



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
École Nationale Supérieure de Géologie,
Université de Lorraine

Daouda MEITE

Troisième Année
Option Gestion des Ressources en Eaux et Environnement (GR2E)

Maitre de stage : Yvan CABALLERO

RAPPORT DE STAGE 3A

CARACTERISATION ET MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE PLIO-QUATERNAIRE DE LA PLAINE DU ROUSSILLON



Adresse : 1039 Rue de Pinville, 34000 Montpellier
Contact : 04 67 15 79 80

Ecole Nationale Supérieure de Géologie
2 Rue du Doyen Marcel Roubault
TSA 70605
54518 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX
Tel : 03 83 59 64 15 – Fax : 03 83 59 64 64
ensg-contact@univ-lorraine.fr
www.ensg.univ-lorraine.fr
MEITHE DAOUDA, (ENSG – GR2E)



NOTICE ANALYTIQUE

Titre du document :	Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon
Cadre et nature du travail :	Rapport de stage de fin d'études 3A
Dates de début et de fin :	13 Mars 2018 au 07 Septembre 2018
Date de publication :	07 Septembre 2018
Auteur :	Daouda MEITE
Encadrants :	Yvan CABALLERO: Hydrogéologue au BRGM, Maître de stage Bernard LADOUCHE: Hydrogéologue et Hydrogéochimiste au BRGM Benoit DEWANDEL: Hydrogéologue au BRGM Lanini SANDRA : Modélisatrice au BRGM
Résumé :	<p>La gestion des ressources en eaux dans le bassin de la plaine du Roussillon nécessite une connaissance adéquate du fonctionnement de son système aquifère multicouches. Pour répondre à cette problématique, le projet Dem'Eaux Roussillon a été mis en place et a fait l'objet de plusieurs travaux dont ce stage. Les objectifs visés par ce stage sont de contribuer à la consolidation de la base de données du projet, valoriser ces données et diagnostiquer le modèle numérique existant.</p> <p>Ainsi, la compilation et la valorisation des données hydrodynamiques a permis d'actualiser les cartes de flux aux limites de l'aquifères. Celles-ci montrent qu'en amont, l'aquifère est drainé par les cours d'eaux et à l'inverse, celui-ci draine les cours d'eaux en aval. En revanche, aux niveau des bordures, les flux sont plutôt orientés vers l'aquifère dans sa partie amont, mais en aval ils sont orientés vers la mer. Par ailleurs, le diagnostic du modèle, tout en conservant sa même architecture que celle des années 90 a montré qu'il ne permet pas de reproduire la piézométrie simulée en 1995 et celle observée sauf dans le bassin de Canterrane où la plupart des expériences ont été faites et où le calage a été bien effectué. De plus, en modifiant juste certains paramètres de forçage extérieur tel que la recharge, les coefficients d'infiltration, on s'aperçoit de nouveau que le modèle n'arrive pas à reproduit les valeurs observées en termes d'ordres de grandeurs et de variations saisonnières. Ceci est sans doute lié à la considération des prélèvements qui sont restés constants dans le modèle sur la période de simulation. On pourrait aussi souligner le mode de définition de la géométrie des couches qui ne prend pas en compte la variabilité spatiale de la lithologie au sein des couches et aussi la représentation inadéquate en pseudo-3D des épontes qui séparent les différentes couches. De ce fait, en état des connaissances actuelles de la plaine, plusieurs paramètres pourront être améliorés lors des futurs travaux de modélisation de l'aquifère.</p>
Motsclés :	Dem'Eaux Roussillon ; Aquifère ; Pliocène ; Quaternaire ; Piézométrie, Modélisation numérique ; Simulation
Nbre de pages :	36
Annexe :	3

ABSTRACT

The management of water resources in the plain of Roussillon requires an adequate knowledge of the functioning of its multilayer aquifer system. To answer this problem, the project titled Dem'Eaux Roussillon has been set up and has been the subject of several works, including this internship. The purposes of this internship are to contribute to the consolidation of the project database, to valorize these data and to diagnose the existing digital model.

Thus, the compilation and the valorization of the hydrodynamic data made it possible to update the flux maps at the limits of the aquifers. These show that upstream, the aquifer is drained by rivers and conversely, it drains downstream these rivers. On the other hand, at the near the borders, the flows are rather directed towards the aquifer in its upstream area, but downstream they are oriented towards the sea. Moreover, the diagnosis of the model, while preserving its same architecture as that of the years 90 has shown that it does not reproduce the simulated piezometry in 1995 and that observed except in the Canterrane Basin where most of the experiments were done and calibration was well done. In addition, by modifying just some external forcing parameters such as recharge, infiltration ratio, it is again shown that the model does not reproduce the observed values of the piezometry in terms of the magnitude orders and seasonal variations. This is probably related to the consideration of water abstractions that have remained constant in the model over the simulation period. We could also underline the the geometry of the layers which does not take into account the spatial variability of the lithology within the layers and also the inadequate representation in pseudo-3D of the clays which separate the different aquifer layers. As a result, in the current state of knowledge of the plain, several parameters can be improved during future modeling work on the aquifer.

REMERCIEMENTS

Ce stage n'aurait pu se réaliser sans la contribution de nombreuses personnes qui ont bien voulu mettre leur expérience à profit.

Merci, un vocable si petit de taille et pourtant profond en sens, exprime la reconnaissance à l'endroit de quelqu'un pour un service dont on a pu bénéficier. C'est donc à travers ce concept qu'il m'est agréable d'adresser mes sincères salutations à M. Jean Marc MONTEL, ex-Directeur de l'ENSG pour avoir approuvé mon admission dans cette école.

Je tiens aussi à remercier mes responsables de formation M. Oltéan CONSTANTIN et M. Fabrice GOLFIER, pour les efforts qu'ils ne cessent de mettre en œuvre pour une bonne formation des étudiants.

De plus, en m'adressant aux membres de l'entreprise, mes salutations vont tout d'abord à l'endroit de Mme Ariane BLUM, Directrice de l'agence du BRGM à Montpellier pour m'avoir permis d'effectuer mon stage de projet de fin d'études au sein de sa structure.

Je remercie mon maître de stage M. Yvan CABALLERO, hydrogéologue au BRGM, pour son encadrement et ses conseils prodigués pendant ce stage. Je le remercie également pour sa disponibilité à me fournir les éléments nécessaires à la rédaction du présent rapport de stage.

Je tiens tout particulièrement à remercier Mme Lanini SANDRA, modélisatrice au BRGM, pour son encadrement, ses conseils et son expertise apportés durant la phase de la modélisation numérique de l'aquifère. Grâce à elle, j'ai appris à utiliser les logiciels MARTHE et ESPERE dans le cadre de mon travail.

Mes salutations vont également à l'endroit de M. Benoit DEWANDEL, hydrogéologue au BRGM, pour son encadrement et son expertise apportés durant la phase d'interprétation des essais de pompage et d'actualisation des cartes des données hydrodynamiques. Grâce à lui, j'ai appris à utiliser le logiciel OUAIP dans le cadre de mon travail.

Aussi, je remercie M. Bernard LADOUCHE hydrogéologue et hydrogéochimiste, pour son encadrement technique, pendant les travaux de consolidation de la base de données du projet Dem'Eaux Roussillon. Grâce à lui, j'ai appris à utiliser certaines fonctionnalités du tableur Excel.

Je ne saurais terminer sans toutefois adresser mes gratitude à toute l'équipe du BRGM que leurs noms figurent ou pas dans ce rapport, pour leur courtoisie et l'accueil chaleureux dont j'ai bénéficié et aussi pour leur contribution à la réalisation de ce stage.

TABLE DES MATIERES

NOTICE ANALYTIQUE	I
ABSTRACT	II
REMERCIEMENTS	III
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	VIII
PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL	IX
1. Raison sociale et fonctionnement.....	IX
2. Fonctionnement de l'entreprise	IX
INTRODUCTION	1
CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE	1
MISSIONS ET OBJECTIFS DU STAGE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE	2
I. Présentation de la zone d'étude	2
1. Géologie et géodynamique.....	2
2. Hydrologie.....	2
3. Hydrogéologie : types d'aquifères	2
3.1. Pliocène.....	3
3.2. Quaternaire	3
II. Présentation du modèle numérique existant.....	4
1. Définition des sous-systèmes	4
2. Définition du maillage	5
3. Définition de la géométrie du modèle	5
4. Définition des limites et conditions aux limites du système aquifère	5
5. Perméabilités et coefficients d'emménagement.....	6
6. Pas de temps de la simulation	6
Chapitre II : MATERIEL ET METHODES	7
I. Compilation de la base de données du projet Dem'Eaux Roussillon.....	7
1. Consolidation de la base de données.....	7
2. Analyse des données géochimiques.....	8
II. Interprétation des essais de pompage.....	8
1. Préparation des fichiers de données.....	9
2. Interprétation des essais de pompage avec le logiciel OUAIP	9
2.1. La solution de Theis	10
2.2. Détermination de la transmissivité T et du coefficient d'emménagement S	10

III.	Actualisation des flux aux limites de l'aquifère et évaluation des bilans hydriques.....	11
IV.	Modélisation de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon.....	13
1.	Présentation du logiciel MARTHE.....	13
2.	Diagnostic du modèle existant sur la période 1989 – 1995.....	13
3.	Diagnostic du modèle existant sur la période 1959 – 2013.....	14
3.1.	Détermination des coefficients d'infiltration.....	15
3.2.	Calcul de la pluie efficace.....	17
3.3.	Calcul de la recharge.....	18
3.4.	Simulation sur la période 1959 – 2013.....	18
Chapitre III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS		19
I.	Compilation de la base de données du projet.....	19
II.	Actualisation des cartes de Transmissivités et de flux.....	19
1.	Actualisation des cartes de Transmissivités.....	19
2.	Actualisation des cartes de flux aux limites du système aquifère.....	20
2.1.	Carte des flux au niveau des cours d'eaux.....	20
2.2.	Carte des flux au niveau des bordures.....	22
2.3.	Bilan hydrique aux années 1961 et 2012.....	23
III.	Résultats du diagnostic du modèle.....	24
1.	Résultats de la simulation sur la période 1989 – 1995.....	24
1.1.	Evolution des niveaux piézométriques en fonction du temps.....	24
1.2.	Spatialisation de la qualité des simulations.....	27
2.	Résultats du diagnostic sur la période 1959 – 2013.....	27
2.1.	Initialisation des charges hydrauliques.....	27
2.2.	Choix de la période de comparaison.....	29
2.3.	Comparaison des niveaux piézométriques simulés et observés avant calage.....	29
2.4.	Bilans hydriques aux années 1961 et 2012 en condition de basses eaux.....	32
2.5.	Comparaison des cartes piézométriques du Pliocène des années 90.....	32
DISCUSSIONS		34
CONCLUSION		36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		A
WEBOGRAPHIE		B
ANNEXES		C
ANNEXE 1 : CONCEPTION DU MODELE		D
1.	Valeurs des paramètres hydrodynamiques.....	D
2.	Cartes des paramètres hydrodynamiques.....	E

2.1. Cartes des perméabilités en 10^{-4} m/s	E
2.2. Carte des coefficients d'emmagasinement (10^{-3} m ² /s).....	F
2.3. Cartes de débits de prélèvements (Mm ³ /an).....	H
ANNEXE 2 : METHODES DE CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE.....	J
1. Méthode de Thornthwaite	J
2. Méthode de Dingman-Hamon	K
3. Méthode de Dingman-Penman	L
ANNEXE 3 : COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE 10972X0075.....	M

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme général du BRGM	X
Figure 2 : Présentation de la plaine du Roussillon (Aunay, 2007)	3
Figure 3 : Structure verticale de la plaine du Roussillon (Aunay, 2007)	4
Figure 4 : Représentation du maillage du modèle.....	5
Figure 5 : Schéma explicatif de la procédure de compilation de la base de données Dem'Eaux Roussillon	8
Figure 6 : Schéma explicatif de la configuration de la solution de Theis (BRGM, 2018).....	10
Figure 7 : Représentation des points expérimentaux et la courbe théorique pour la détermination de la transmissivité T et du coefficient d'emmagasinement S.....	11
Figure 8 : Cartes piézométriques de base pour le calcul des flux aux limites de l'aquifère (réalisées par le BRGM)	12
Figure 9 : Localisation des points à historiques.....	14
Figure 10 : Présentation des différentes zones de coefficients d'infiltration	16
Figure 11 : Présentation des différentes zones de coefficients d'infiltration retenues.....	16
Figure 12 : A : Carte des mailles safran prises en compte pour le calcul de la pluie efficace ; B : Carte des réserves utiles	18
Figure 13 : Positionnement des nouveaux points (B) par rapport aux anciens (A)	19
Figure 14 : Cartes de transmissivités actualisées	20
Figure 15 : Représentation des sens de flux aux limites de cours d'eaux en 1961 et en 2012 (Quaternaire et Pliocène).....	21
Figure 16 : Représentation des sens de flux aux bordures des aquifères en 1961 et en 2012	22
Figure 17 : Représentation de l'évolution des flux entrants et sortants aux limites de l'aquifère	24
Figure 18 : Résultats du diagnostic pour le piézomètre 10972X0137	25
Figure 19 : Résultats du diagnostic pour le piézomètre 10963X0059	26
Figure 20 : Résultats du diagnostic pour le piézomètre 10912X0110	26
Figure 21 : Localisation des piézomètres de comparaison des simulations et observations.....	27
Figure 22 : Cartes de charges hydrauliques initiales (1961) des trois couches	28
Figure 23 : Représentation des longueurs des périodes d'observation des piézomètres	29
Figure 24 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10972X0003	29
Figure 25 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10906X0039	30
Figure 26 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10912X0111	30
Figure 27 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10912X0110	31
Figure 28 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10972X0137	31
Figure 29 : Comparaison des cartes piézométriques observée et simulée du Pliocène en 1990	33
Figure 30 : Observation d'une alternance de niveaux sableux et argileux dans un forage réalisé à Saint-Cyprien	35
Figure 31 : : Comparaison des tendances d'évolution des simulations et observations	35
Figure 32 : Carte des perméabilités dans l'aquifère du Quaternaire.....	E
Figure 33 : Carte des perméabilités dans l'aquifère du Pliocène de la Salanque.....	E
Figure 34 : Carte des perméabilités dans l'aquifère du Pliocène profond	F
Figure 35 : Carte des coefficients d'emmagasinement dans l'aquifère du Quaternaire	F
Figure 36 : Carte des coefficients d'emmagasinement dans l'aquifère du Pliocène de la Salanque	G
Figure 37 : Carte des coefficients d'emmagasinement dans l'aquifère du Pliocène profond	G
Figure 38 : Carte des prélèvements dans l'aquifère du Quaternaire	H

Figure 39 : Cartes de prélèvements dans l'aquifère du Pliocène de la Salanque.....	H
Figure 40 : Carte de prélèvement dans l'aquifère du Pliocène profond	I
Figure 41 : Schéma de calcul de la pluie efficace par la méthode de Thornthwaite	J
Figure 42 : Schéma de calcul de la pluie efficace par la méthode de Dingman-Hamon.....	K
Figure 43 : Schéma de calcul de la pluie efficace par la méthode de Dingman-Penman	L
Figure 44 : Coupe technique d'un ouvrage réalisé à Saint-Cyprien (10972X0075)	M

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Récapitulatif du maillage du modèle	5
Tableau 2 : Synthèse des solutions analytiques disponibles dans OUAIP.....	9
Tableau 3 : Liste des points à historiques considérés pour le diagnostic	14
Tableau 4 : Détails sur les flux entrants et sortants de l'aquifère Plio-Quaternaire	23
Tableau 5 : Récapitulatif du calcul des flux aux limites de l'aquifère	24
Tableau 6 : Récapitulatif du bilan hydrique à partir du logiciel MARTHE	32
Tableau 7 : Récapitulatif des valeurs des coefficients de perméabilité.....	D

PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

1. Raison sociale et fonctionnement

Le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) est le service géologique national français créé en 1959. Cet établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) certifié ISO 9001 (Qualité) depuis 2004 et ISO 14001 (Environnement) depuis 2012, est placé sous la tutelle du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'innovation, du ministère de la Transition écologique et solidaire, et du ministère de l'Economie, et possède des laboratoires certifiés par le COFRAC (BRGM, 2018).

