modèle réussit à passer les étapes de calage, une dernière étape se présente pour juger de la capacité de prédiction du modèle sur une période non calée : c’est l’étape de validation.

4. Résultats, analyse et interprétation

4.1. Géométrie du modèle

La *figure 24* représente deux coupes de la géométrie de l’aquifère dans les directions Sud-Nord et Ouest-Est respectivement.

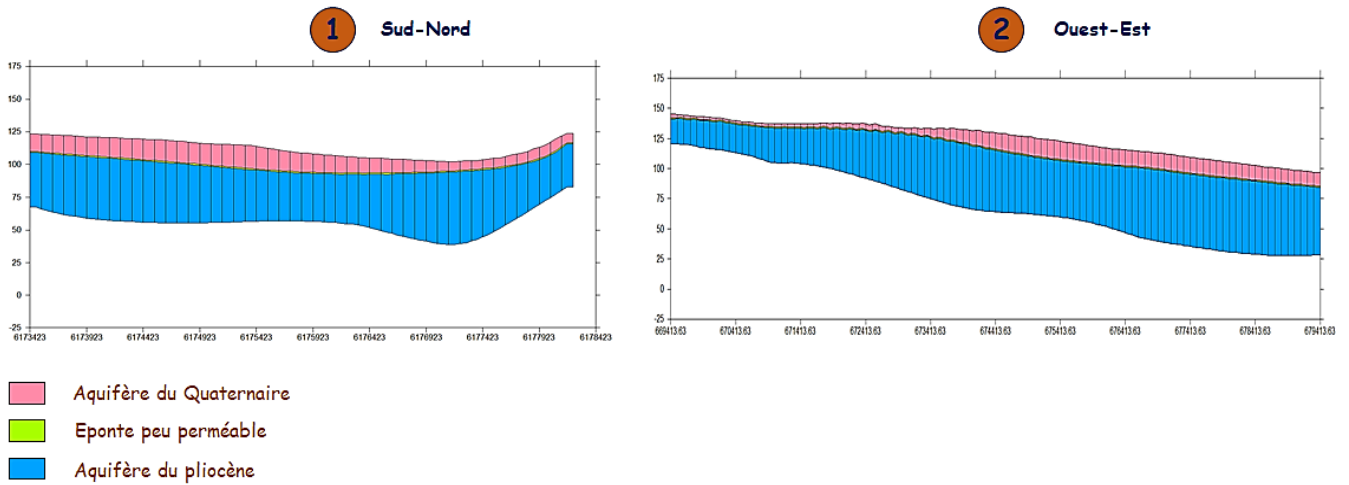


Figure 24 : Coupes Sud-Nord et Ouest-Est de la géométrie de l'aquifère

4.2. Calage en régime permanent

Cette étape a consisté à caler la transmissivité du pliocène, la perméabilité de l'éponte ayant été prise égale à sa valeur de référence ($2.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$) et la transmissivité du quaternaire prise égale à $T = 2.6 \times 10^{-3} \times 12.5 = 3.25 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (Conf. Modélisation analytique Chapitre I, paragraphe 4.1.1), la perméabilité du lit de la Têt conformément à son rôle de transitant d'eau dans l'aquifère et la recharge moyenne à admettre pour reproduire les gradients hydrauliques et la piézométrie. La date de référence est le 19/12/2016, veille de l'expérimentation de recharge. Les résultats sont présentés aux figures 25 à 27.