Avec à sa tête Madame Michèle ROUSSEAU depuis le 22 Mars 2017, le BRGM emploie plus de 1000 employés dont 700 chercheurs et ingénieurs dans ses 25 implantations en France métropolitaine et en Outremer, œuvrant tous dans le but de **comprendre** les phénomènes géologiques et les risques associés, de **développer** des méthodologies et des techniques nouvelles, de **produire et diffuser** des données et de **mettre à disposition** les outils nécessaires à la gestion du sol, du sous-sol et des ressources, à la prévention des risques et des pollutions, aux politiques de réponses au changement climatique (BRGM, 2018).

Ses activités s'articulent en 10 grands domaines de géosciences et sont organisées selon ses grandes missions suivantes : la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques, la coopération internationale, la sécurité minière et la formation (BRGM, 2018).

2. Fonctionnement de l'entreprise

Les 12 directions du BRGM assurent la gestion et l'organisation de 31 services implantés dans vingt-deux régions françaises métropolitaines, ainsi que dans les cinq DOM-COM et la Nouvelle Calédonie. Les services géologiques régionaux (SGR) sont composés de plusieurs unités composées d'ingénieurs et de techniciens qui travaillent sur des projets régionaux à intérêts publics ou privés, et financés par les acteurs concernés (BRGM, 2018).

Mon stage s'est déroulé à la direction régionale Occitanie basée à Montpellier et dirigée par Madame Ariane BLUM, Directrice régionale. Je suis intervenu précisément dans la direction Eaux, Environnement et Ecotechnologies (D3E) précisément dans le service Nouvelles Ressources en Eaux et Economie (NREE) repéré par le cadre rouge sur l'organigramme (Figure 1).

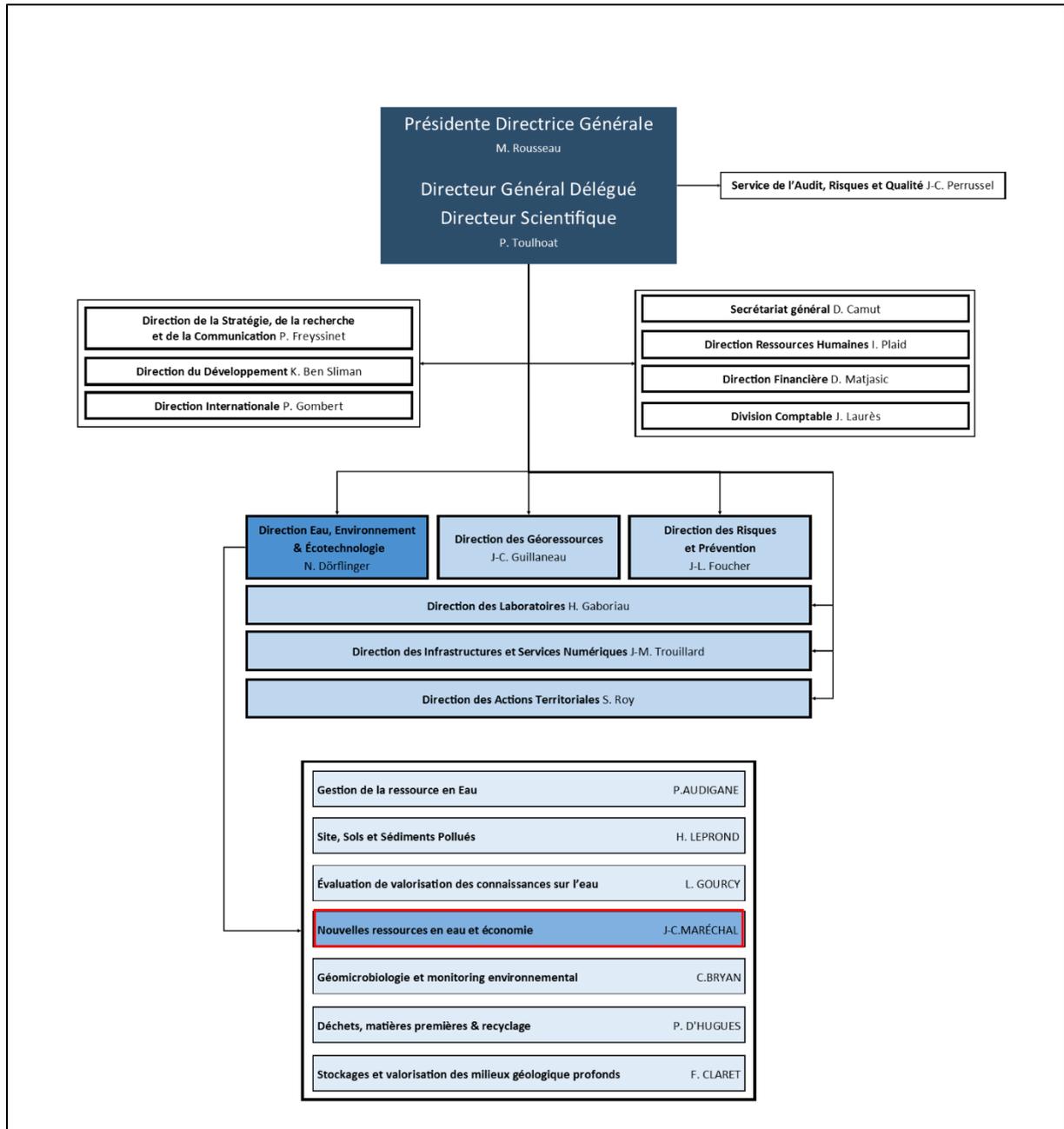


Figure 1 : Organigramme général du BRGM

INTRODUCTION

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

« *Les eaux souterraines s'épuisent en de nombreux endroits, privant les générations futures et actuelles de réserves qui permettraient de résister à la variabilité accrue du climat.* » (Huffman, 2014). Cette phrase, au lieu d'être une simple citation, doit au contraire constituer un éveil à la conscience des populations à une bonne gestion des ressources en eaux. Cependant, en considérant la partie souterraine de ces ressources en eaux, l'on ne peut aborder le terme « **gestion des ressources en eaux** » sans toutefois s'intéresser à une meilleure compréhension du système des aquifères (environnement physique ou chimique dans lequel elles se trouvent) et les différentes interactions que celles-ci ont avec leurs milieux extérieurs.

Ainsi, dans un contexte d'aquifère côtier tel que la plaine du Roussillon (aquifère multicouches constitué de dépôts de sable du Quaternaire et d'alternance de niveaux sableux et argileux du Pliocène), cette gestion s'avère complexe. En effet, du fait de sa situation géographique favorable au tourisme, la plaine du Roussillon enregistre une croissance de sa population de façon considérable. Cette croissance de la population a pour conséquence une augmentation importante des prélèvements au sein des ressources hydriques à l'échelle de la plaine, pouvant atteindre 80 millions m³ par an tout usage confondu (HYDRIAD, 2013). Aussi, de nombreuses activités telle que l'agriculture par irrigation y sont pratiquées, favorisant ainsi une infiltration des eaux superficielles dans le Quaternaire. Par ailleurs, il a été mis en évidence une circulation interne entre les différents niveaux d'aquifères (l'aquifère profond du Pliocène dont les eaux sont supposées être de bonne qualité et l'aquifère superficiel du Quaternaire dont la qualité des eaux est supposée moins élevée). Ainsi, l'on s'interroge sur l'importance de l'alimentation de la nappe du Pliocène par celle du Quaternaire étant donné qu'à certains endroits de la nappe profonde, la qualité de l'eau est plus ou moins altérée. De plus, du fait de sa proximité de la mer méditerranéenne, l'exploitation massive de la ressource d'eau profonde entraîne d'une part un déséquilibre entre les nappes et donc une augmentation du gradient hydraulique entre les deux niveaux d'aquifères et d'autre part un risque d'intrusion d'eau saline dans l'aquifère du Quaternaire, mais aussi du Pliocène.

Tous ces aspects susmentionnés rendent cet aquifère vulnérable d'une part, du point de vue de sa capacité à se renouveler chaque année et d'autre part, vis-à-vis de la dégradation de sa qualité physicochimique. Le projet « Projet Dem'Eaux Roussillon » vise ainsi à décrire au mieux et à bien caractériser les différents aquifères de la plaine du Roussillon, afin de mieux gérer cette ressource à court et à long termes tout en sachant les niveaux de difficulté suivants : environnement très complexe et manque d'informations suffisantes.

MISSIONS ET OBJECTIFS DU STAGE

Les objectifs visés par ce travail sont :

- Compiler et homogénéiser toutes les bases de données disponibles sur l'ensemble de la plaine auprès des différents acteurs du projet afin d'en constituer une seule. Cette compilation permettra d'actualiser les cartes des différents paramètres (chimiques et hydrodynamiques) déjà réalisées.
- Diagnostiquer le modèle numérique existant à partir de la simulation des niveaux piézométriques sur une courte et longue période.

Les résultats de cette étude sont synthétisés dans ce rapport axé sur trois chapitres. Le premier traite de l'état de l'art sur la zone d'étude. Le second met en évidence le matériel et les méthodes utilisées pour réaliser les différentes tâches. Le troisième chapitre est réservé aux résultats et leurs interprétations.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

Ce chapitre a pour objectif de dresser d'abord un état de l'art des connaissances géologiques et hydrogéologiques de la plaine du Roussillon puis, faire un rappel sur le modèle existant.

I. Présentation de la zone d'étude

Située au sud de la France plus précisément dans la région Occitanie entre 42°27' et 42°57' de la latitude Nord et entre 2°30' et 3°06' de la longitude Est, la plaine du Roussillon regorge des atouts sur le plan socioéconomique, culturel et ressources naturelles. La présentation de la zone d'étude sera basée sur les aspects géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques de la plaine.

1. Géologie et géodynamique

L'histoire du bassin du Roussillon a débuté au cours de la distension Oligocène qui a résulté des mouvements tectoniques relatifs aux plaques Afrique et Europe à la fin de l'Eocène. Il s'est ainsi mis en place des grabens subsidants, générant de nombreux bassins, en particulier celui du Roussillon. Ce bassin sédimentaire est formé par un remplissage néogène à partir des produits d'érosion de la chaîne Pyrénéenne. Ce bassin de type graben est traversé par des accidents majeurs tels que la faille Nord pyrénéenne et la faille de la Têt à l'Ouest et la faille des Albères au Sud. Par ailleurs, on retrouve au Nord le massif des Corbières, formé des calcaires du Crétacé-Jurassique. Au Sud-Ouest et à l'Ouest, on retrouve les granites, les gneiss, les micaschistes du socle hercynien. Au Sud-Est et à l'Ouest, on trouve les schistes et flyschs Paléozoïques. Sur l'ensemble des formations qui entourent le bassin, seuls les calcaires karstifiés des Corbières présentent un intérêt hydrogéologique clairement identifié pour la recharge en eau douce de la plaine du Roussillon (Chabart, 1995).

2. Hydrologie

La plaine est traversée par quatre fleuves principaux d'une direction générale Ouest-Est : l'Agly (76 km), la Têt (120 km), le Réart (36 km) et le Tech (82 km). Ces fleuves prennent pour la plupart leur origine dans les corbières (l'Agly), dans le massif de Canigou (le Tech), dans le massif du Carlit (La Têt) et sont caractérisés par des écoulements pérennes à l'exception du Réart qui prend sa source des collines des Aspres (Aunay, 2007).

3. Hydrogéologie : types d'aquifères

La plaine du Roussillon est le siège d'écoulements souterrains au sein de plusieurs aquifères (Aunay, 2007). Des études qui ont portées sur la plaine ont permis de classer les grands ensembles du remplissage du bassin du Roussillon (Duvail et al., 2001). On retrouve une unité géologique Quaternaire composée de terrasses fluviales pléistocènes et de dépôts modernes holocènes, reposant sur deux unités géologiques nommées Pliocène continental et Pliocène marin. Cet ensemble Plio-Quaternaire repose en discordance sur diverses formations d'âge miocène, synchrones à la formation du bassin d'effondrement du Roussillon c'est-à-dire à l'ouverture de la Méditerranée (Aunay, 2007).