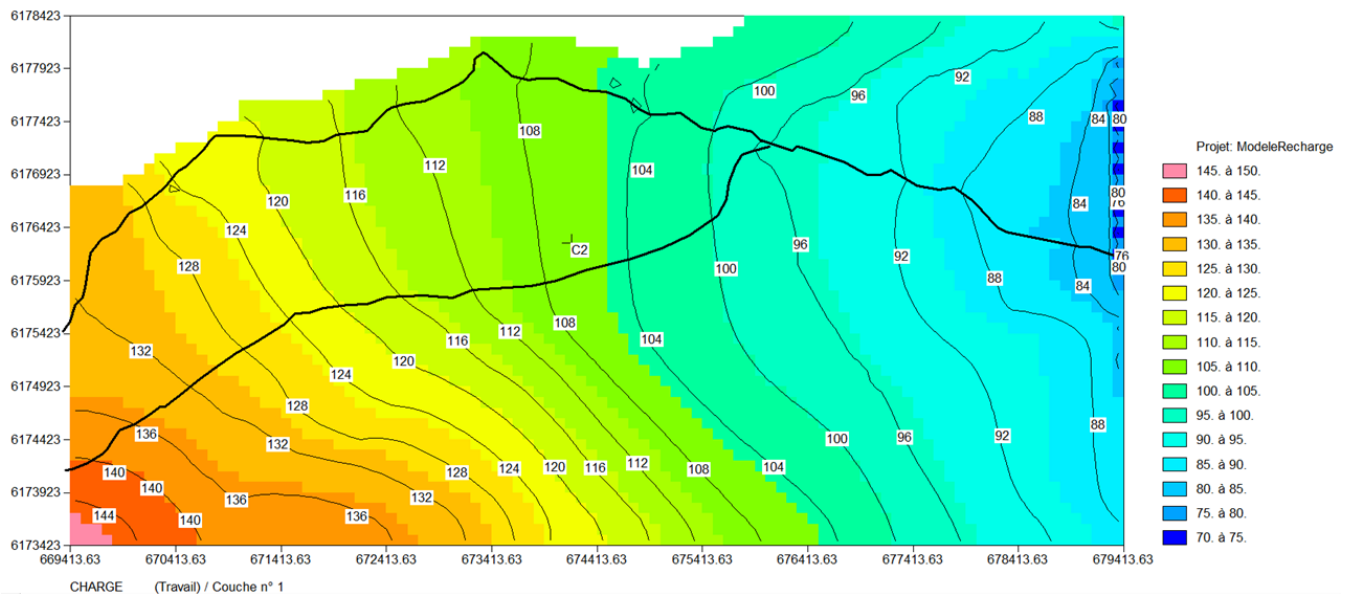


Figure 25 : Charge hydraulique simulée du Quaternaire

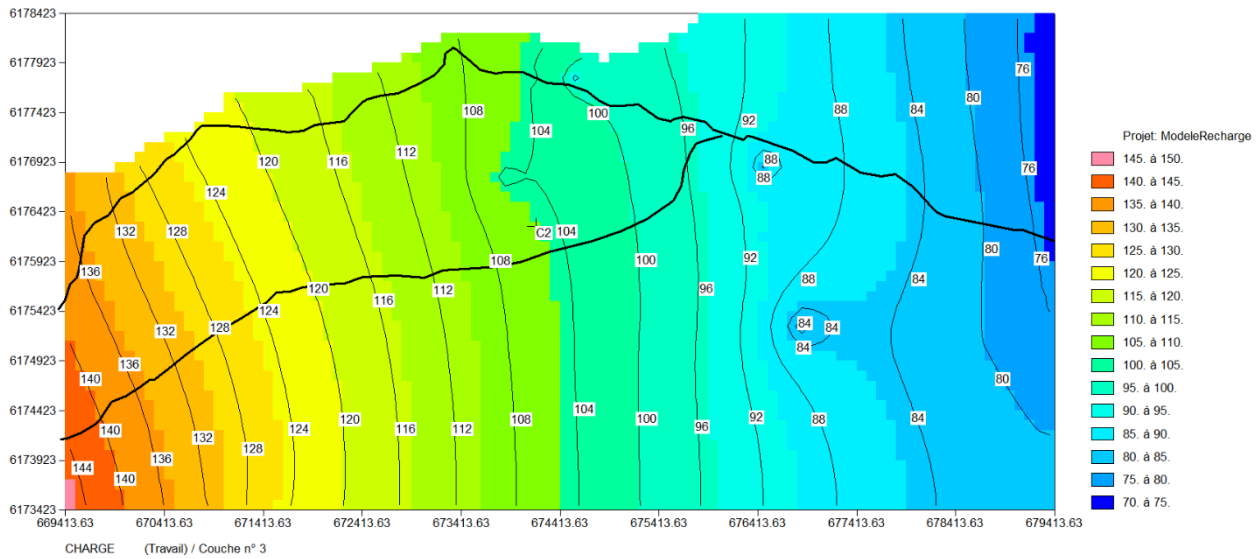


Figure 26 : Charge hydraulique simulée du Pliocène

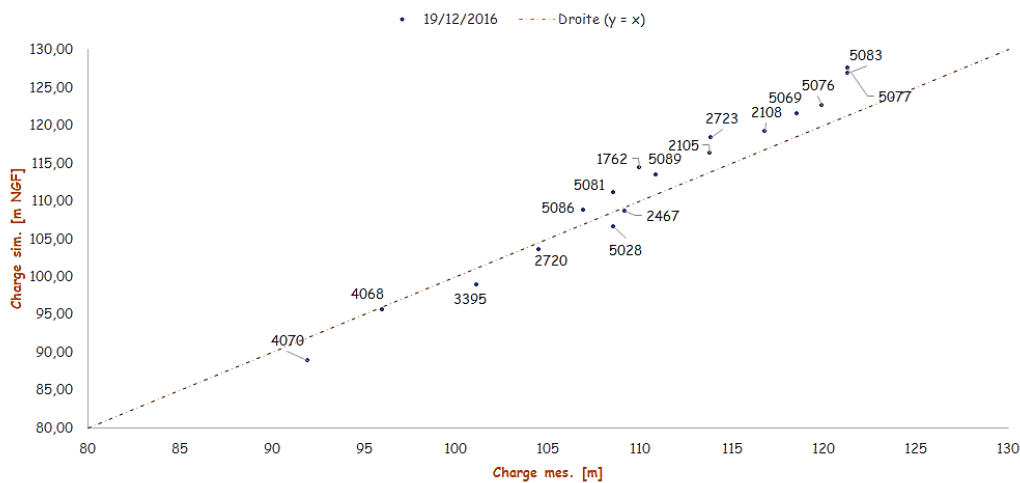


Figure 27 : Graphique de corrélation entre charges simulées et charge mesurées

Ces résultats ont été obtenus avec une transmissivité de $2 \times 10^{-3} m^2/s$ pour le pliocène, une perméabilité de $1 \times 10^{-6} m/s$ pour le lit de la Têt et une recharge totale moyenne de $300 mm/an$ (soit 1.6 fois la recharge par la pluie). Le coefficient de corrélation est estimé à 98.8% et reste le meilleur calage ayant été fait avec des valeurs uniques de transmissivité. Il est rappelé que la perméabilité du lit de la Têt a été calée de sorte que le bilan de débit au niveau de la Têt soit égal à $\frac{3.2 Mm^3}{365.25 \times 24 \times 3600} - 2 m^3/s$ (ou $4 m^3/s$) soit environ $-1.9 m^3/s$ à $-3.9 m^3/s$. Les paramètres géométriques résultants sont : une pente de 3‰ et une rugosité de 0.02. Il est constaté que la simulation surestime la charge dans la partie Nord-Ouest de la zone modélisée alors qu'elle donne des résultats très proches des mesures en partie opposée, à l'exception du point 4070 (pliocène) où la charge est sous-estimée. Les gradients moyens du quaternaire et du pliocène simulés varient entre 4‰ et 5.71‰, ce qui est globalement satisfaisant.

4.3. Calage en régime transitoire

Le calage en régime transitoire a été réalisé sur deux années avant l'expérimentation de la recharge artificielle du 31/12/2014 au 20/12/2016. Les deux cas ont été traités dans ce rapport à savoir, en premier, la prise en compte d'un retard de la recharge de l'aquifère par les canaux et en deuxième la non prise en compte de ce retard estimé à 3 mois

environ. Les *figures 28 à 31* sont les résultats obtenus représentant la corrélation entre charges simulées et charge mesurées pour les deux ouvrages de suivi en continu (C2-1 et C2-2).

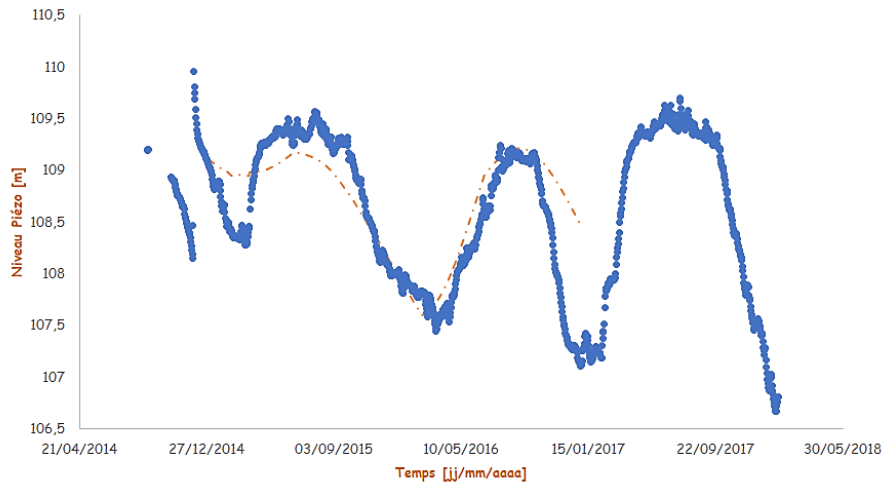


Figure 28 : Courbes des charges simulées (bleu) et mesurées (orange) au niveau de C2-1, avec retard

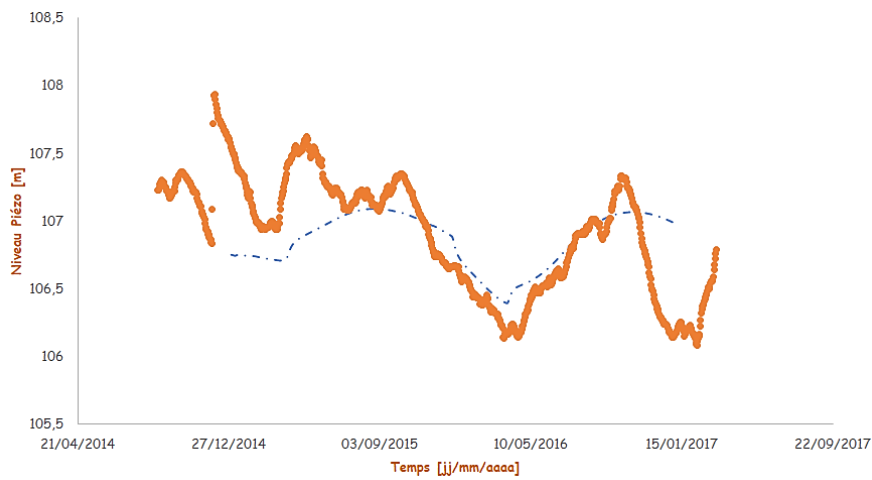


Figure 29 : Courbes des charges simulées (Orange) et mesurées (bleu) au niveau de C2-2, avec retard

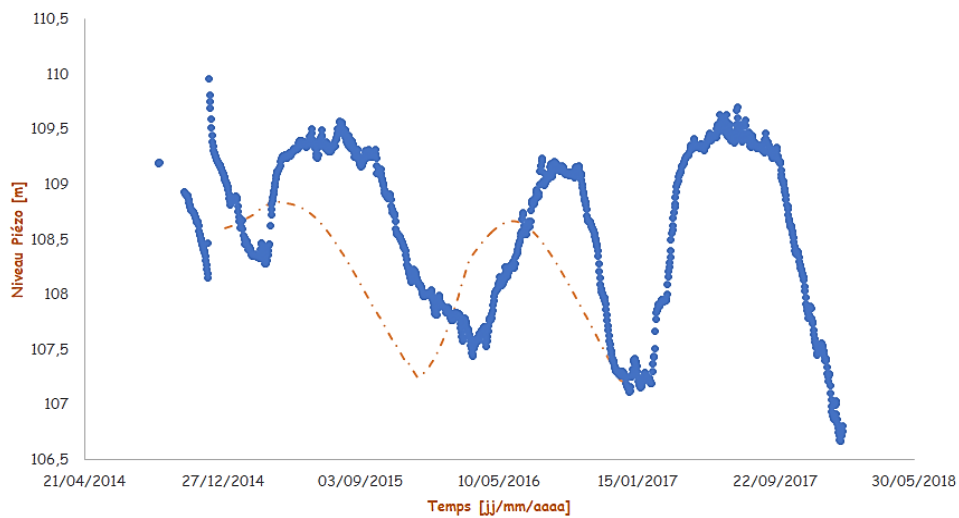


Figure 30 : Courbes des charges simulées (bleu) et mesurées (orange) au niveau de C2-1, sans retard

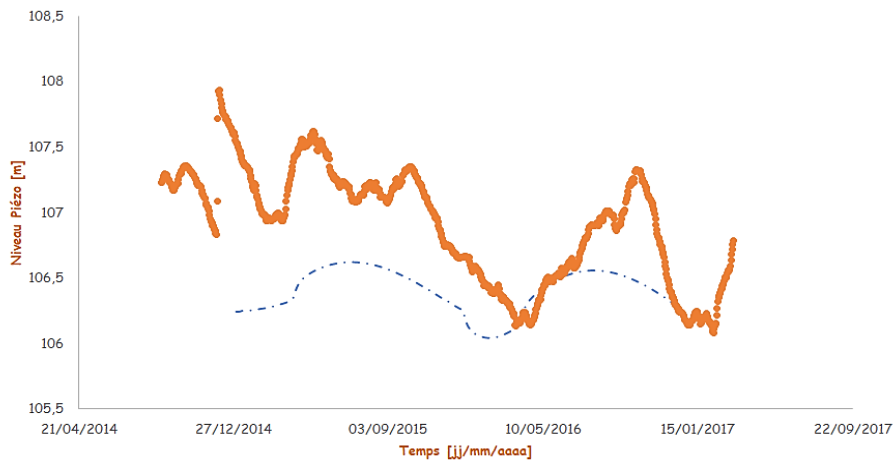


Figure 31 : Courbes des charges simulées (Orange) et mesurées (bleu) au niveau de C2-2, sans retard

Lorsque l'on tient compte du retard dans la recharge de l'aquifère par les canaux, les coefficients de Nash (NSE) obtenu pour les ouvrages C2-1 et C2-2 sont respectivement égaux à 60% et 35% contre -43% et -145% lorsqu'aucun retard n'est pris en compte. Il est à noter que le coefficient de Nash permet d'accéder à l'efficacité du modèle. Un NSE compris entre 50 et 65% décrit un modèle suffisamment efficace et un NSE négatif indique que le modèle ne peut reproduire la réalité. Il est évident de constater que la non prise en compte du coefficient de retard dans la recharge par les canaux conduit à une mauvaise reproduction de la réalité. Dans le cas où l'on considère un coefficient de retard non unitaire, le modèle est suffisamment efficace pour ce qui concerne l'ouvrage C2-1. Quant à l'ouvrage C2-2 l'efficacité est moindre mais reste acceptable puisque la tendance générale est bien représentée. Le coefficient de détermination (ou de corrélation) a aussi été calculé dans ce dernier cas. Il mesure la qualité de la prédiction. Un coefficient de détermination supérieur à 70% indique une bonne qualité de prédiction. Les ouvrages C2-1 et C2-2 présentent un coefficient de détermination supérieur à 70% (respectivement 89% et 79%). Enfin, si l'on définit le coefficient de drainance comme l'anisotropie verticale de la perméabilité de l'éponte alors ce coefficient peut être pris dans l'intervalle $[1, 3/2]$.