3.1. Pliocène

Les sédiments du Pliocène affleurent au Nord de la plaine entre Rivesaltes et Ille-sur-Têt et sur la majeure partie centrale de la plaine sur environ 200 km² entre la vallée de la Têt et celle du Tech. Ces sédiments constitués de dépôts sableux (sables fins et grossiers en fonction de l'environnement de dépôt) et d'une alternance entre ces différents faciès, possèdent de ce fait un caractère captif à semi-captif. Ces sédiments atteignent leur profondeur maximale à proximité du littoral (~ 300 m). La qualité des eaux issues de cet aquifère est souvent correcte en raison de la couverture sédimentaire sus-jacente. A ce stade de la connaissance, cet aquifère serait divisé en deux nappes : La "**nappe 3**", qui serait spécifique à la Salanque avec une épaisseur de 50 à 60 m, individualisée en raison de ses propriétés hydrodynamiques intéressantes (Transmissivités allant de 10^{-2} à 3.10^{-2} m²/s) ; La "**nappe 4**" : concernerait tous les autres aquifères recensés dans les formations d'âge Pliocène et s'étendrait sur l'ensemble de la plaine. De manière générale, la Transmissivité de cette nappe est comprise entre 10^{-3} et 3.10^{-3} m²/s (Aunay, 2007).

3.2. Quaternaire

Les aquifères alluviaux superficiels regroupent l'ensemble des aquifères du Quaternaire ancien et moyen "**nappe 2**" et le Quaternaire récent de la frange littorale "**nappe 1**" sur une extension suivant la frange littorale et le lit des fleuves sur environ 600 km². Il s'agit de nappes libres avec des propriétés hydrodynamiques variables (Transmissivités comprises entre 10^{-4} et 10^{-2} m²/s) (Aunay, 2007).

Les figures suivantes (Figure 2 et Figure 3) synthétisent les informations mentionnées ci-dessus. En effet, la Figure 2 montre la délimitation géographique de la plaine du Roussillon ainsi que des différentes limites des aquifères en général (Quaternaire et Pliocène). Sur cette figure, deux coupes (N-S et W-E) ont été tracées, permettant de visualiser la structure verticale de ces aquifères. Ce qui est présentée sur la Figure 3 (Aunay, 2007).

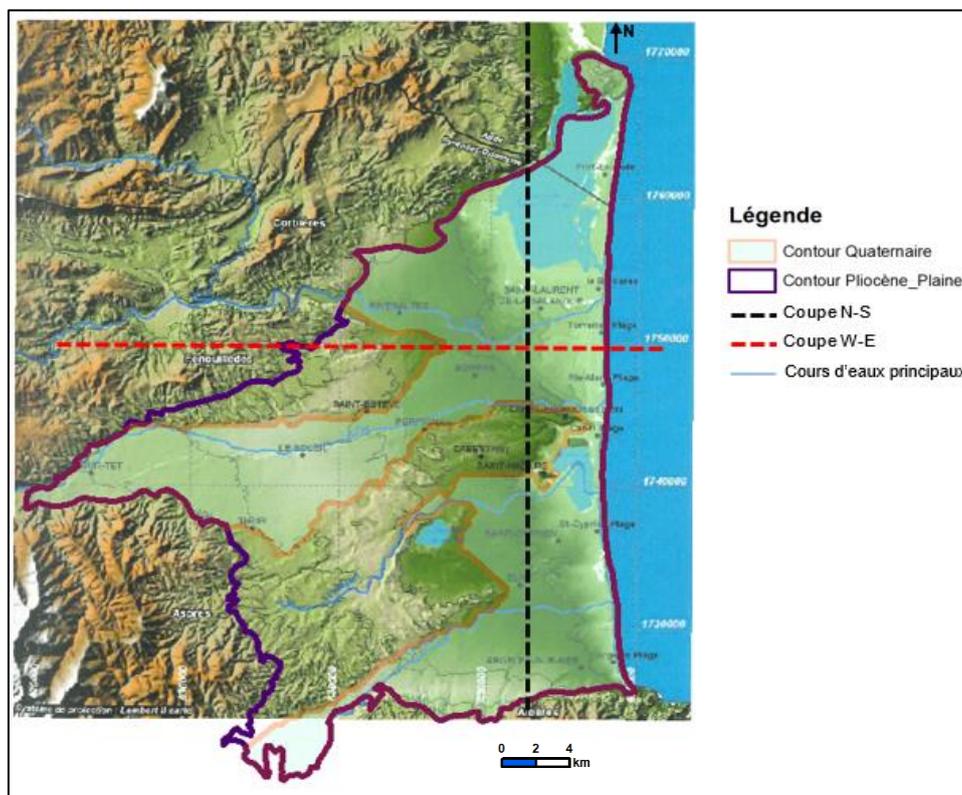


Figure 2 : Présentation de la plaine du Roussillon (Aunay, 2007)

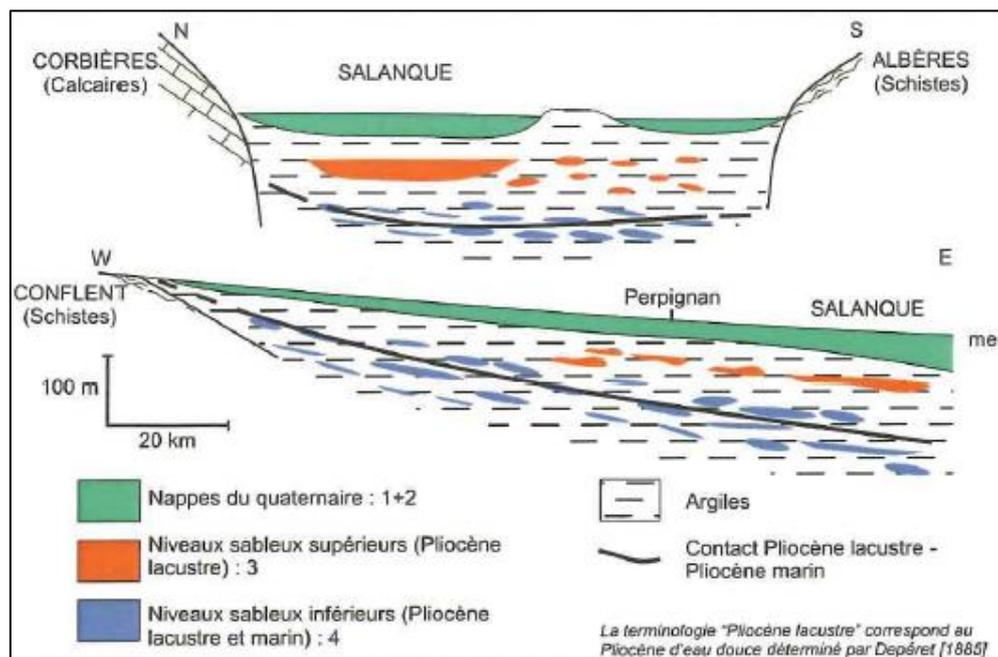


Figure 3 : Structure verticale de la plaine du Roussillon (Aunay, 2007)

II. Présentation du modèle numérique existant

L'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon, dans le but de mieux comprendre son fonctionnement, fait l'objet d'un suivi piézométrique depuis plus de 30 ans. De nombreux travaux de recherche (Thèses) ont été réalisés dans les années soixante par bassin versant et qui ont fourni des descriptions initiales du système, sur la base desquelles des modèles hydrodynamiques ont commencé à être construits. Parmi ces modèles, le plus abouti est celui de Chabart (Chabart, 1995) que je présenterai par la suite. Ensuite, d'autres thèses (Duvail, 2001) et (Aunay, 2007) ont suivi pour améliorer la compréhension sur les géométries et les paramètres hydrodynamiques dans la mesure où le modèle de Chabart ne répondait pas à toutes les questions. C'est ainsi que je présenterai ce modèle existant comme une illustration de l'état de la connaissance du système du point de vue de sa modélisation.

1. Définition des sous-systèmes

D'une manière générale, selon une description géologique, le système aquifère de la plaine du Roussillon est un système multicouche qui comprend une nappe alluviale du Quaternaire (nappe libre) et d'une nappe de sédiments du Pliocène (semi-captive à captive), toutes les deux séparées par une éponte (couche d'argile plus ou moins imperméable avec une perméabilité estimée à $0,25 \cdot 10^{-8}$ m/s). Cependant, au sens hydrogéologique, la nappe du Pliocène est subdivisée en deux sous-systèmes. Ce qui donne lieu à un système constitué de trois couches, supposé être représentatif du système aquifère de la plaine du Roussillon (Charbart, 1995) :

- **Couche 1** (Nappe 1 et 2) : nappe des alluvions (anciens, moyens et récents) du Quaternaire d'épaisseur moyenne de 15 m
- **Couche 2** (Nappe 3) : nappe du Pliocène de la salanque localisée au Nord-Est de la plaine avec une épaisseur moyenne de 10 m
- **Couche 3** (Nappe 4) : nappe du Pliocène profond d'épaisseur moyenne de 50 m

2. Définition du maillage

La plaine du Roussillon a une superficie totale estimée à environ 850 km². Etant donné la densité des points de mesures et les limites de résolution du modèle, la dimension des mailles retenue est de 1 km × 1 km, repérées par leurs coordonnées XY au centre (système de coordonnées : Lambert II zone carto Sud France) (Charbart, 1995). Le domaine modélisé est repéré par ses coordonnées minimales et maximales comme présenté sur la *Figure 4*. Aussi, le nombre total de mailles et mailles de calcul est récapitulé dans le *Tableau 1*.

Tableau 1: Récapitulatif du maillage du modèle

Couches	Aquifères	Nombre de mailles total
1	Alluvions quaternaires	681
2	Pliocène de la Salanque	289
3	Pliocène Profond	965
Total		1935

Couches	Nombre de mailles de calcul	Nombre de mailles à potentiels imposés
1	458	223
2	289	0
3	952	13
Total	1699	236

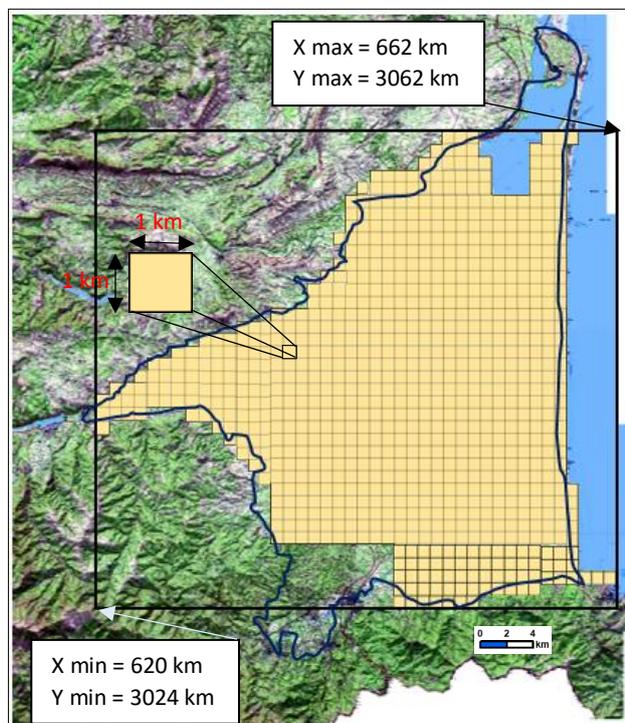


Figure 4 : Représentation du maillage du modèle (Système de coordonnées : Lambert II, zone carto sud France)

3. Définition de la géométrie du modèle

La définition de la géométrie requiert les limites topographiques des différentes couches (côte des toits et des murs de chaque couche distinguée). Ces informations ont été obtenues à partir d'interpolation de mesures locales à la faveur des sondages géologiques réalisés. Ainsi, les épaisseurs de chaque maille ont été définies. Le principe est que l'ensemble des isohypses du toit d'une couche est considéré comme le mur de la couche sus-jacente (Charbart, 1995).

4. Définition des limites et conditions aux limites du système aquifère

- Les bordures du système

La plaine du Roussillon présente deux types de bordures : une avec la mer méditerranéenne et l'autre avec les formations aux alentours comme présenté précédemment (*Figure 2*).

- Conditions aux limites avec les bordures : zones à potentiels imposés
- ✓ Il a été démontré que la couche 1 est en contact avec la mer sur toute la partie avale du bassin. Le potentiel imposé est estimé à 0,1 m NGF.
 - ✓ En revanche, les couches 2 et 3 ne sont pas en contact avec la mer et par conséquent cette limite est considérée comme limite imperméable.

✓ Une réalimentation locale de la nappe du Pliocène profond par les formations calcaires des corbières à certains endroits a été mise en évidence. Ainsi, certaines mailles correspondant à la couche 3 situés à ces endroits sont à potentiels imposés.

- Conditions aux limites au sein de la plaine

Les autres limites observées sur la plaine sont les cours d'eau et les étangs :

- La Têt, au Nord de Perpignan
- Le Réart
- Le Tech
- Le lac de Villeneuve de la Raho
- L'étang de Leucate
- L'étang de Canet en Roussillon

Au niveau de ces cours d'eaux et étangs, des côtes de débordement ont été fixées permettant de simuler les apports des eaux souterraines (Charbart, 1995).

5. Perméabilités et coefficients d'emménagement

Ces paramètres ont été déterminés localement à partir des travaux expérimentaux réalisés, puis affectés aux différentes mailles du modèle (Charbart, 1995). Les valeurs ainsi que les cartes de ces deux paramètres sont présentées en annexe 1.

6. Pas de temps de la simulation

Après avoir calé le modèle sur l'année 1989 – 1990, les simulations ont été faites sur cette période et étalées sur les cinq années suivantes au pas de temps mensuel. Ce qui correspond à 74 pas de temps allant de Juin 1989 à Août 1995.

Chapitre II : MATERIEL ET METHODES

Dans ce chapitre seront présentés le matériel ainsi que les méthodes utilisées pour aboutir aux résultats. D'abord, la compilation de la base de données sera traitée. Puis, l'interprétation des essais de pompage et l'actualisation des cartes de flux seront abordés avant de terminer par le diagnostic du modèle existant.