✓ Bilan annuel moyen des flux et comparaison à la réalité

- Au niveau de la Têt

Le volume moyen annuel au niveau de la Têt est de -22.9 Mm^3 (correspondant à la différence entre ce qu'elle fournit à la nappe et les retours d'eau des canaux d'irrigation).

Cette valeur est bien comprise entre -12.35 et -27.9 Mm^3 (Bilan global réel).

- Prélèvements

Les prélèvements constituent, pendant la période de calage, un volume de 6.64 Mm^3 . Cette donnée reste proche de la valeur moyenne.

- Recharge totale

La recharge totale introduite dans le modèle représente 19.2 Mm^3 . Le bilan global réel estime une recharge totale (pluie + canaux) comprise entre 24.7 et 48.03 Mm^3 avec une erreur de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la recharge par les canaux, soit entre les valeurs extrêmes 16.93 et 55.81 Mm^3 . La recharge du modèle est bien contenue dans l'intervalle.

- Volume entrant par la limite amont

Ce volume représente $2.8 Mm^3$. Il s'éloigne de 41% environ de la valeur moyenne réelle ($1.98 Mm^3$).

Finalement, le bilan de flux s'apparente bien à la réalité.

4.4. Validation du modèle

La validation du modèle est la dernière étape d'une modélisation. Elle permet de confronter le modèle à des données d'une période mise de côté exprès pour évaluer le caractère prédictif du modèle. Dans le cas de cette étude, la période choisie commence deux jours avant le début de l'expérimentation et prend fin bien après la fin de l'expérimentation (Du 18/12/2016 au 30/07/2017). Les figures *x et y* correspondent aux résultats obtenus, la perméabilité du lit du Boulès ayant été calée à $7 \times 10^{-5} m/s$.

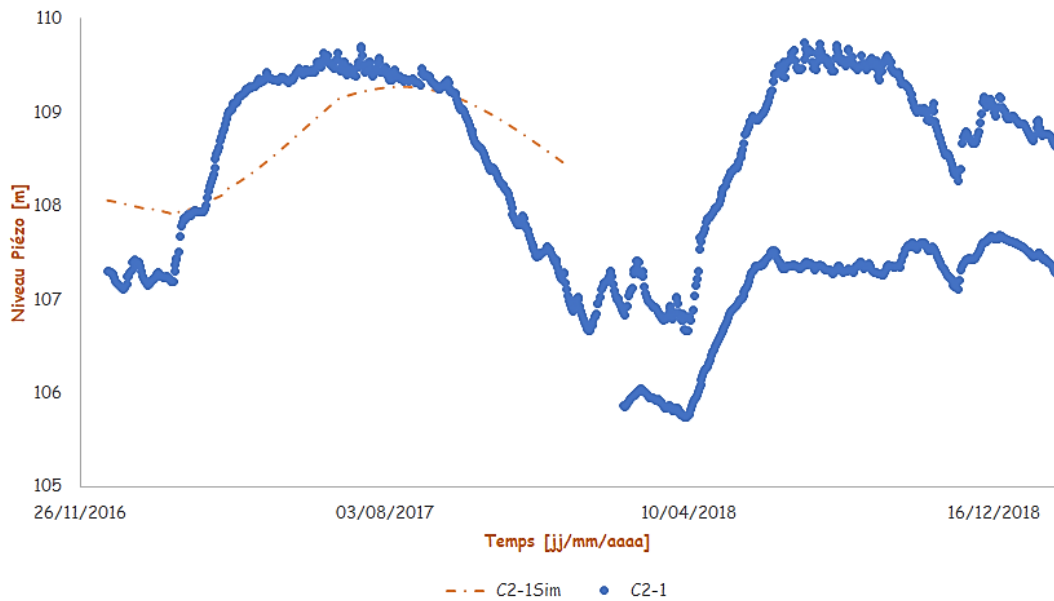


Figure 32 : Courbes des charges simulées (bleu) et mesurées (orange) au niveau de C2-1, avec retard

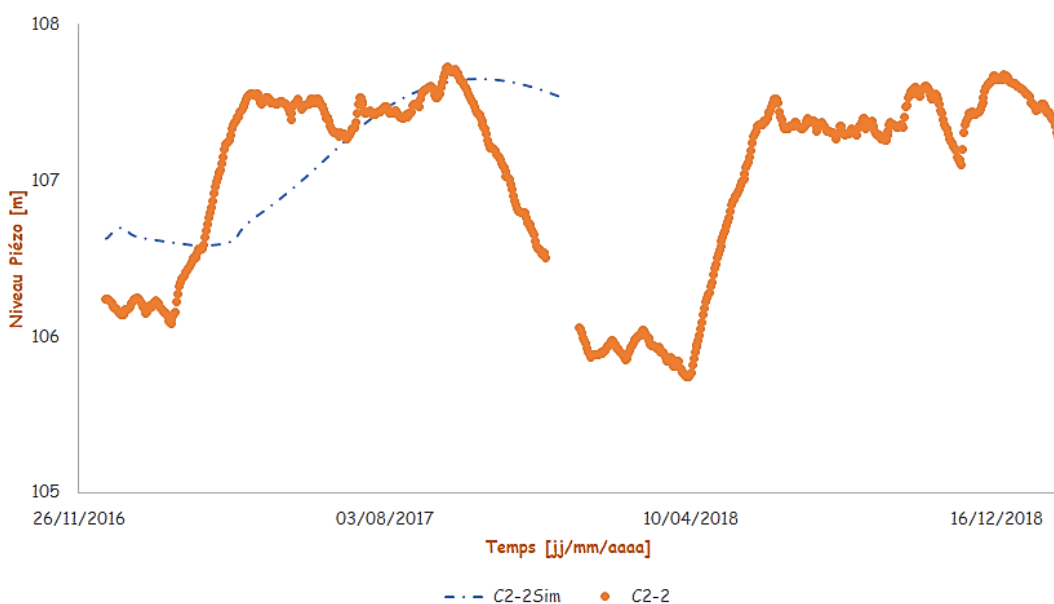


Figure 33 : Courbes des charges simulées (Orange) et mesurées (bleu) au niveau de C2-2, avec retard

Ces simulations sont efficaces à 91% pour l'ouvrage C2-1 et 57% pour le C2-2. Parallèlement, elles sont corrélées aux données mesurées à 95% pour le C2-1 et 78% pour le C2-2. Ces résultats sont satisfaisants.

4.5. Modèle conceptuel

Le schéma de la *figure 34* indique les principaux éléments qui régissent le fonctionnement hydraulique du système aquifère plio-quaternaire du domaine étudié. Ce fonctionnement peut être décrit comme suit :

Les alluvions aquifères du quaternaire s'alimentent par les pluies tombées sur la surface affleurante (1). Par un effet de drainance, la nappe du pliocène est approvisionnée en eau par les alluvions (2). La vallée de la Têt est traversée par de nombreux canaux d'irrigation. Ceux-ci contribuent majoritairement à la recharge de la nappe du quaternaire (3). De même, une partie des eaux de la Têt s'infiltre et contribue à la recharge de la nappe du quaternaire (4). Cependant, une très grande partie des eaux ayant servi à irriguer les terrains rejoignent, au bout d'un certain temps, la Têt via l'aquifère du quaternaire (5).

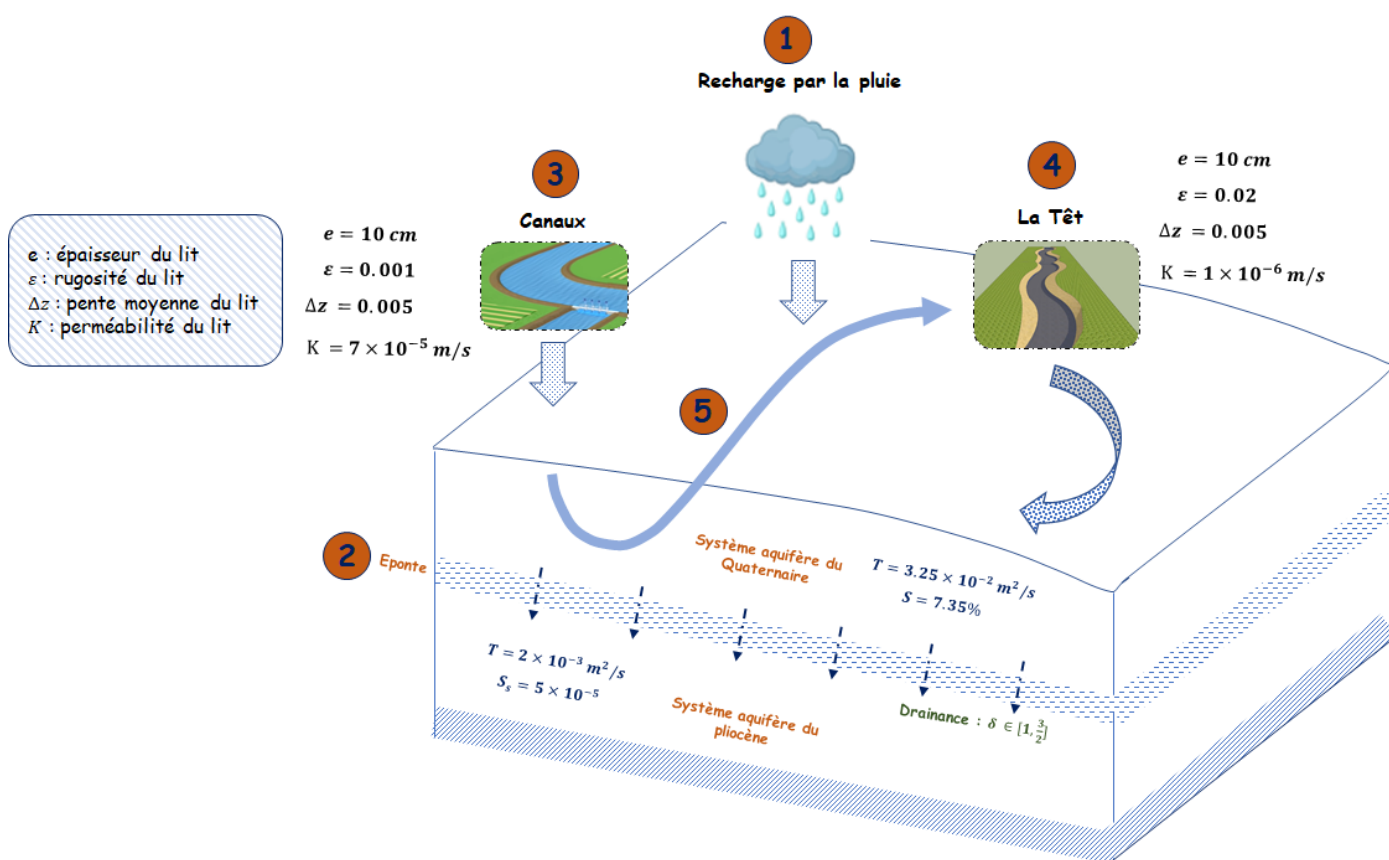


Figure 34 : Modèle conceptuel d'échange de flux entre les différents compartiments de l'hydrosystème du domaine étudié

5. Conclusion partielle

Le pliocène a été caractérisé par une transmissivité de $2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ et un coefficient $S_s = 5 \times 10^{-5}$. Le lit de la Têt a été calibré avec une pente de 5%, une rugosité de 0.02, une épaisseur de colmatage du lit de 10 cm et une perméabilité de $K = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Quant au Boulès, la pente, la rugosité, l'épaisseur de colmatage et la perméabilité ont été calibrés respectivement à 5%, 0.001, 10 cm et $K = 7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

Chapitre 3 : Réalisation d'un Plug-in pour une estimation de la recharge totale d'un aquifère à surface libre

L'estimation de la recharge d'un aquifère n'est pas toujours évidente. Il existe diverses lois pour son évaluation parmi lesquelles figure la solution proposée par Boussinesq. Elle permet de calculer cette donnée en tout point d'un aquifère et en régime hydraulique permanent selon l'équation suivante (*Figure illustrative : chapitre I, figure 10*) :

$$R = K \frac{h^2 - b^2}{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - x^2}$$

Où :

- h : Charge hydraulique relative ($h = h_{mNGF} - Z(sub)_{mNGF}$) à l'abscisse x [L] avec $Z(sub)$ la côte du substratum de l'aquifère
- b : Charge hydraulique relative au cours d'eau [L],
- K : Perméabilité de l'aquifère [$L \cdot T^{-1}$]
- $\frac{L}{2}$: Distance cours d'eau – limite à flux nul [L]
- R : Recharge [$L \cdot T^{-1}$]

La plaine du Roussillon est traversée par de nombreux canaux d'irrigation qui participent dans les plus grandes proportions à la recharge de la nappe plio-quaternaire. Identifier les zones où la pluie n'est pas le seul responsable des observations piézométriques est l'enjeu de ce chapitre. Pour ce faire, il a été jugé nécessaire de conceptualiser et écrire un programme informatique de type « plugin » afin d'automatiser le calcul spatialement distribué de la recharge sur l'ensemble de la plaine. La soustraction de la recharge totale calculée par le programme à celle estimée à l'aide de l'indice IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux, BRGM), et donc la recharge par la pluie, permettra finalement l'identification des zones influencées par les canaux.

1. Données nécessaires

L'équation (1) fait intervenir trois types de paramètre : un paramètre hydrodynamique (perméabilité), deux paramètres géométriques (distances x et $L/2$) et deux paramètres hydrauliques (charges hydrauliques h et b). Pour un calcul maillé, six couches SIG sont indispensables dont quatre couches de types raster représentant respectivement la perméabilité, une carte piézométrique, le substratum de l'aquifère et un modèle numérique de terrain (MNT) et deux couches de type vecteur-ligne correspondant au réseau hydrographique et à la limite du domaine de calcul. Le domaine de calcul correspond à l'intersection entre l'aquifère et le bassin versant auquel il appartient. Le MNT avec le réseau hydrographique et la limite du domaine permettent de calculer en chacune des mailles les paramètres de géométrie tandis que la carte piézométrique et celle du substratum sont utilisées pour le calcul des paramètres hydrauliques.

2. Matériel et méthode

2.1. Matériel

Un plugin est défini comme un programme informatique apportant des fonctionnalités additives à un logiciel hôte. Le choix du logiciel hôte s'est porté sur Quantum SIG (QGIS en abrégé) qui permet le développement d'extensions en langage python en particulier.

2.1.1. Quantum SIG

Quantum GIS est un logiciel d'information géographique capable d'organiser et de présenter des données numériques spatialement référencées, ainsi que de produire des plans et des cartes. Ses principales fonctionnalités sont :

- L'affichage ou la production de cartes, l'analyse des données pour créer de nouvelles informations
- L'acquisition des données, l'abstraction ou la représentation des éléments choisis et l'archivage

2.1.2. Le langage informatique Python

Python est un langage de programmation dit « interprété ». Cela signifie qu'à chaque exécution du script (l'ensemble ou une partie des instructions ou lignes de code), l'interpréteur, servant à traduire les lignes de code en langage machine ou binaire, analyse les lignes dans l'ordre d'apparition afin de signaler au développeur la présence d'une erreur de syntaxe (par exemple) et dans le cas contraire exécute la ligne. Ce langage est assez efficace dans le sens où sa communication avec d'autres langages tels que le C++ est facilitée, ce dernier permettant de construire des interfaces utilisateur très intuitives.

2.2. Méthode

Le développement de cette extension (plugin) s'est effectué en deux étapes explicitées ci-après.

2.2.1. Conception et implémentation de l'interface graphique

L'interface graphique est composée de trois parties principales et deux parties secondaires résumée sur la [figure 32](#).

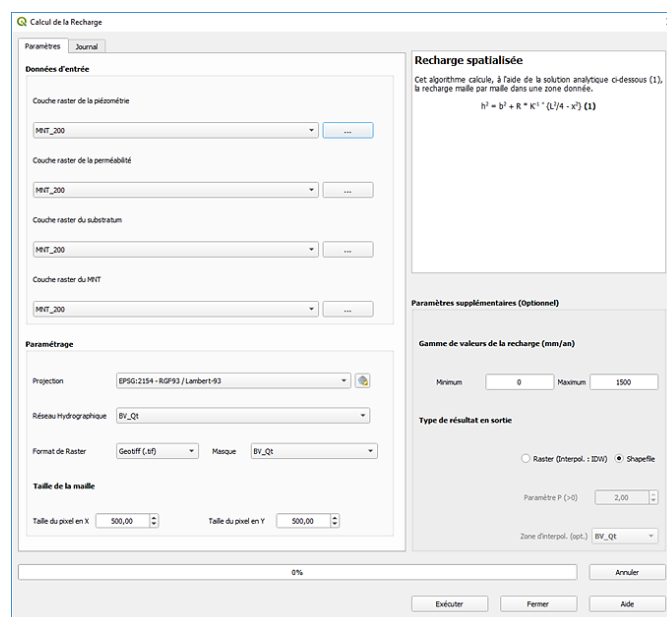


Figure 35 : Interface graphique du Plugin « MyRecharge »

✓ Parties principales

C'est dans la première que les données d'entrées sont renseignées. La suivante permet de paramétrer le maillage, la projection géographique du résultat en sortie puis renseigner deux autres données indispensables pour les calculs à savoir le réseau hydrographique et la limite du domaine de calcul. Enfin, la troisième partie donne la possibilité de contraindre les calculs en fournissant une gamme de valeurs de la recharge à calculer. C'est aussi dans cette partie que le type de fichier en sortie peut être formaté (par défaut le résultat est un fichier shapefile).