I. Compilation de la base de données du projet Dem'Eaux Roussillon

1. Consolidation de la base de données

La base de données est un terme générique utilisé pour caractériser l'ensemble des informations disponibles pour la réalisation du projet Dem'Eaux Roussillon. En effet, elle est constituée de deux fichiers, l'un comportant les informations sur la localisation, l'hydrodynamisme, la géologie et l'autre contenant les informations sur la chimie des eaux souterraines. Cette base de données a été mise en place à la suite d'une extraction des informations à partir de d'autres sources de données telles que : la Banque de Données du Sous-sol (BSS), le portail de l'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES), Thèses etc. Ainsi, elle contient des points (**piézomètres, forage, sondage** etc.) avec immatriculation BSS et d'autres points avec des immatriculations spéciales (en fonction de l'origine de la donnée). Mais cette extraction n'est pas exhaustive car les bases de données concernées ne contiennent que les connaissances déclarées à l'administration. Par ailleurs, d'autres acteurs tels que le Syndicat Mixte, des foreurs comme l'entreprise Aquaforage etc. ont aussi menés des travaux sur la plaine de façon indépendante, et de ce fait disposent chacune leurs bases de données.

Le travail de compilation de la base de données du projet que j'ai contribué à réaliser, a pour but d'homogénéiser toutes ces informations issues de ces différentes sources afin d'en constituer une seule. Cela a non seulement permis de compléter les informations sur les paramètres hydrodynamiques tels que la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement, afin d'actualiser les cartes de flux aux différentes limites de l'aquifère, mais aussi sur les paramètres chimiques des eaux tels que la concentration des éléments géochimiques, le pH, la conductivité électrique etc. Tout ceci permettra à long terme de mieux caractériser le fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique de l'aquifère.

Pour ce stage, la compilation a été faite à partir de quatre sources différentes (la base de données Dem'Eaux Roussillon, la BSS, le Syndicat Mixte des Nappes de la Plaine du Roussillon (SMNPR) et l'entreprise Aquaforage) comme indiqué sur la *Figure 5*. Dans le détail il a consisté pour chaque base de données :

- la Base de données Dem'Eaux Roussillon : à rechercher des doublons entre points avec immatriculation BSS et points avec immatriculations spéciales (méthode des plus proches voisins) ;
- la BSS : à rajouter des informations sur la chimie, l'hydrodynamisme, la géologie pour les points déjà existant dans la base de données ;
- le SMNPR : recherche de doublons (croisement des identifiants BSS et recherche par la méthode des plus proches voisins), rajout des informations sur la géologie, la localisation, l'hydrodynamisme, la chimie ;
- l'entreprise Aquaforage : recherche de doublons par la méthode des plus proches voisins et rajout des informations relatives aux essais de pompage.

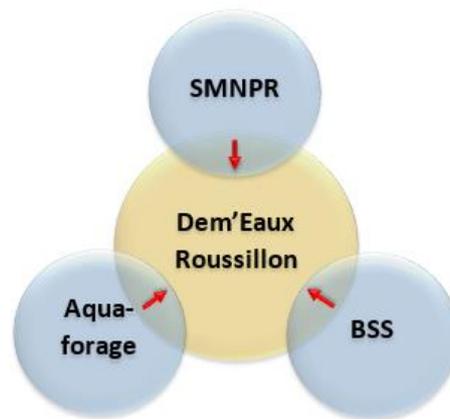


Figure 5 : Schéma explicatif de la procédure de compilation de la base de données Dem'Eaux Roussillon

NB : 1- La recherche des doublons par la méthode des plus proches voisins consiste à comparer les informations concernées par deux points différents (en général on compare un point d'immatriculation spéciale à tous les autres points situés dans un rayon de 100 m). D'une part, lorsque les informations sont les mêmes ou très proches, on suppose qu'il s'agit du même point. Dans ce cas, si le doublon a un matricule BSS, on supprime le point comparé tout en gardant ses traces. Et sinon, il est considéré comme un point à créer dans la BSS. Dans le cas contraire, on fait une distinction entre les deux points.

2- Lorsqu'un point d'immatriculation BSS, identifié dans les autres bases de données, n'existe pas dans celle de Dem'Eaux Roussillon, il y est rajouté.

2. Analyse des données géochimiques

L'analyse géochimique des eaux dans le système aquifère de la plaine du Roussillon est l'une des étapes les plus importantes du projet. Pour des mesures ponctuelles, elle permet d'évaluer la qualité de l'eau à un instant donné. Dans le cas d'un suivi à long terme, elle permet de suivre l'évolution de cette qualité au fil des années et de l'exploitation croissante des différents niveaux d'aquifère. Connaissant à priori certaines caractéristiques chimiques des entités hydrogéologiques dans la plaine (Quaternaire, Pliocène, eaux agricoles etc.), on pourra déterminer l'origine de la circulation des eaux au sein des nappes.

C'est dans ce cadre qu'une base de données a été initiée pour le projet en vue de répondre à la problématique liée à la qualité de l'eau (Gentet, 2018). Par ailleurs, le travail de la consolidation de la base de données a permis de rajouter à celle-ci des informations chimiques qui n'ont pas pu être valorisées pendant ce stage. Néanmoins, ces données permettront d'actualiser les cartes des paramètres chimiques déjà établies et aussi de comprendre l'évolution de la chimie sur l'ensemble de la plaine. Ce travail ne rentrait cependant pas dans le cadre de mon stage.

II. Interprétation des essais de pompage

Un pompage d'essai est un test hydraulique de l'aquifère. C'est l'opération par laquelle l'hydrogéologue détermine le débit d'exploitation d'un ouvrage et estime les paramètres des lois des écoulements souterrains. L'interprétation d'un pompage d'essai permet la quantification de paramètres propres à l'ouvrage et des paramètres hydrodynamiques caractéristiques de l'aquifère.

Dans le cadre de ce travail, les interprétations des essais de pompage ont été faites à l'aide du logiciel OUAIP (Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essais, présenté par la suite) en vue de compléter la base de données des paramètres hydrodynamiques et de mettre à jour les différentes cartes réalisées à l'issue des travaux précédents. L'avantage de ce logiciel est qu'il est simple d'utilisation et permet d'avancer rapidement dans le travail d'interprétation.

1. Préparation des fichiers de données

Les données qui ont servi au travail d'interprétation d'essai de pompage proviennent de la base de données de l'entreprise Aquaforage. Ces données ont été récupérées à l'issue de la compilation de la base de données du projet Dem'Eaux Roussillon. Elles contiennent les valeurs des mesures réalisées lors des essais de pompage sur une dizaine d'ouvrages présents sur la plaine du Roussillon.

2. Interprétation des essais de pompage avec le logiciel OUAIP

OUAIP (Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai) est un logiciel (gratuit, adresse de téléchargement : <http://ouaip.brgm.fr>) permettant d'interpréter et de simuler des pompages d'essais. Ce logiciel a été développé par le BRGM et propose diverses solutions analytiques avec prise en compte d'effets perturbateurs (effets de puits, effets de limites, effets de capacité, etc.). Le tableau ci-dessous (*Tableau 2*) présente la synthèse des solutions analytiques disponibles dans OUAIP ainsi que leurs champs d'application.

Tableau 2 : Synthèse des solutions analytiques disponibles dans OUAIP

Solution	Débit variable	Interprétation			Liste des effets				
		Au puits	Au piézomètre	Pénétration partielle	Effet de limites	Pertes de charges quadratiques	Effet de skin	Effet de capacité	Effet de vidange
Theis (1935)	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Papadopoulos-Cooper (1967)				✗				✓	
Hantush (1964)				✓				✓	
Gringarten-Witherspoon (1972)				✗				✗	

En effet, ces solutions fondées sur des formules mathématiques, permettent de résoudre de manière analytique l'interprétation des pompages d'essai selon des hypothèses relatives à la nature du milieu, l'écoulement et l'ouvrage dans lequel l'essai est effectué. Ainsi, d'une manière générale, en se référant au *Tableau 2*, toutes les solutions s'appliquent presque dans les mêmes conditions. Cependant, à l'exception de la solution de Hantush (1964), les autres solutions ne s'appliquent pas dans le cas d'une pénétration partielle de l'ouvrage. Aussi, la solution de Gringarten-Witherspoon (1972) ne s'applique non plus pas à un piézomètre et ne prend pas en compte les effets de limites.

Dans le cadre de ce stage, seule la solution de Theis a été appliquée à l'interprétation des essais à débits constants pour estimer les paramètres hydrodynamiques (Transmissivité et Coefficient d'emménagement). Les essais par paliers de débit ont servi à déterminer les pertes de charges au droit des ouvrages.

2.1. La solution de Theis

La solution de Theis implémentée simule le pompage d'une nappe en supposant qu'elle est captive ou libre peu rabattue, horizontale, homogène, isotrope, de dimensions infinies, d'épaisseur et de coefficient d'emmagasinement constants. Aussi, elle suppose un puits de diamètre infiniment petit, complètement pénétrant avec un écoulement transitoire, parfaitement radial, c'est-à-dire horizontal et dirigé vers le puits (*Figure 6*).

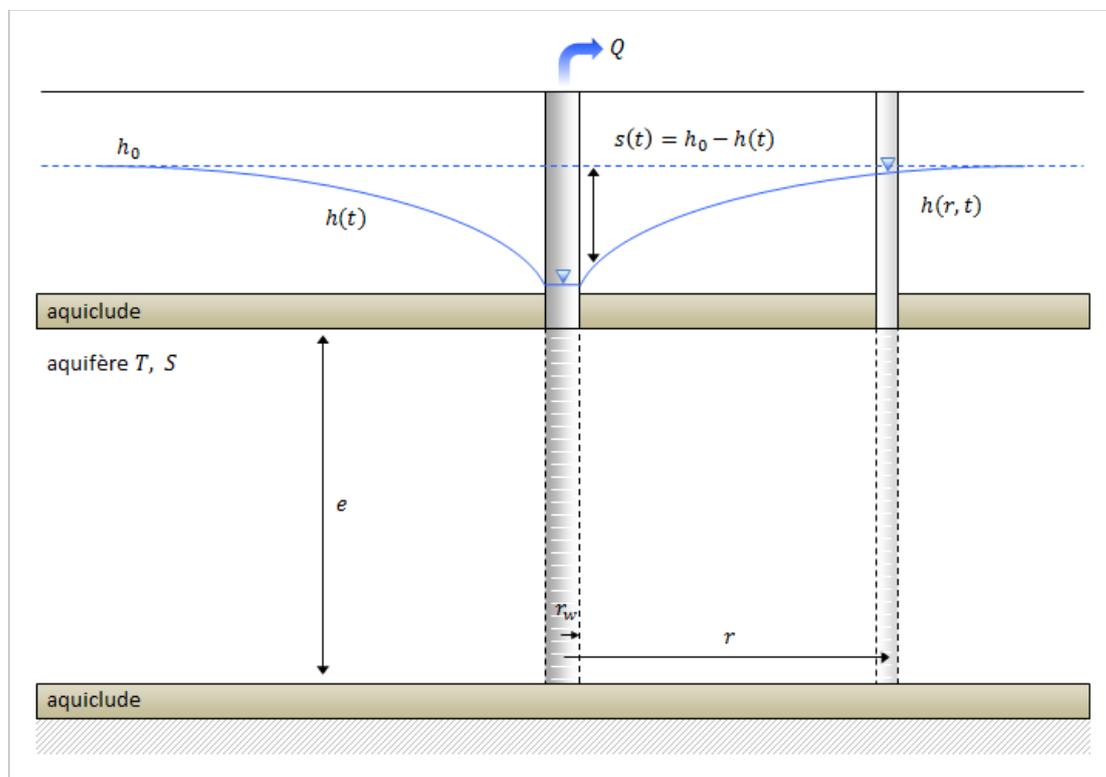


Figure 6 : Schéma explicatif de la configuration de la solution de Theis (BRGM, 2018)

2.2. Détermination de la transmissivité T et du coefficient d'emmagasinement S

La détermination de la transmissivité ainsi que du coefficient d'emmagasinement est faite en utilisant les données des essais de pompage de longue durée à débit constant. En effet, à l'aide du logiciel OUAIP, on fait coïncider au mieux la courbe théorique de l'équation de Theis (ligne rouge) à la série de points (en jaune) comme présenté sur la figure suivante (*Figure 7*). Le principe est de faire varier la transmissivité (constituant la pente) et le coefficient d'emmagasinement (qui constitue l'ordonnée à l'origine) afin d'obtenir une meilleure superposition des deux courbes. Pour l'exemple de la *Figure 7*, on obtient une transmissivité de $7.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ et un coefficient d'emmagasinement de 3.10^{-3} pour un rayon de puits de 0,15 m.

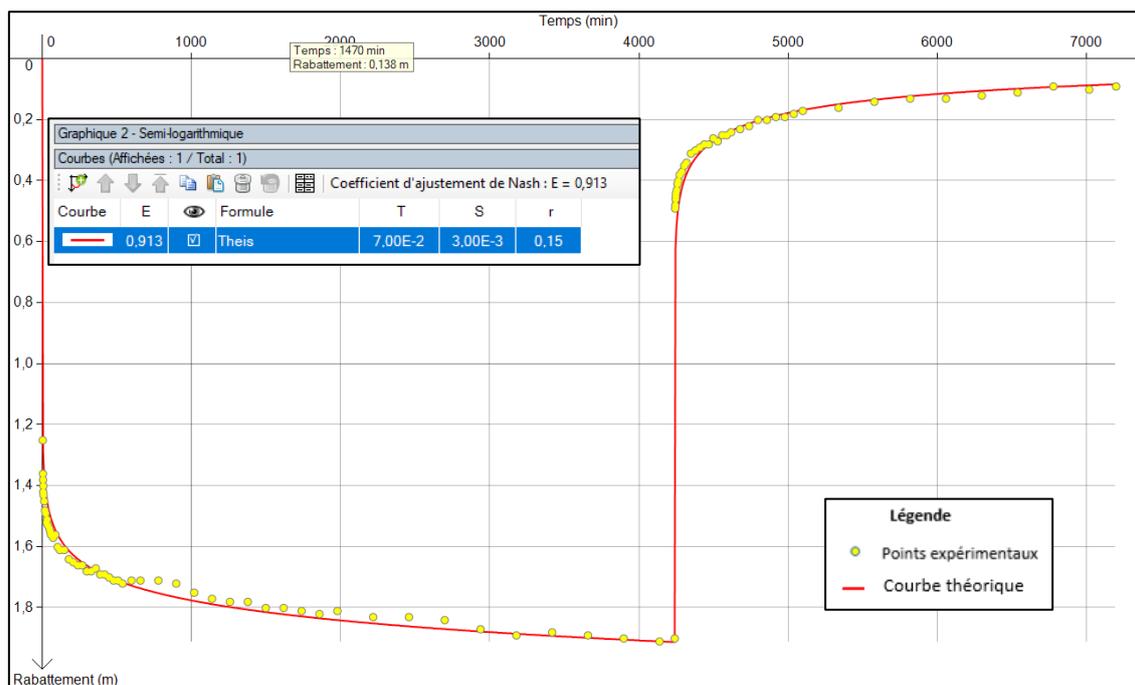


Figure 7 : Représentation des points expérimentaux et la courbe théorique pour la détermination de la transmissivité T et du coefficient d'emmagasinement S

Une fois ces interprétations d'essais de pompage terminées, les valeurs ont été intégrées dans la base de données des paramètres hydrodynamiques afin d'actualiser les cartes de transmissivité. Les résultats obtenus seront présentés dans le prochain chapitre (Chapitre III).