✓ Parties secondaires

Elles concernent le cadre informatif du plugin décrivant sa fonctionnalité et les boutons évènementiels (Exécuter, Fermer, Annuler, Aide) ainsi que la barre de progression des tâches.

2.2.2. Script de calcul de la recharge

Le script est constitué par trois classes jouant chacune un rôle bien défini. Ce sont les classes :

- « PreTraitement »

Cette classe contient toutes les instructions permettant de redimensionner les données d'entrée de type raster (perméabilité, carte piézométrique, substratum et MNT) et de limiter leur extension au domaine de calcul.

- « CalculDesDistances »

La classe « CalculDesDistances » a été définie pour calculer les paramètres de distance (x et $L/2$). Pour une maille de la zone de calcul, la distance minimale au cours d'eau est recherchée. Cette distance permet d'associer un point du cours d'eau à la maille. Pour résumer, le calcul des paramètres de géométrie commence par la construction d'une application g définie comme suit :

$$g : (x_0, y_0) \in D \rightarrow (x_1, y_1) \in R \text{ tq } d = \|(x_0, y_0) - (x_1, y_1)\| = \min(\|(x_0, y_0) - (x_k, y_k)\|)_{k \in I_R}$$

Une fois le point du cours d'eau identifié, la droite passant par les deux points est prolongée sur la limite du domaine de calcul. Sa longueur est égale à la distance $L/2$ et la différence entre $L/2$ et la distance d donne la distance x .

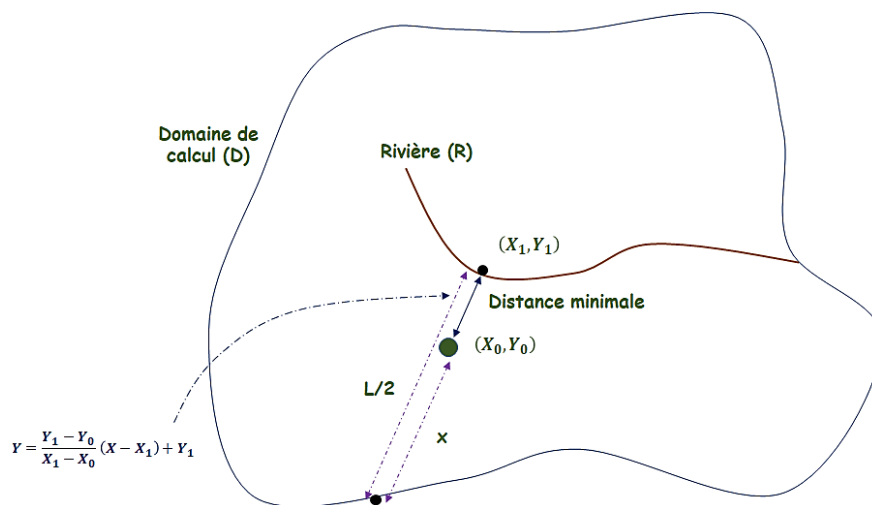


Figure 36 : Méthode de calcul des distances x et $L/2$

- « TousLesCalculsDeLaRecharge »

Cette classe a pour rôle de calculer maille par maille la recharge totale de l'aquifère à partir de l'équation de Boussinesq en tenant compte des éventuelles contraintes sur sa valeur. C'est aussi dans cette classe que le formatage du résultat est réalisé (Raster ou fichier Shapefile).

3. Application du plugin : cas de l'aquifère du quaternaire de la plaine du Roussillon

3.1. Choix du maillage optimal

Le choix des dimensions du maillage (carré $dx = dy$) est déterminant pour le résultat en sortie. Les données d'entrée n'ayant pas les mêmes résolutions, il est plus intuitif de choisir des dimensions de maille supérieures ou égales à la plus faible résolution parmi les cartes initialement fournies. Toutefois, une dimension supérieure à la plus faible résolution n'épargne pas la présence d'une dispersivité marquée des valeurs calculées, ce qui est couramment appelé l'effet de pépite en géostatistique. C'est la raison pour laquelle le calcul de la recharge doit se faire à plusieurs échelles sur un échantillon de données afin de choisir l'échelle optimale pour le calcul sur l'ensemble de la plaine, les variables de décision étant, dans l'ordre :

- La recharge moyenne et son écart-type

Si après les calculs, la recharge moyenne est inférieure ou égale à l'écart-type, cela signifie que les données sont marquées par une très grande variabilité. Produire une carte de recharge est dans ce cas impossible, du moins le résultat n'aura aucun sens physique. Dans le cas contraire, la seconde étape peut être exécutée.

- Le coefficient de variation après krigeage

L'interpolation par krigeage est l'un des moyens, sinon le moyen le plus efficace de réaliser une interpolation qui soit fidèle à un degré élevé aux données de départ. Après avoir réalisé le krigeage, il faut évaluer la moyenne, la médiane, l'écart-type et le coefficient de variation de la carte résultante. D'abord la recharge moyenne doit être supérieure à l'écart-type sinon l'on se retrouve dans la première variable de décision. Plus le coefficient de variation tend vers zéro et plus l'on tend vers la valeur optimale du maillage. Cependant, un compromis doit être fait entre l'optimisation de la dimension du maillage et la suffisance de données pour arriver à réaliser un krigeage.

Dans le cas de la plaine du Roussillon, le bassin versant de la Têt a été pris comme échantillon et le maillage optimal est un carré de **700 m** de côté, la donnée d'entrée la moins résolue étant de 200 m.

3.2. Durée de calcul

La durée de calcul Le temps de calcul dépend de quatre principaux paramètres : le domaine de calcul, les dimensions du maillage, la performance du processeur de l'ordinateur et le résultat en sortie (shapefile ou Raster). L'équation empirique suivante donne une idée du temps de calcul en minutes pour shapefile comme fichier de sortie :

$$t = \frac{4S}{(dx)^2} \times \frac{\varepsilon}{60}$$

Où S et dx représentent respectivement la surface du domaine de calcul (en m^2) et la dimension de la maille (m). ε est quant à lui, le temps moyen d'exécution d'une tâche. Cette variable dépend du processeur utilisé. Pour un processeur

Intel Core i5 (avec une mémoire RAM de 16 Go) $\varepsilon \approx 0.11$ seconde. Pour un processeur identique au précédent mais avec une mémoire RAM de 8 Go, il faudra multiplier le temps précédent par 5/4.

Si le résultat en sortie est un Raster, dans ce cas il faudra multiplier le temps de calcul par 5/4.

3.3. Cartes de recharge totale sur l'ensemble de la plaine

La *figure 37* représente la carte de recharge totale obtenue à l'aide du plugin. Les statistiques de la recharge sur le bassin du Réart (recharge moyenne, écart-type) sont satisfaisant mais la quantité trop faible de données ne permet pas d'obtenir une carte ayant un sens. Il en est de même pour celle du bassin du Tech.

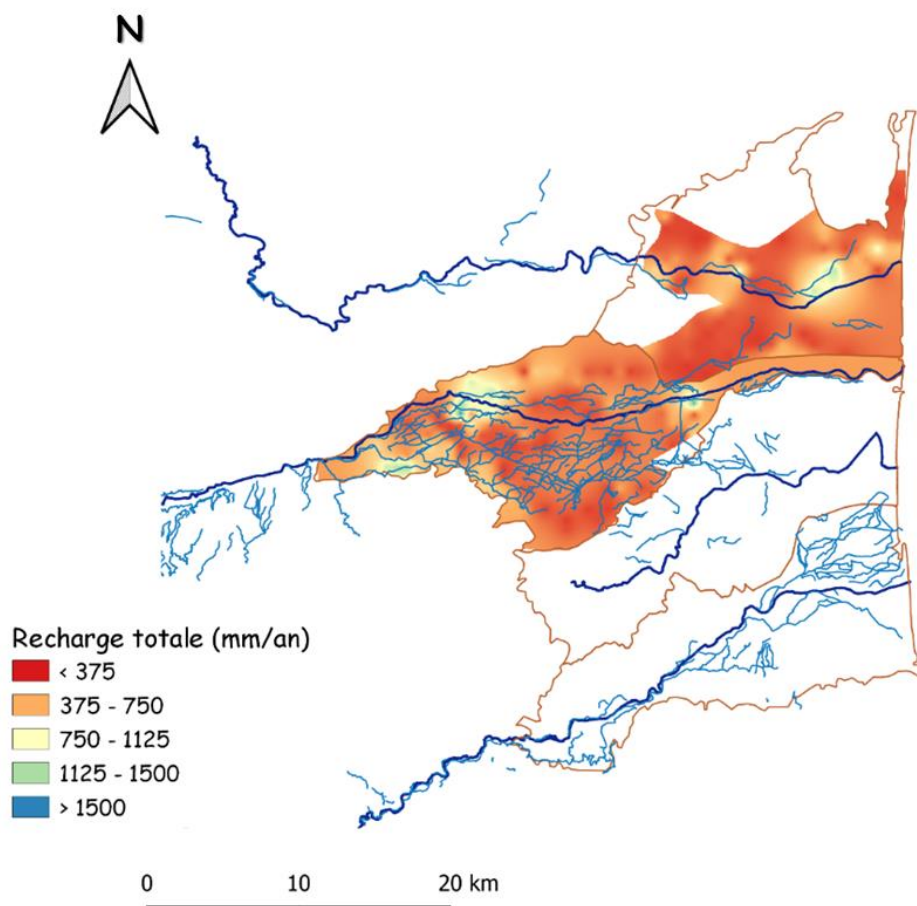


Figure 37 : Carte de la recharge Totale obtenu à l'aide du Plugin « MyRecharge », en bleu foncé (fleuves principaux) et en bleu clair (canaux d'irrigation)

La *figure 38* ci-dessous est le résultat du calcul du rapport entre la recharge totale (fournie par le Plugin) et la recharge par la pluie calculée à l'aide de l'IDPR. Seules les zones où le rapport est supérieur à 1.2 sont représentées.

Il est constaté que la vallée de la Têt a une recharge presque partout supérieure à la recharge par la pluie. Ce résultat n'est pas étonnant car la vallée est elle aussi presque partout parcourue par les canaux. Au niveau du bassin versant de l'Agly, les résultats sont similaires. Par ailleurs, il est possible de remarquer un ration très élevé au niveau de l'un des canaux (partie Nord-Est de l'Agly) d'environ 5. Il est très probable que l'aquifère y soit très transmissif ou que le canal n'y soit pas cuvelé. Enfin, les résultats confirment le rôle majeur des canaux dans la recharge de la nappe du quaternaire et plus généralement de celle du système quaternaire-pliocène.

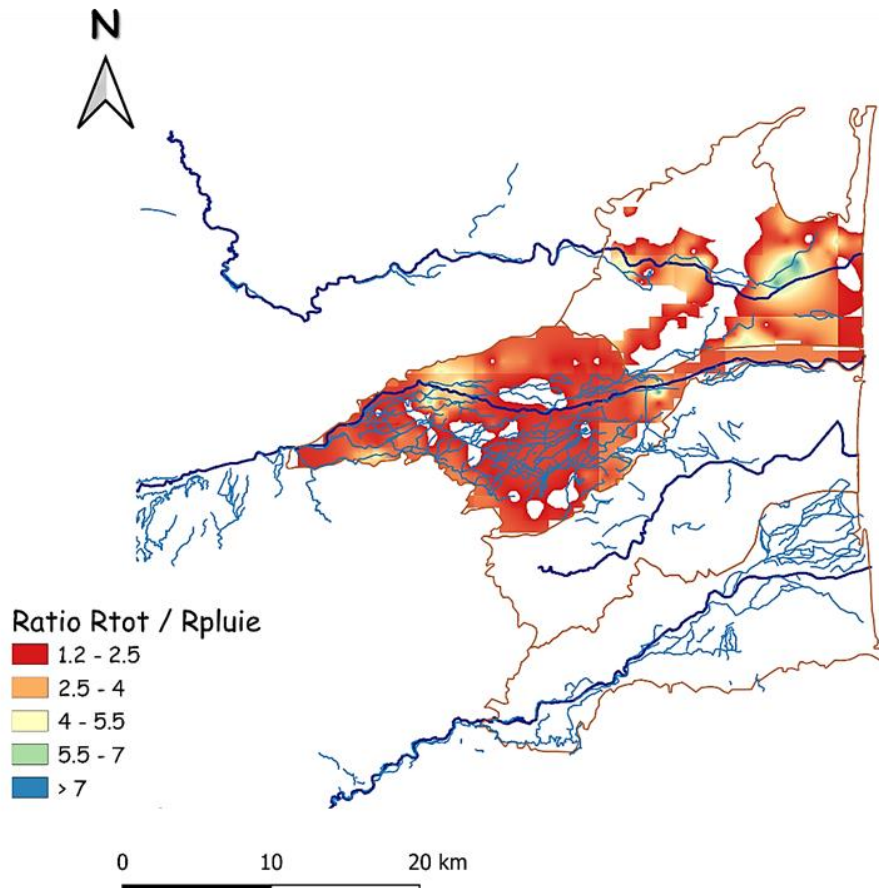


Figure 38 : Carte du ratio Recharge Totale / Recharge par la pluie

4. Conclusion partielle

Les contraintes sur les données ont limité l'application du plugin à toute la plaine du Roussillon. La recharge totale a été estimée sur l'aquifère du quaternaire uniquement sur les bassins de la Têt et de l'Agly. La soustraction de la recharge par la pluie à cette recharge totale estimée a permis d'identifier les zones influencées par les canaux d'irrigation. La superposition du tracé des canaux à ces zones confirme les résultats obtenus.

Conclusion

Trois objectifs ont composé ce travail à savoir la quantification des principaux paramètres hydrodynamiques du système aquifère plio-quaternaire et la recharge ainsi que les transferts entre les différents compartiments de l'hydrosystème puis la caractérisation des paramètres d'échanges nappe-rivière et de drainance à partir de la simulation numérique de l'expérimentation de recharge et enfin la quantification spatialement distribuée de la recharge d'un aquifère à surface libre. Ces trois objectifs ont été atteints.

Annexes

1. Mesures de l'expérimentation de la recharge artificielle

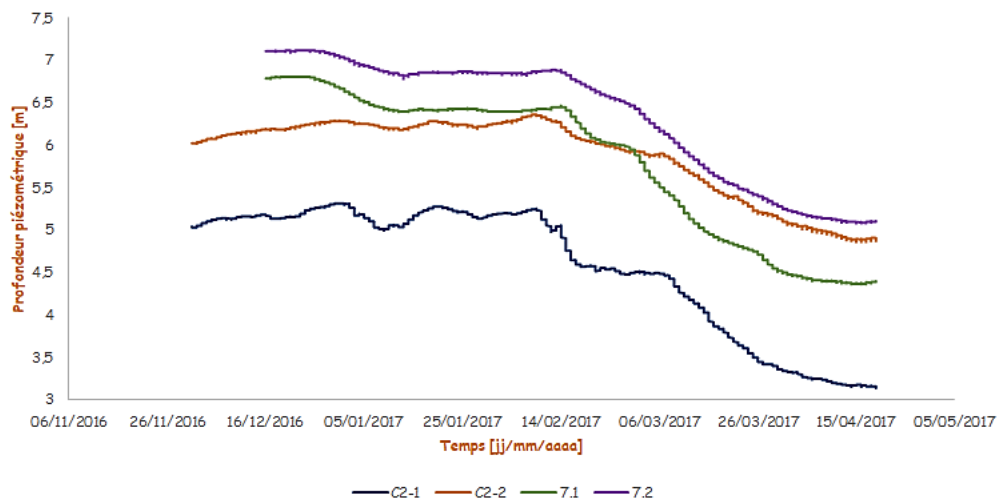


Figure 39 : Evolution de la profondeur piézométrique des ouvrages suivis en continu

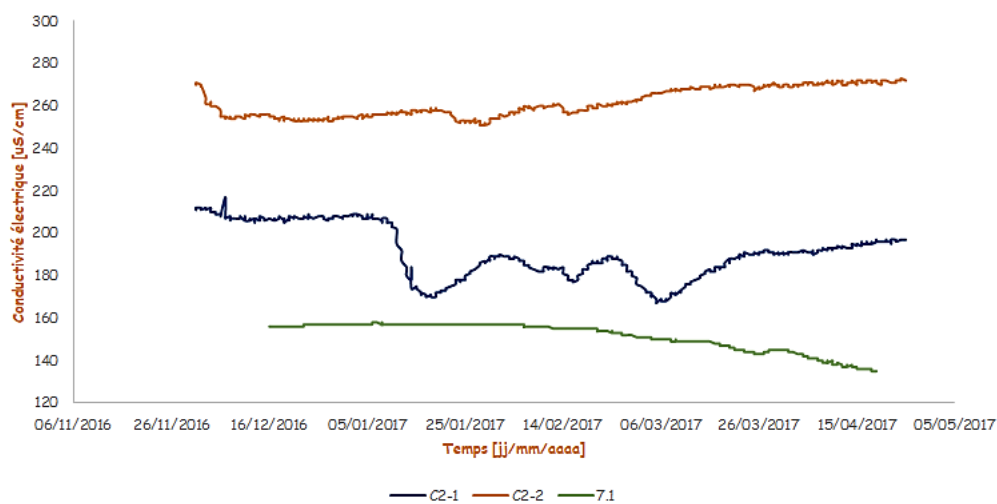


Figure 40 : Evolution de la conductivité électrique des ouvrages suivis en continu