III. Actualisation des flux aux limites de l'aquifère et évaluation des bilans hydriques

Le calcul des flux aux différentes limites de l'aquifère (limite avec les formations de bordures, la mer, les cours d'eau) permet d'estimer en termes d'ordre de grandeur des échanges qui s'effectuent entre l'aquifère et ces environnements. C'est-à-dire la quantité d'eau qui entre et celle qui sort du système aquifère à certaines périodes données.

En effet, pour le calcul des flux, le système a été subdivisé en mailles carrées de 500 m de côté. Ainsi, en considérant deux mailles voisines, on applique la relation de Darcy suivante :

$$\vec{q} = -A \cdot K \cdot \vec{i} \Rightarrow Q = -T \cdot (Hpz_2 - Hpz_1)$$

Où \vec{q} est le flux calculé (m³/s), K est la conductivité hydraulique ou le coefficient de perméabilité du milieu (m/s), A est la section d'écoulement (m²), \vec{i} le gradient hydraulique, T la transmissivité (m²/s) et Hpz_i la hauteur piézométrique (m) au point i considéré.

Ainsi, les cartes de transmissivité actualisées grâce à la compilation à laquelle j'ai participé, ont servi à actualiser les cartes de flux établies à partir des cartes piézométriques représentatives des années 1960 et 2012-2013 (Figure 8). Les cartes piézométriques ont été établies à partir des données issues des travaux de Thèses sur les bassins versants pour les années 1960 (Gadel et al., 1968) et de l'étude des volumes prélevables en 2012-2013 (HYDRIAD, 2013).

Système de projection : RGF Lambert 93 ; unité de mesure : le mètre

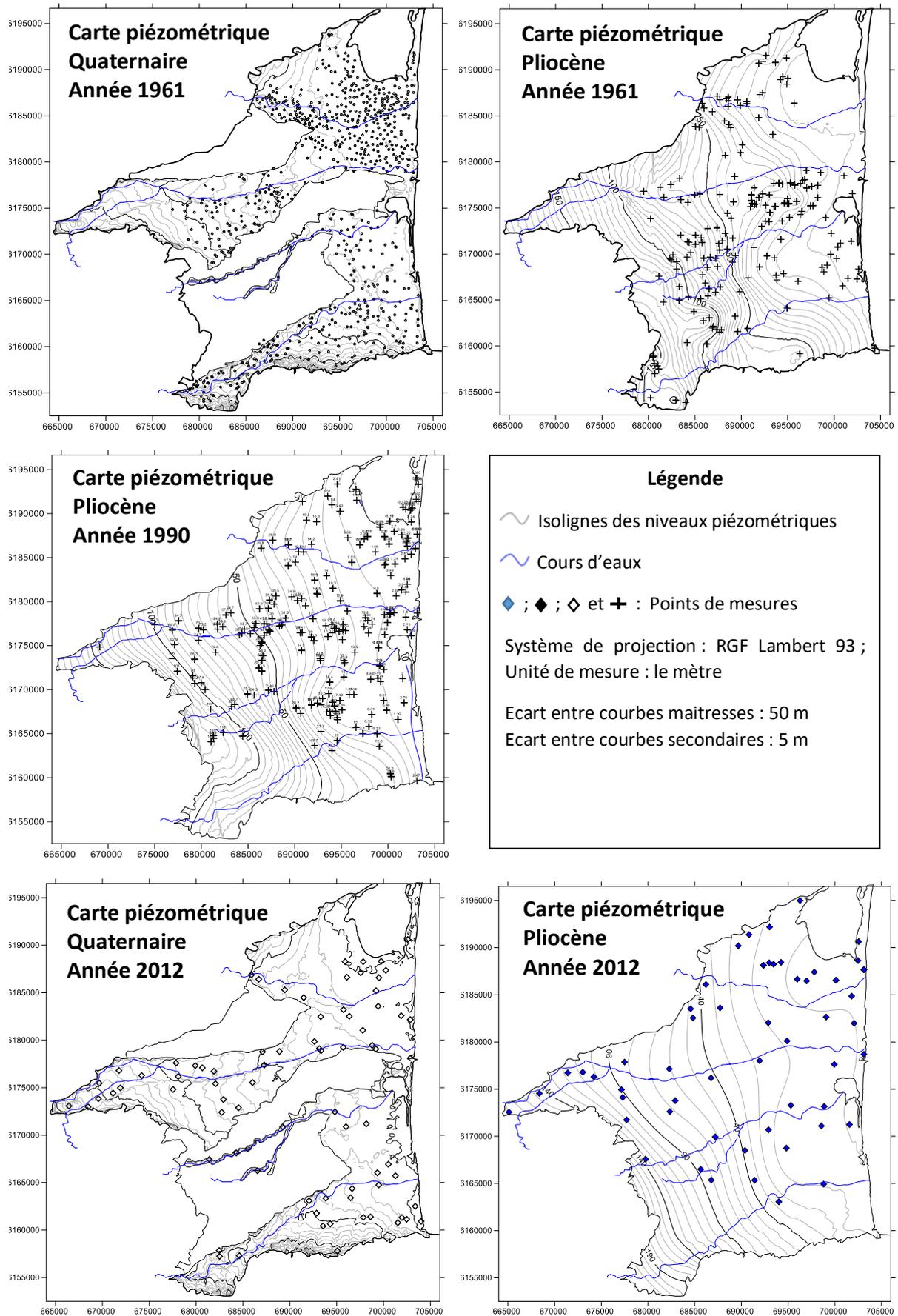


Figure 8 : Cartes piézométriques de base pour le calcul des flux aux limites de l'aquifère (réalisées par le BRGM)

IV. Modélisation de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon

La modélisation numérique sous le logiciel MARTHE (qui sera présenté dans la suite) du comportement hydrodynamique de l'aquifère plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon est l'un des objectifs phares du projet Dem'Eaux Roussillon. Comme nous l'avons vu plus haut, un modèle existe déjà, réalisé en 1995 par M. Chabart (1995). Dans le cadre de mon stage, il m'a été demandé de diagnostiquer ce modèle et voir comment il pourrait être amélioré afin de reproduire au mieux la piézométrie de l'aquifère, ce qui est développé dans cette partie.

N.B : Les détails sur le modèle sont énumérés dans le **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE** précisément dans la section (Présentation du modèle numérique existant) où figurent les informations sur : l'emprise de la zone, le nombre de couches, le nombre de mailles, les pas de temps etc.

1. Présentation du logiciel MARTHE

MARTHE (Modélisation des Aquifère par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) est un logiciel qui a été développé par le BRGM et qui permet le calcul des écoulements de fluides, de transfert de masse et de transfert thermique en milieux poreux tridimensionnels avec une approche en volumes finis. Cette schématisation en volumes finis fait intervenir des maillages parallélépipédiques (ou rectangulaires) irréguliers, organisées en couches empilées, chaque couche étant formée de mailles organisées en lignes et colonnes (comme dans un tableur). Ce logiciel a l'atout de prendre en compte les schémas simples ou complexes (zone non saturée, écoulements multiphasiques, interaction avec les cours d'eaux etc., des couches peuvent disparaître localement (court-circuit) et peuvent affleurer en surface) (BRGM, 2017).

2. Diagnostic du modèle existant sur la période 1989 – 1995

La première phase du diagnostic du modèle (version 1995) a consisté à relancer les simulations des niveaux piézométriques sur la période 1989 – 1995 puis, à comparer les résultats à ceux de la simulation réalisée en 1995 par M. Chabart ainsi qu'à la piézométrie observée. Cela permettra de vérifier que le schéma conceptuel de modélisation proposé par Chabart et implémenté dans l'outil de modélisation MARTHE dans sa version actuelle fonctionne correctement.

Pour diagnostiquer le modèle existant, un certain nombre de points à historiques ont été définis dans le modèle. Ils correspondent à des piézomètres pour lesquels on dispose de chroniques de données.

Au total, 41 points à historiques ont été créés dans le modèle (*Figure 9*), tous associés à des chroniques d'observation. Parmi ceux-ci, seulement neuf se retrouvent dans la liste des 15 points à historiques définis dans la thèse de Chabart (1995). Ces neuf points sont marqués en vert sur la *Figure 9* et serviront à comparer les simulations faites en 1995 et 2018 aux valeurs de piézométries observées sur la période de simulation dans ces piézomètres.

La liste des neuf points est donnée par le *Tableau 3* et l'on peut remarquer qu'un seul piézomètre exploite la couche 1 (Quaternaire) tandis que les autres exploitent la couche 3 (Pliocène profond). Les numéros de colonne et de ligne permettent de localiser le point dans le maillage. Les résultats obtenus à l'issue du diagnostic seront présentés dans le prochain chapitre consacré aux résultats.

Tableau 3 : Liste des points à historiques considérés pour le diagnostic

Indice BSS	X_L93 (m)	Y_L93 (m)	C (colonne)	L (ligne)	Z (Couche)	Numéro
10972X0137	698806	6164927	34	31	3	40
10972X0134	697257	6164977	32	31	3	38
10963X0059	679738	6167673	15	28	3	30
10916X0090	703113	6178694	38	17	3	27
10912X0112	703108	6187667	38	8	3	19
10912X0110	701812	6184869	37	11	3	17
10912X0061	700129	6186545	35	9	3	14
10911X0139	696299	6186478	31	9	1	10
10908X0263	686746	6176189	22	20	3	6

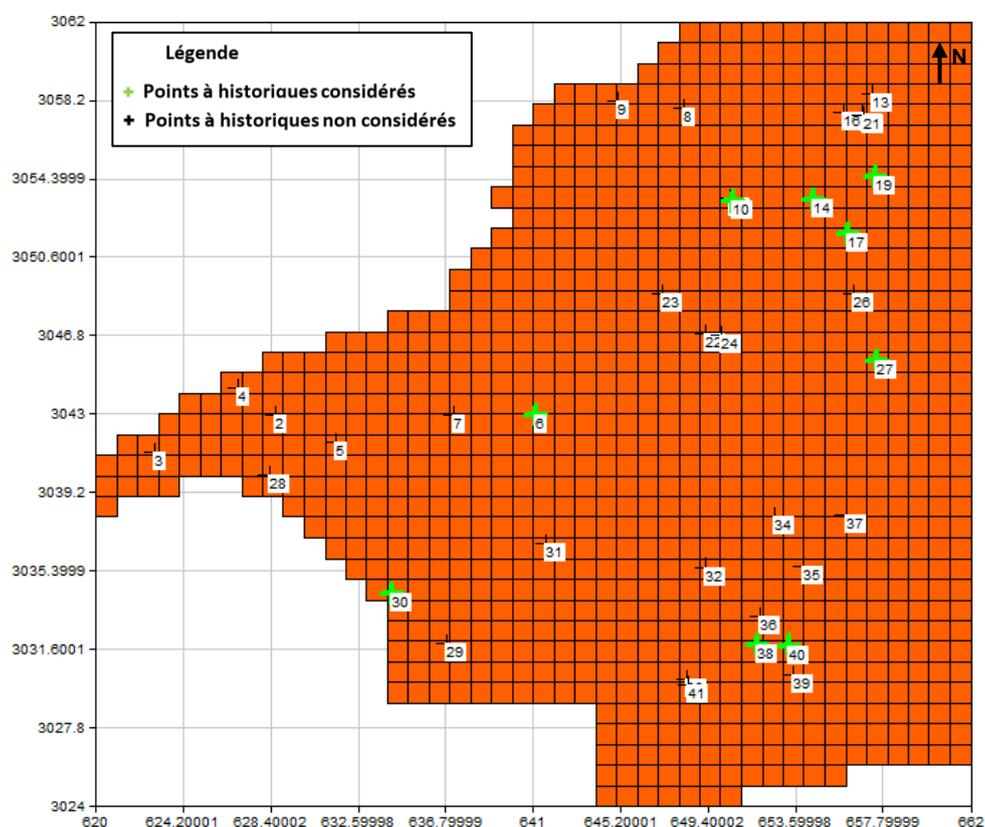


Figure 9 : Localisation des points à historiques

3. Diagnostic du modèle existant sur la période 1959 – 2013

A l'issue de la première phase de diagnostic, il a été décidé de diagnostiquer le modèle sur une période de simulation plus longue, puisqu'on dispose aujourd'hui de séries d'observations piézométriques de 1959 à 2013. Les paramètres du modèle n'ont pas été modifiés. Seules les données de forçage extérieur ont été adaptées pour permettre la simulation sur une longue période. Par manque de données (actualisation en cours), les prélèvements ont été maintenus aux valeurs mensuelles définies par Chabart en 1995. En revanche, la recharge mensuelle a été recalculée en mettant à profit les méthodes et outils développés récemment (Caballero et al., 2016). Ainsi, la procédure suivante a été mise en œuvre :

- définition de nouveaux coefficients d'infiltration ;
- calcul de la pluie efficace à partir des données météorologiques disponibles sur la période 1959 -2013 (à partir des données de réanalyse SAFRAN (Vidal et al., 2010) et de réserves utiles maximales des sols de l'INRA (INRA, 2014) disponibles au BRGM) ;
- calcul de nouvelles recharges à partir de la pluie efficace et des coefficients d'infiltration.

Enfin, pour faciliter l'initialisation du modèle en régime transitoire, les valeurs de la charge hydraulique ont été initialisées à partir des cartes piézométriques établies en 1961 (Figure 8). Chacune des étapes de ce calcul sont décrites à continuation.