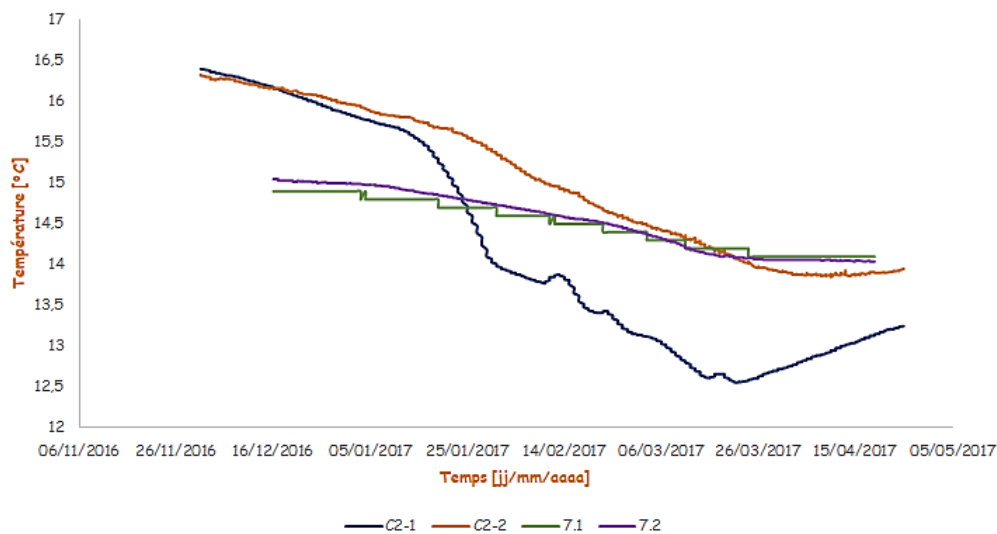


Figure 41 : Evolution de la température des ouvrages suivis en continu

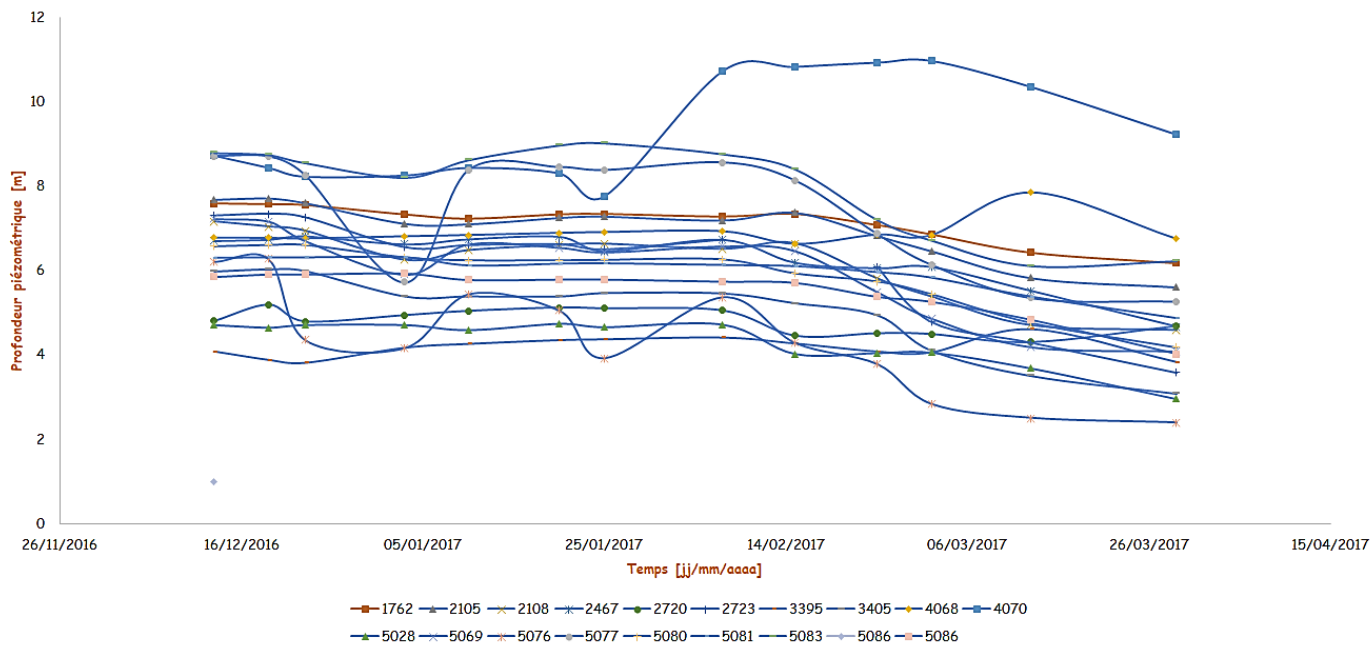


Figure 42 : Evolution de la profondeur piézométrique au niveau des ouvrages suivis manuellement

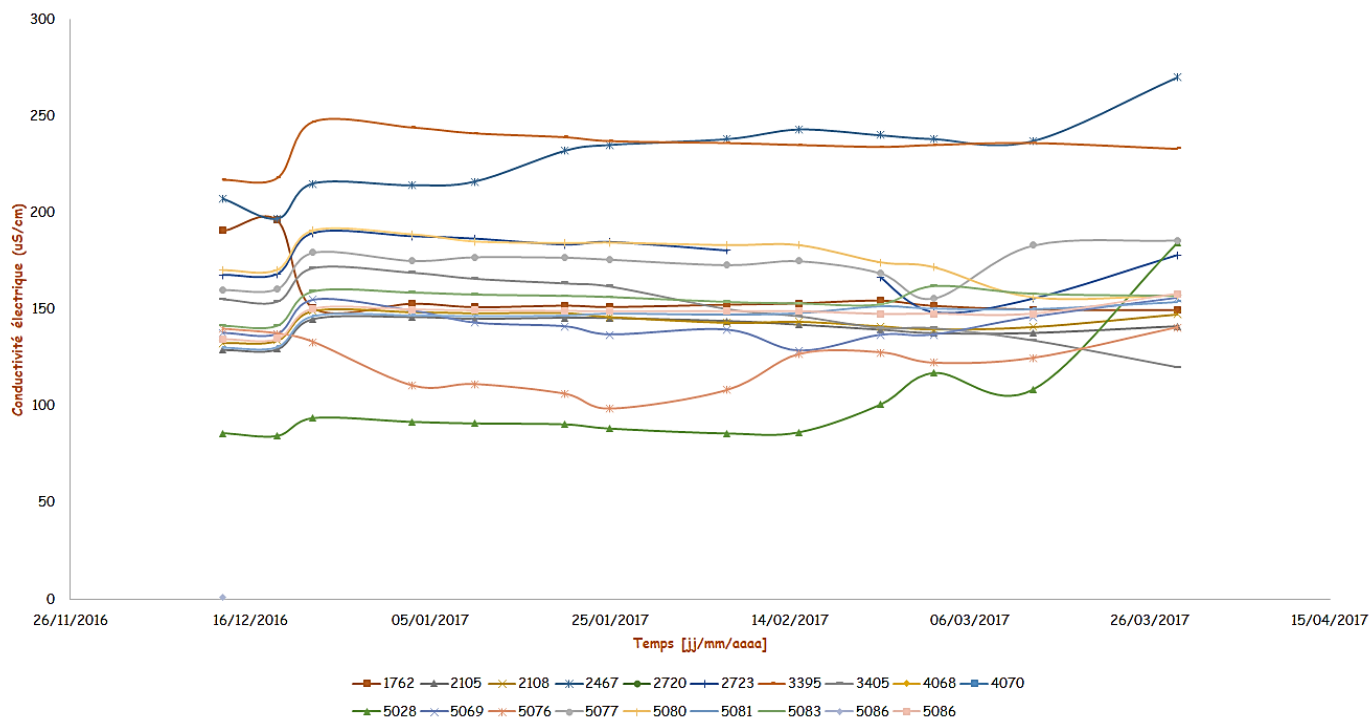


Figure 43 : Evolution de la conductivité électrique au niveau des ouvrages suivis manuellement