3.1. Détermination des coefficients d'infiltration

La détermination du coefficient d'infiltration a été faite à partir de l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) (Mardhel et al., 2004). Cet indicateur spatial a été créé par le BRGM pour réaliser des cartes nationales ou régionales de vulnérabilité intrinsèque des nappes aux pollutions diffuses. Il traduit l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface. Pour les besoins du calcul de la recharge et parce que l'IDPR est un indice qualitatif, une table de correspondance entre l'IDPR et le coefficient d'infiltration a été établie (Figure 10) (Caballero et Lanini, 2016). La procédure suivie pour déterminer le zonage des coefficients d'infiltration sur la plaine du Roussillon est la suivante :

- à partir de la carte des IDPR (Figure 10 – image 1), une moyenne pondérée d'indice IDPR a été calculée sur chaque maille du modèle ;
- chaque valeur d'IDPR moyen a ensuite été converti en coefficient d'infiltration à partir de la table de correspondance (Figure 10 – image 2) ;
- au total, 16 zones à coefficient d'infiltration différent ont été obtenues sur l'ensemble de la zone d'étude. A chaque catégorie de zone, un numéro a été affecté en vue de faciliter la représentation (Figure 10 – image 3).

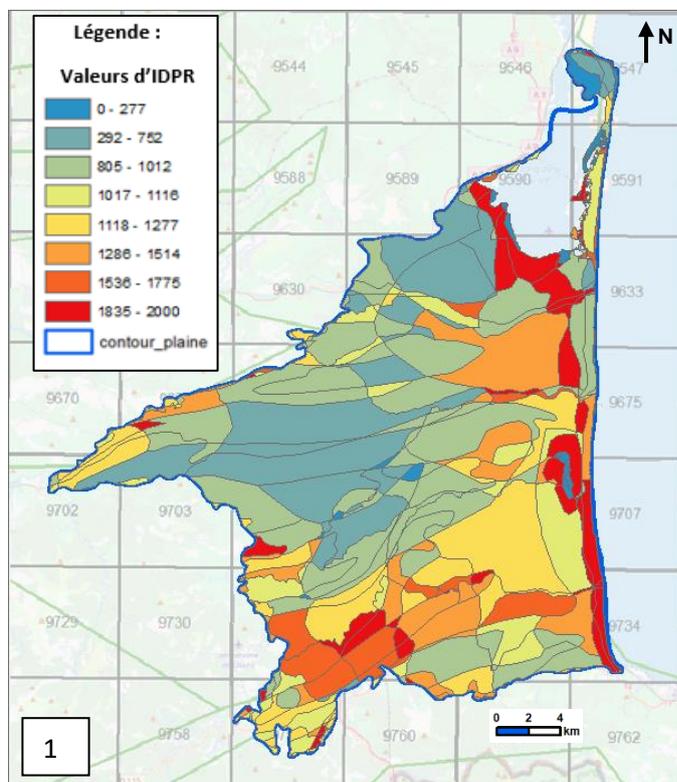


Table de correspondance IDPR- Coefficient d'Infiltration

IDPR (2007)	Coefficient d'Infiltration	Numéro de Classe
< 400	0,95	1
400 - 500	0,9	2
500 - 600	0,85	3
600 - 700	0,8	4
700 - 800	0,7	5
800 - 900	0,65	6
900 - 1000	0,6	7
1000 - 1100	0,55	8
1100 - 1200	0,5	9
1200 - 1300	0,4	10
1300 - 1400	0,35	11
1400 - 1500	0,3	12
1500 - 1600	0,25	13
1600 - 1700	0,2	14
1700 - 1800	0,1	15
>1800	0,05	16

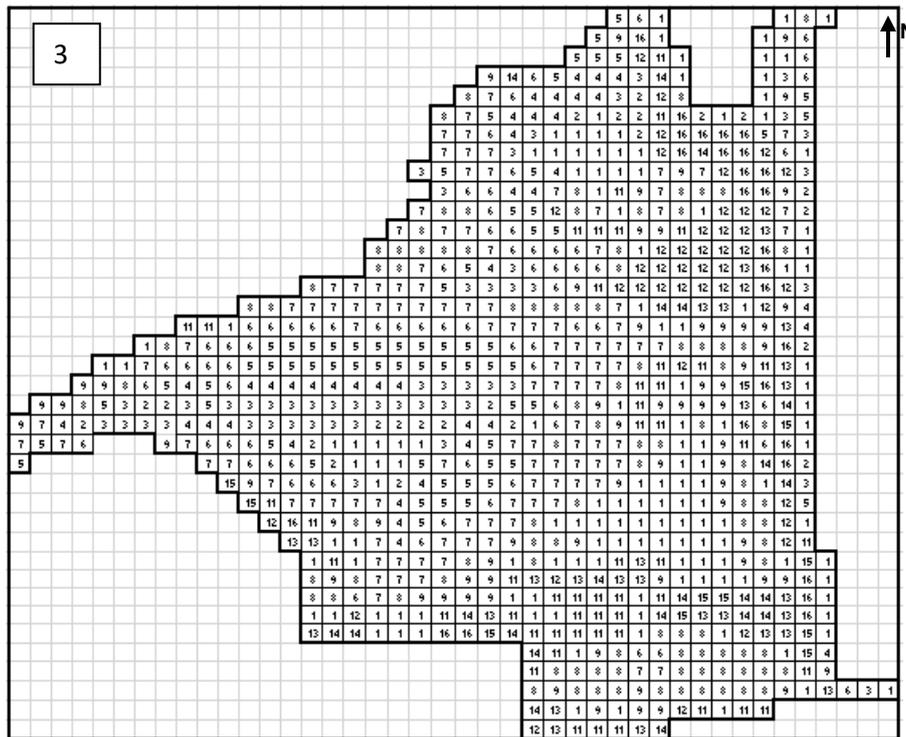


Figure 10 : Présentation des différentes zones de coefficients d'infiltration

Dans le but de se conformer aux 4 classes définies dans les travaux de M. Chabart (1995), les coefficients ont été regroupés (en appréciant) comme indiquée sur la figure suivante (Figure 11).

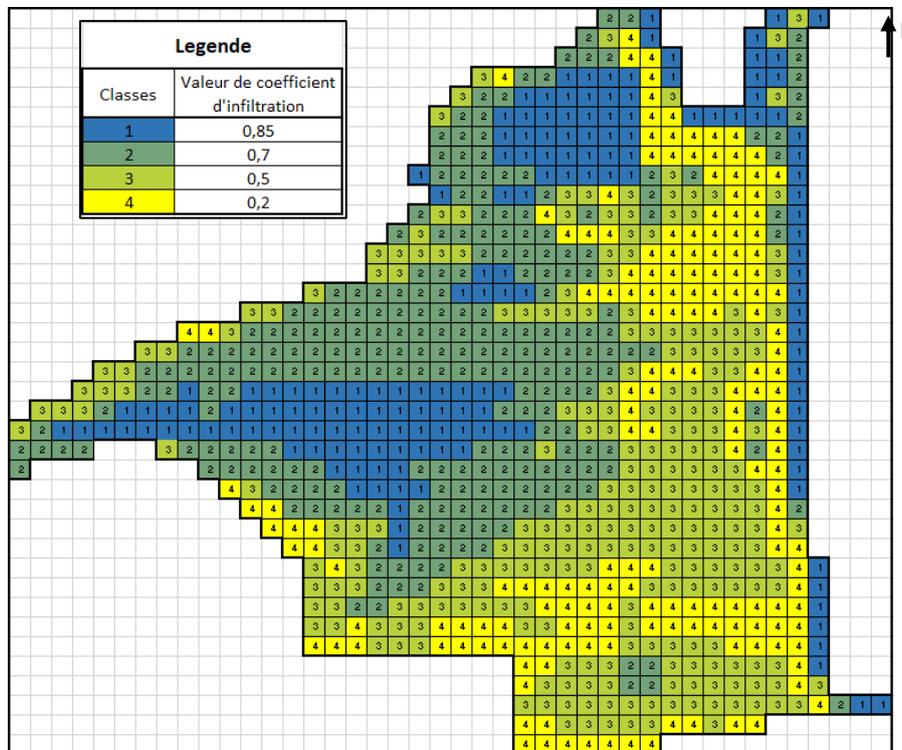


Figure 11 : Présentation des différentes zones de coefficients d'infiltration retenues

3.2. Calcul de la pluie efficace

- Préparation des données météorologiques

Les données météorologiques qui ont servi à calculer la pluie efficace sont les suivantes : La pluie brute (P), la température (T), la neige et l'évapotranspiration réelle (ETP). Ces données sont issues de la réanalyse SAFRAN et fournies par Météo France, à l'échelle d'une grille de 8km × 8km qui couvre toute la France métropolitaine. Seules les 28 mailles qui recourent la zone d'étude ont été prises en compte (voir *Figure 12 – A* : mailles grises).

- Recherche des valeurs de RU max

D'un point de vue agronomique, la réserve utile en eau d'un sol est la quantité d'eau que ce sol peut absorber et restituer aux plantes. C'est-à-dire la différence entre la capacité au champ (capacité maximale de rétention d'eau) et l'humidité au point de flétrissement (humidité en-deçà de laquelle les plantes ne peuvent plus absorber de l'eau). L'hydrologue considère que ce paramètre peut être utilisé pour représenter la capacité maximale de stockage d'eau du sol. Les données utilisées sont fournies par la carte INRA des sols au 1/1000000. Par conséquent, elles ne sont pas précises. On peut donc remarquer que sur l'ensemble de la zone d'étude, seulement deux valeurs de RU sont distinguées : la première avec une RU de 25 mm et la seconde avec une RU de 125 mm comme présenté sur la *Figure 12 – B*.

- Calcul des pluies efficaces sur l'ensemble de la zone d'étude

Au sens large du terme, la pluie efficace est considérée comme la partie des précipitations (pluie brute) qui donne lieu à l'écoulement superficiel et souterrain ($P_e = P - ETR$). Elle a été calculée à l'aide du logiciel **ESPERE (ESTimation de la Pluie Efficace et de la Recharge) (Lanini et al., 2016 <http://www.brgm.fr/espere>)**. Il s'agit d'une feuille de calcul MS Excel qui, entre autres, permet de mettre en œuvre des méthodes de bilan hydrique simple pour le calcul de la pluie efficace et d'en déduire la recharge d'un aquifère. Nous l'avons utilisé pour calculer la pluie efficace journalière et mensuelle de 1959 à 2013 sur chacune des mailles SAFRAN concernées par la zone d'étude.

NB. *Les pluies efficaces au pas de temps mensuel ont été calculées selon trois méthodes de bilan hydrique différentes (Thornthwaite ; DingmanPenman ; DingmanHamon) puis moyennées. Les récapitulatifs des formules de ces trois méthodes se trouvent en annexe 2 : méthodes de calculs de la pluie efficace.*

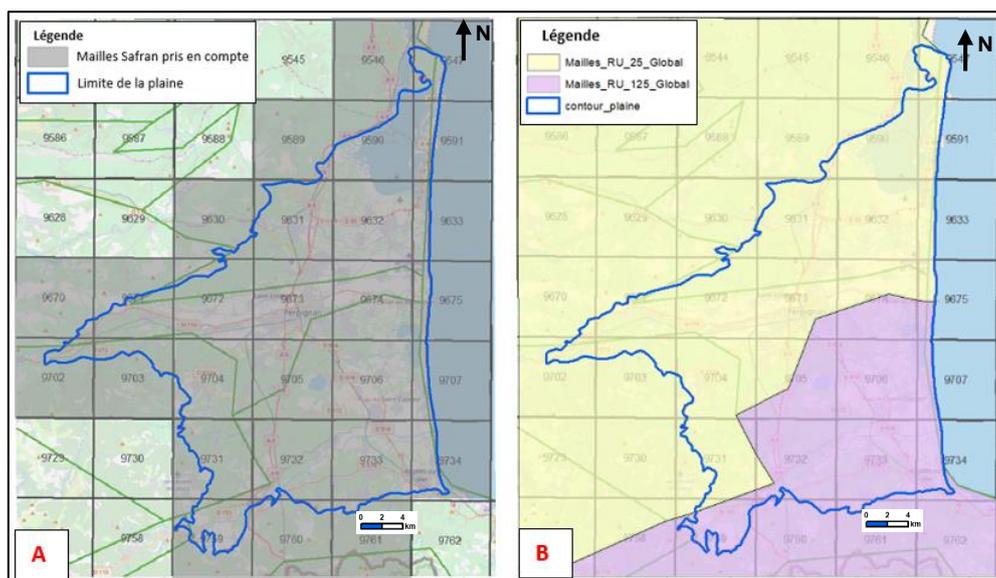


Figure 12 : A : Carte des mailles safran prises en compte pour le calcul de la pluie efficace ; B : Carte des réserves utiles

3.3. Calcul de la recharge

Pour calculer la recharge, il faut tout d'abord déterminer les différentes zones de recharge. Ainsi, la détermination de ces différentes zones a été effectuée en croisant sous Arcgis les trois couches correspondant aux coefficients d'infiltrations (Figure 11), mailles safran (Figure 12 – A), et réserves utiles maximales (Figure 12 – B). Au total, 92 zones de recharges ont pu être définies, mais par souci de lisibilité, la carte ne figure pas dans ce rapport. Sur chacune de ces zones, une valeur de recharge a été calculée en multipliant la pluie efficace par le coefficient d'infiltration. Ces valeurs sont importées dans MARTHE pour ensuite lancer la simulation.

3.4. Simulation sur la période 1959 – 2013

- Initialisation de la charge hydraulique

L'initialisation de la charge hydraulique a été faite à partir des cartes piézométriques disponibles en 1961 (Figure 8). Celles-ci ont été converties en fichier de grille puis intégrées dans le logiciel MARTHE en tant que valeurs initiales, pour aider le modèle à converger avant le premier pas de temps de calcul. (Voir Figure 22 dans le chapitre des résultats pour la visualisation des niveaux piézométriques considérés comme valeurs initiales).

- Mise en œuvre de la simulation

La simulation a été faite sur la période allant de 1959 à 2013 correspondant à **660 pas de temps** mensuels. Les différents pas de temps ont été définis dans Marthe ainsi que les différentes zones de recharges. Puis, les simulations ont été lancées et les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le prochain chapitre.