2. Chronique des recharge par la pluie et les canaux

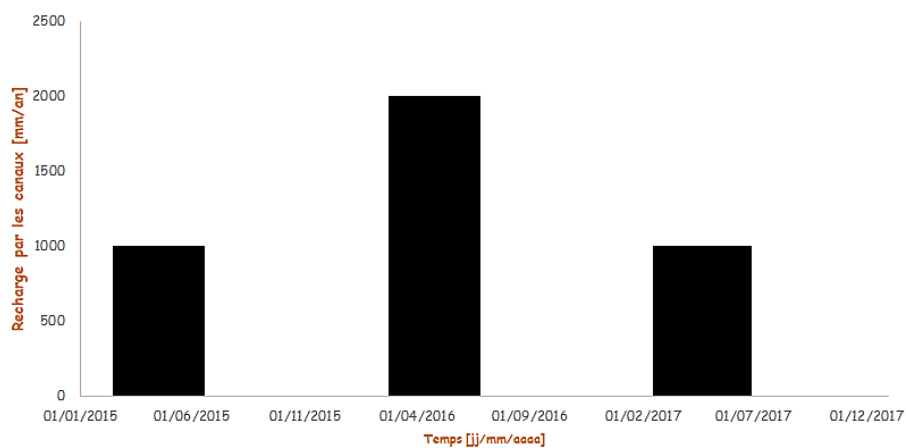


Figure 44 : Recharge par les canaux sur la période 01/01/2015 au 31/12/2017

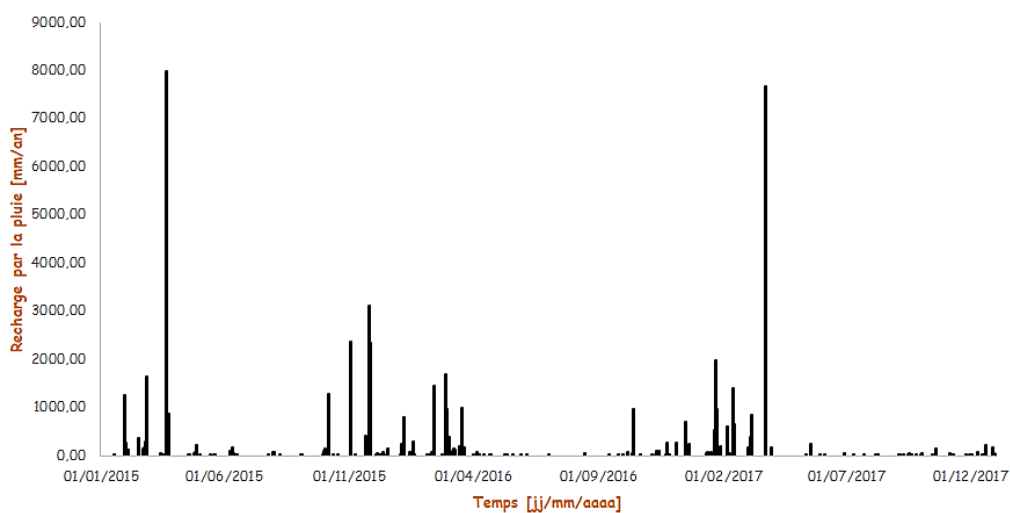


Figure 45 : Recharge par la pluie sur la période 01/01/2015 au 31/12/2017

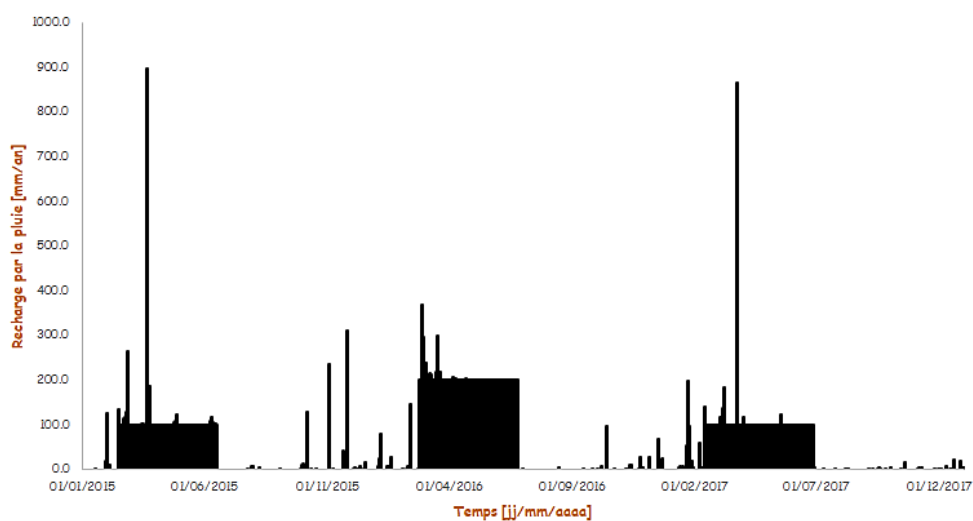


Figure 46 : Chronique de la recharge totale (somme de la recharge par la pluie et celle des canaux)

3. Cartes piézométriques et localisation des principaux canaux du bassin versant de la Têt

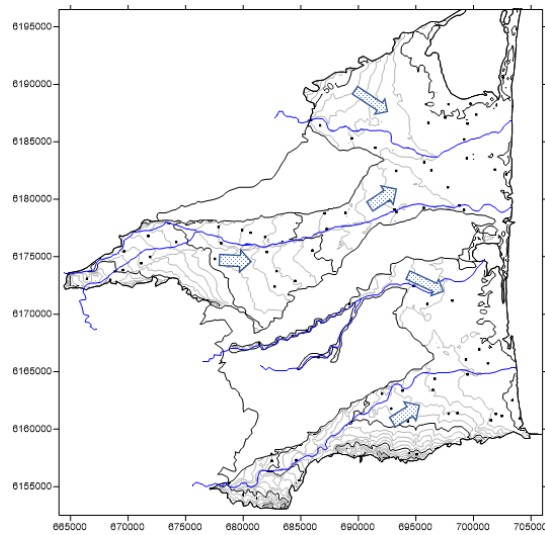


Figure 47 : Carte piézométrique du Quaternaire (Août 2012), les flèches indiquent le sens d'écoulement des eaux

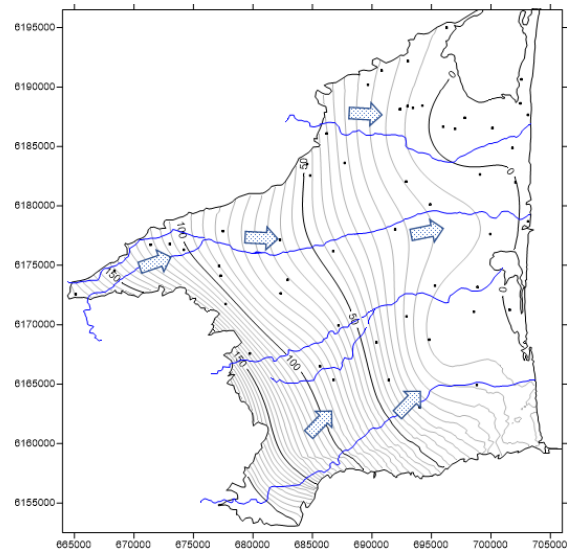


Figure 48 : Carte piézométrique du Pliocène (Août 2012), les flèches indiquent le sens d'écoulement des eaux

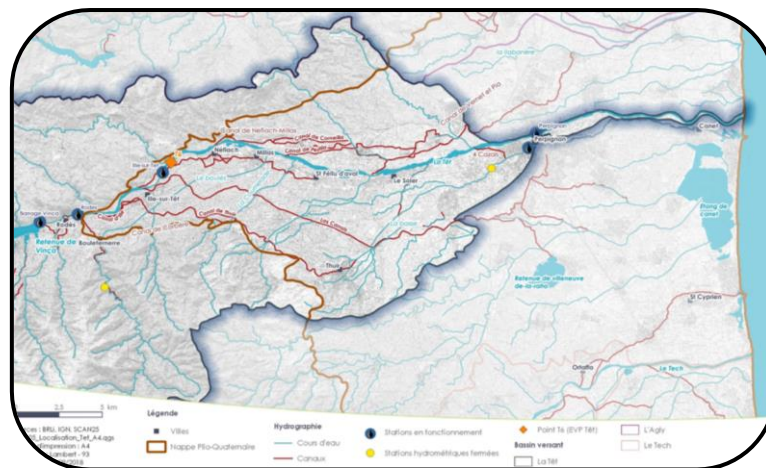


Figure 49 : Les principaux canaux du bassin versant de la Têt

✓ Estimation de la dispersivité longitudinale

Xu et Eckstein dans leur publication « Use of Weighted Least-Squares Method in Evaluation of the Relationship Between Dispersivity and Field Scale » proposent trois équations permettant de donner l'intervalle de valeurs contenant la dispersivité longitudinale. Ces équations sont les suivantes :

$$\alpha_L = 1.20 \times (\log_{10} L)^{2.958}$$

$$\alpha_L = 0.94 \times (\log_{10} L)^{2.693}$$

$$\alpha_L = 0.83 \times (\log_{10} L)^{2.414}$$

Où α_L est la dispersivité longitudinale en mètre et L la distance entre le point d'injection et le point de récupération du traceur, exprimé en mètre.

Bibliographie et webographie

- [1] CHABART M. – 1995. La recharge de l'aquifère multicouche du Roussillon et les conséquences d'un éventuel changement climatique sur la gestion de la ressource en eau (Pyrénées-Orientales), Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris) - Éditions BRGM, 1996 - 449 pages.
- [2] Syndicat Mixte pour la protection et la gestion des nappes souterraines de la Plaine du Roussillon – 2017. Etude hydrogéologique d'essai de recharge artificielle de nappe dans la vallée de la Têt
- [3] Dossier d'autorisation pour l'essai de recharge artificielle de nappe d'eau souterraine par infiltration d'eau dans le Boulès, sur la commune d'Ille sur Têt.
- [4] Compte rendu de réunion – 2018. BRGM/D3E/NRE/YC/2018/095
- [5] Site officiel du BRGM – 2019. www.brgm.com
- [6] Y. Barthélemy, JJ Seguin, BRGM - 2016. Modélisation maillée des écoulements souterrains Principes, démarche et recommandations
- [7] Site officiel du SIGES Seine-Normandie – 2019. www.sigessn.brgm.fr/
- [8] Rapport L11 - Rapport de campagne de mesure sur la Têt et conclusion sur les flux de surfaces et souterrains
- [9] Rapport sur l'évaluation des externalités et services associés à l'irrigation gravitaire
- [10] Rapport L9 - Rapport sur l'analyse détaillée de l'usage irrigation