Chapitre III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I. Compilation de la base de données du projet

La synthèse des bases de données disponibles (SMNP, entreprise Aquaforage etc.) a permis de rajouter de nombreux points afin d'actualiser la base de données du projet Dem'Eaux Roussillon. La *Figure 13 – A* montre en effet la situation de la base de données dans sa version antérieure et la *Figure 13 – B* montre les points qui ont été rajoutés (sondages, forages, drains, sources, puits et piézomètres). Les informations obtenues à partir de ces points ont permis de renseigner la base de données sur les paramètres hydrodynamiques et sur les paramètres chimiques. Dans le cadre de mon stage, je me suis concentré sur la valorisation des données des paramètres hydrodynamiques (Transmissivité) et cela a permis d'actualiser les cartes de flux aux limites du système aquifère à partir des cartes piézométriques présentées à la *Figure 8*.

Malgré le nombre important de données disponibles, certaines zones de la plaine restent encore en manque d'informations. C'est le cas de la zone Nord-Ouest et le Sud-Ouest de la plaine.

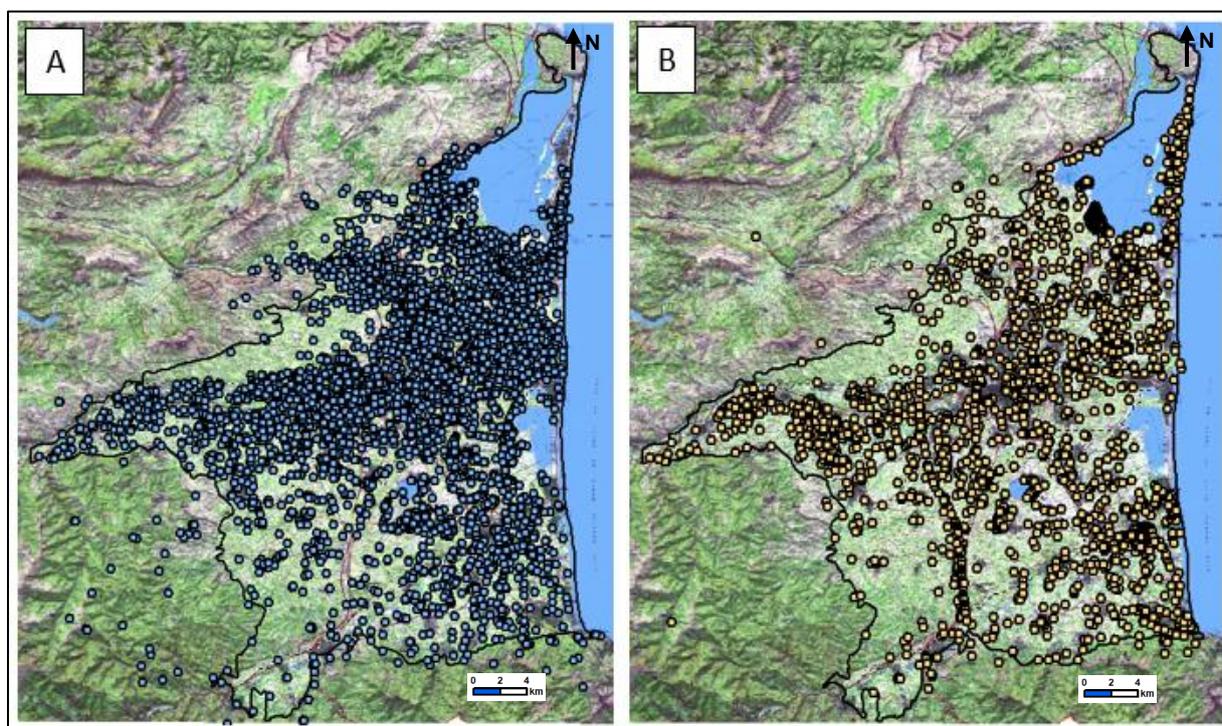


Figure 13 : Positionnement des nouveaux points (B) par rapport aux anciens (A)

II. Actualisation des cartes de Transmissivités et de flux

1. Actualisation des cartes de Transmissivités

À la suite de l'intégration des nouvelles valeurs de transmissivité dans la base de données, les cartes de ce paramètre dans le Pliocène ainsi que dans le Quaternaire ont pu être actualisées (*Figure 14*). De façon générale, les transmissivités apparaissent globalement comprises entre 10^{-4} et 10^{-5} m^2/s dans le Quaternaire, sauf localement où elles peuvent atteindre de l'ordre de 10^{-2} m^2/s à l'Ouest et aussi à l'Est, parallèlement à la frange littorale. On observe un schéma similaire dans le cas du Pliocène (Pliocène profond en général), mais avec moins de dispersion (valeurs comprises entre 10^{-4} et 10^{-3} m^2/s). Les valeurs les plus faibles s'observent globalement dans la partie centrale de ces formations,

ainsi que dans le secteur Sud pour lequel une grande incertitude subsiste cependant, au vu du très faible nombre de points sur lesquels l'interpolation se base.

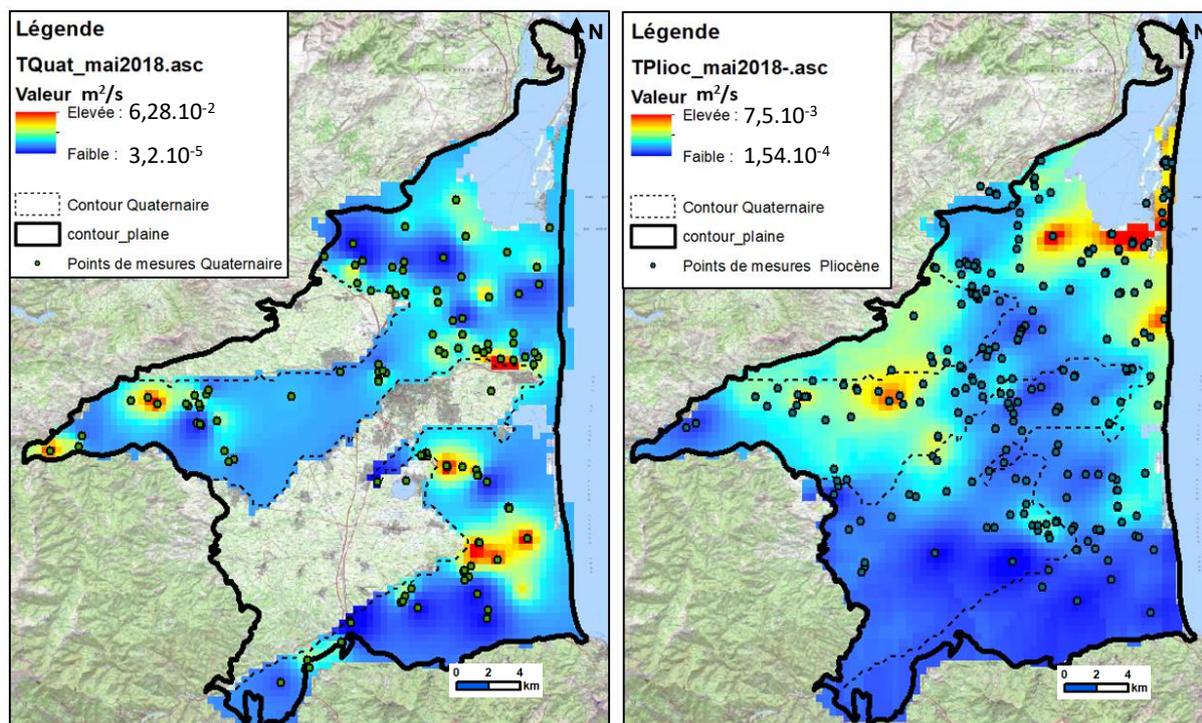


Figure 14 : Cartes de transmissivités actualisées

Source : travail BRGM obtenu par méthode de krigeage

2. Actualisation des cartes de flux aux limites du système aquifère

Les flux aux limites des systèmes aquifères (bordures et cours d’eaux) ont été recalculés à partir des nouvelles cartes de transmissivités et piézométriques disponibles (BRGM, 2018). L’objectif de ce calcul des flux est d’estimer l’ordre de grandeur des échanges ayant lieu entre l’aquifère et ses limites. Pour illustrer l’évolution de la direction de ces flux, une représentation binaire a été effectuée (voir *Figure 15* et *Figure 16*). Sur ces figures, selon l’entité considérée comme référence, la couleur rouge (valeur -1) traduit un flux sortant et la couleur bleue (valeur +1) traduit un flux rentrant, indépendamment de la valeur absolue de ce flux, qui peut être entachée d’une certaine incertitude en fonction de la densité des points ayant permis l’interpolation de la piézométrie ou de la transmissivité.

Par ailleurs, ne disposant que des cartes piézométriques des années 1961 et 2012 (*Figure 8*) en condition de basses eaux à la fois dans le Quaternaire et dans le Pliocène, les flux ont été évalués que pour ces périodes. Car il s’agit de cartes produites en cumulant des données acquises sur plusieurs années.

2.1. Carte des flux au niveau des cours d’eaux

Dans cette section, les références considérées pour le calcul des flux sont les cours d’eaux. A l’image de ce qui a été dit précédemment, la couleur rouge traduit les flux rentrants dans les cours d’eau et donc sortants de l’aquifère. A l’inverse, la couleur bleue traduit un flux qui sort des cours d’eau et donc entrant dans l’aquifère (voir *Figure 15*). En analysant ces cartes, on remarque que :

En 1961, la nappe quaternaire alimente les cours d’eau en amont et cela s’inverse en aval. La nappe du Pliocène a plutôt tendance à alimenter le Réart et la Canteranne.

En 2012, il n'y a pas d'évolution de la situation sur la partie amont dans le Quaternaire, mais une accentuation de l'alimentation de la nappe par le cours d'eau en aval (probablement liée à une baisse de son niveau dans ce secteur). Aussi, les cours d'eau ont tendance à alimenter la nappe du Pliocène, probablement en lien avec la baisse tendancielle de son niveau de remplissage évoqué dans le contexte de mon travail.

En effet, plus les prélèvements s'accroissent et plus le gradient hydraulique vertical augmente du fait du rabattement important du niveau des nappes, ce qui favorise l'infiltration des eaux des cours d'eau au sein de l'aquifère.

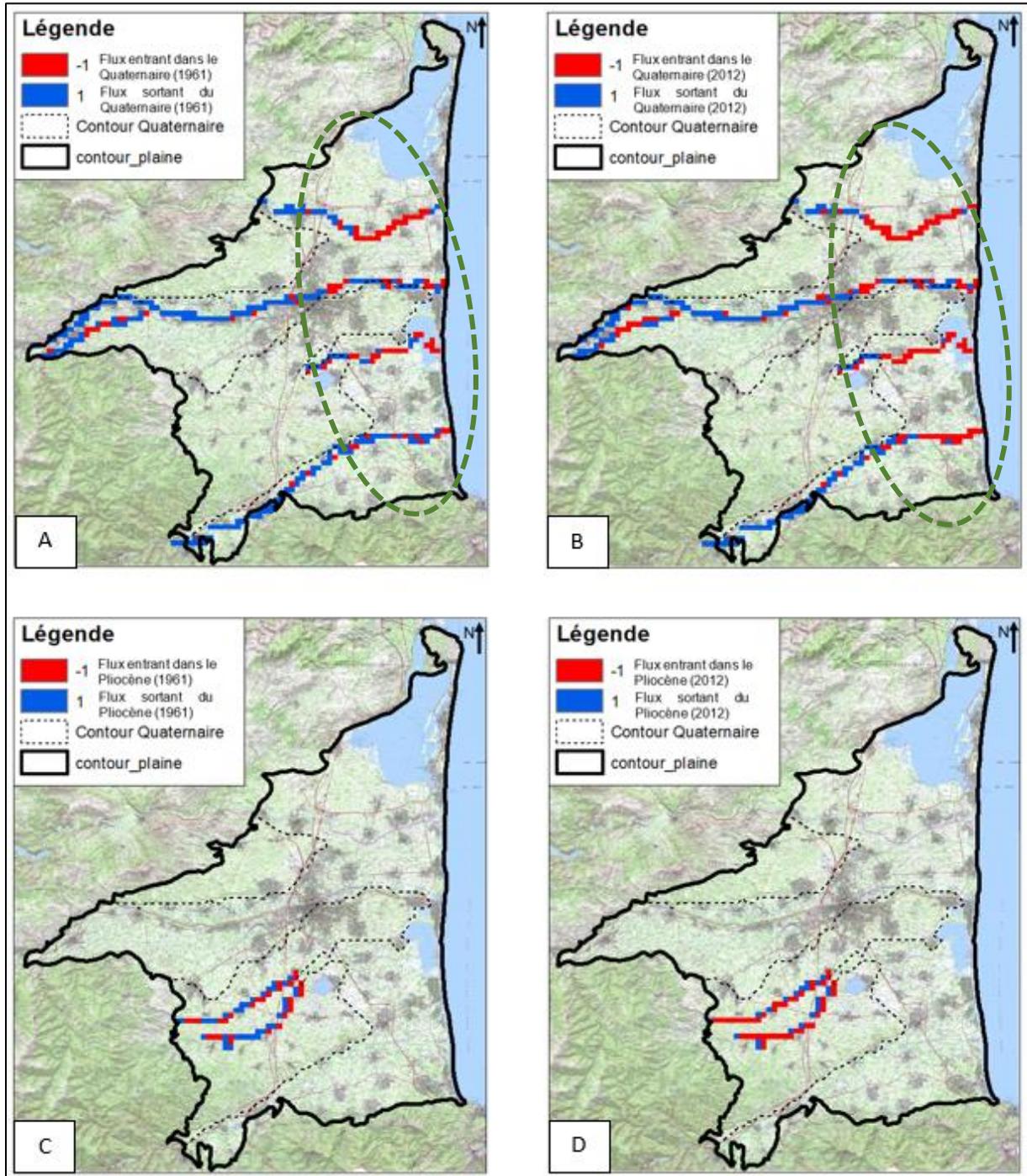


Figure 15 : Représentation des sens de flux aux limites de cours d'eau en 1961 et en 2012 (Quaternaire et Pliocène)

2.2. Carte des flux au niveau des bordures

Au niveau du calcul des flux aux bordures de l'aquifère, le système considéré est l'aquifère et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 16. Au vu de ces résultats, on remarque que :

En 1961, la nappe du quaternaire est alimentée dans sa partie amont et cette situation est inversée dans la partie avale où les flux sont plutôt orientés vers la mer. Cependant, à certains endroits localisés au Centre et au Sud, c'est la nappe du Quaternaire qui alimente respectivement le Pliocène et les formations environnantes. Ces observations sont globalement valables pour la nappe du Pliocène. En 2012, la situation semble similaire au niveau des deux nappes par rapport à la situation en 1961.

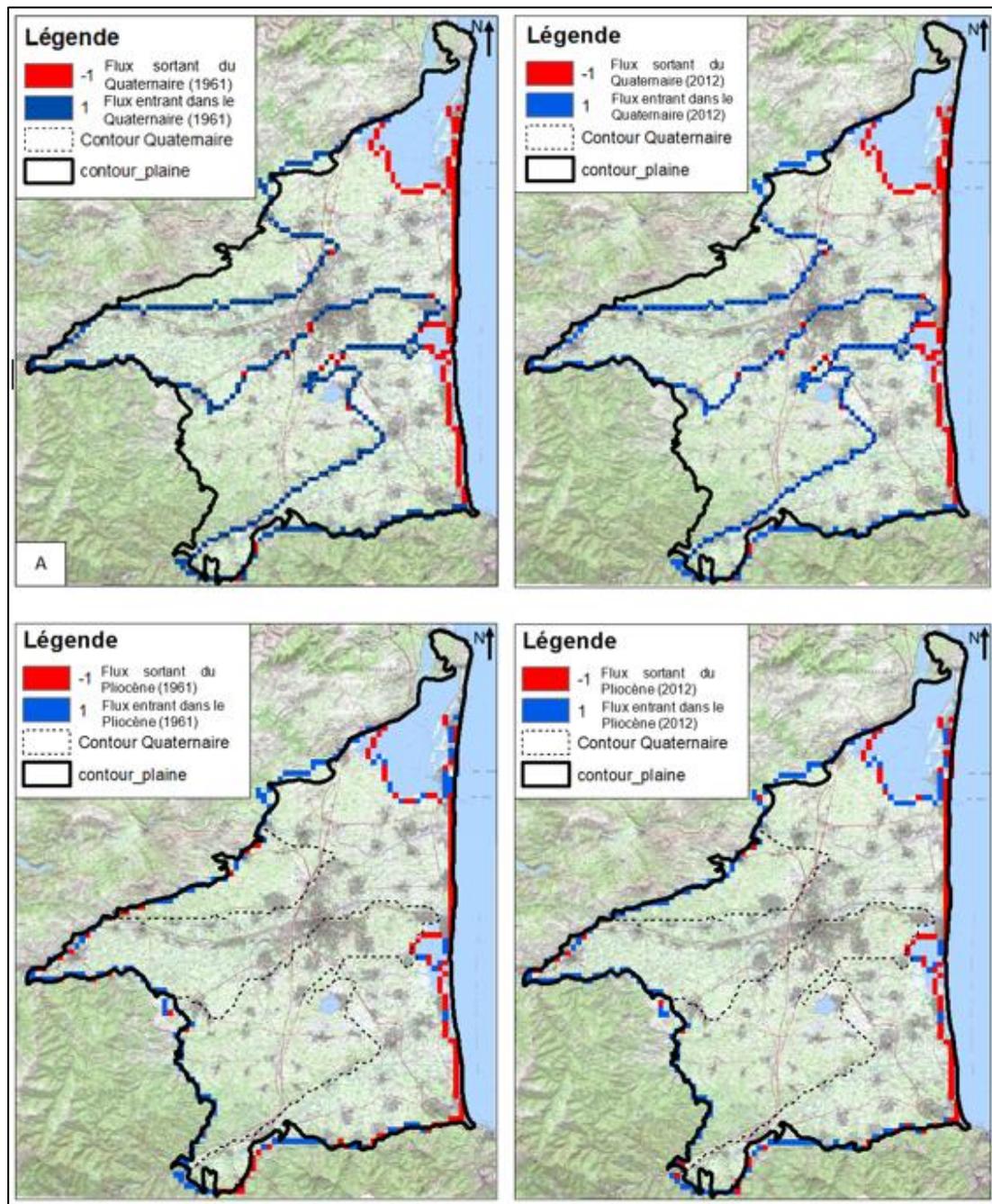


Figure 16 : Représentation des sens de flux aux bordures des aquifères en 1961 et en 2012

Toutefois, il faudrait prendre du recul sur ces approches car elles restent sommaires et basées sur l'estimation des ordres de grandeurs des flux à partir des données de piézométries et de

transmissivités présentant de fortes incertitudes. En effet, sur les bordures des aquifères, très peu de données existent (voir *Figure 8* pour la piézométrie et *Figure 14* pour les transmissivités) et de ce fait les interpolations présentent beaucoup d'erreurs. Cependant, sur la frange littorale on enregistre beaucoup de données et de ce fait les flux à cet endroit approchent un peu plus la réalité.

Afin d'évaluer les quantités de flux échangés entre l'aquifère et ses limites, un bilan hydrique a été fait sur les années 1961 et 2012 présenté dans la section suivante.

2.3. Bilan hydrique aux années 1961 et 2012

Le bilan hydrique global pour chaque aquifère est consigné dans le *Tableau 4*. Le caractère entrant ou sortant des flux présentés concernent les aquifères. Ainsi, le *Tableau 4* comporte deux grandes parties. Dans la première, figurent les valeurs des flux entrants et sortants aux limites des cours d'eaux en 1961 et 2012 pour les deux aquifères. La seconde partie concerne les flux aux limites des bordures.

Tableau 4 : Détails sur les flux entrants et sortants de l'aquifère Plio-Quaternaire

Partie 1 : Flux aux limites de cours d'eaux (m ³ /an)			
Aquifère	Quaternaire		
Années	Flux sortants	Flux entrants	Bilan
1961	1,65E+09	9,96E+07	1,55E+09
2012	1,51E+09	2,01E+08	1,31E+09
Aquifère	Pliocène		
Années	Flux sortants	Flux entrants	Bilan
1961	4,49E+06	3,03E+06	1,47E+06
2012	2,63E+06	2,64E+06	1,31E+04
Partie 2 : Flux aux limites des bordures (m ³ /an)			
Aquifère	Quaternaire		
Années	Flux sortants	Flux entrants	Bilan
1961	3,61E+09	1,31E+08	3,48E+09
2012	3,58E+09	1,37E+08	3,45E+09
Aquifère	Pliocène		
Années	Flux sortants	Flux entrants	Bilan
1961	2,54E+07	1,27E+07	1,26E+07
2012	3,16E+07	8,44E+06	2,31E+07

Les valeurs absolues des flux aux différentes limites ayant été distinguées dans le *Tableau 4*, un bilan hydrique total c'est à dire la quantité d'eau qui entre et celle qui sort du système aquifère a été établi aux années 1961 et 2012. Les résultats de ce bilan figurent dans le *Tableau 5*. La *Figure 17* ci-dessous est donc la représentation de ces valeurs globales du bassin en 1961 et 2012 (Quaternaire et Pliocène).



Tableau 5 : Récapitulatif du calcul des flux aux limites de l'aquifère

Références	Flux entrant 1961 (m3/an)	Flux sortant 1961 (m3/an)
Quaternaire et Pliocène	3,74E+09	1,80E+09
Référence :	Flux entrant 2012 (m3/an)	Flux sortant 2012 (m3/an)
Quaternaire et Pliocène	3,82E+09	1,66E+09

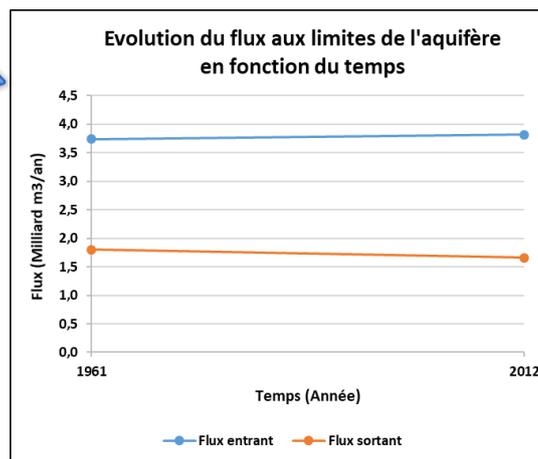


Figure 17 : Représentation de l'évolution des flux entrants et sortants aux limites de l'aquifère

Au vu de cette évaluation du bilan hydrique à partir de l'estimation des valeurs absolues des flux, on remarque que les flux entrant sont plus importants que les flux sortants en 1961 et en 2012. Aussi, ne s'intéressant qu'aux flux entrants, ils sont plus importants en 2012 qu'en 1961, ce qui est l'inverse au niveau des flux sortants. Cette observation est bien cohérente avec la réalité en ce sens que les prélèvements au sein des nappes augmentent avec le temps, ce qui influence fortement la piézométrie.

III. Résultats du diagnostic du modèle

1. Résultats de la simulation sur la période 1989 – 1995

1.1. Evolution des niveaux piézométriques en fonction du temps

Dans ce paragraphe, sont comparées les simulations effectuées en 1995 par Chabart (que j'appellerai simulations 1995 dans ce qui suit) à celles faites en 2018 dans le cadre de mon stage (que j'appellerai simulations 2018 dans ce qui suit), en conservant l'architecture du modèle de Chabart en vue de la diagnostiquer. Pour coller à l'exercice réalisé par Chabart dans le cadre de sa thèse, la simulation couvre la période allant de de Juin 1989 à Aout 1995, ce qui correspond à 74 pas de temps mensuels du modèle. Cette comparaison se fera en termes d'ordre de grandeur des niveaux piézométriques, puis en termes de variation saisonnière et portera sur neuf piézomètres pour lesquels on dispose des données observées. Etant donné que les simulations faites en 1995 existent seulement sous forme de graphes (nous n'avons pas pu retrouver les données numériques), nous les représenterons pour chaque point simulé, sur un graphe à part de celui comportant les simulations 2018 et les valeurs observées. Nous présenterons dans ce rapport seulement les résultats de trois points représentatifs de l'ensemble des situations observées à partir des neuf piézomètres (Figure 18 à Figure 19). Ces trois points représentent globalement les situations suivantes :

- Les simulations 1995 ne permettent pas toujours de reproduire les observations. C'est en particulier le cas du piézomètre 10972X137 (Figure 18)
- Les simulations 2018 sont relativement proches des observations mais les dynamiques saisonnières sont mal représentées (effet des prélèvements constants d'une année sur l'autre). C'est le cas du piézomètre 10963X0059 (Figure 19).

- Les simulations 2018 ne permettent pas de retrouver les simulations 1995, même en reprenant tout comme a fait Chabart en 1995. Ceci est surtout le cas sur le plan des évolutions annuelles. En revanche les évolutions saisonnières sont globalement d'amplitudes similaires. Le piézomètre 10912X0110 est cité en exemple (Figure 20).

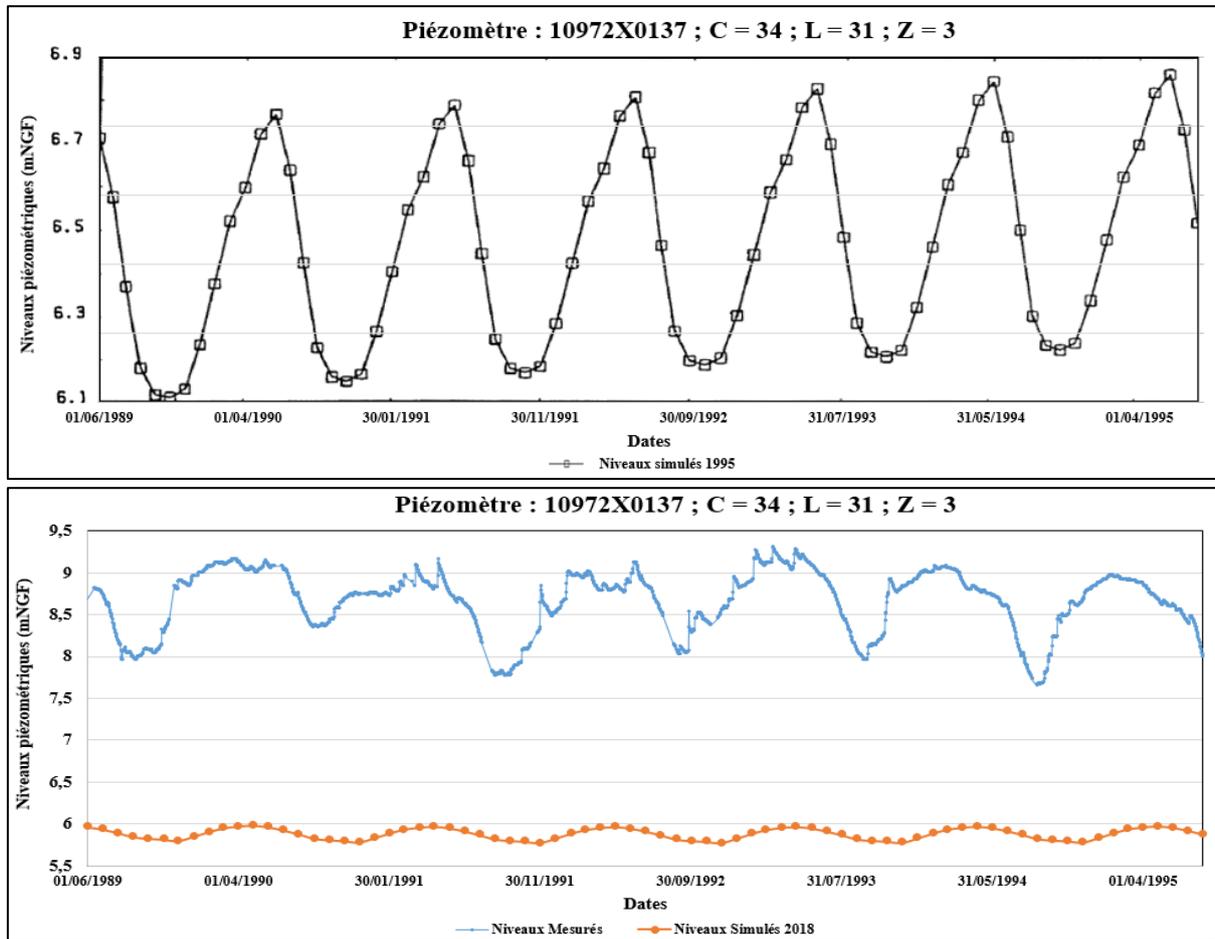
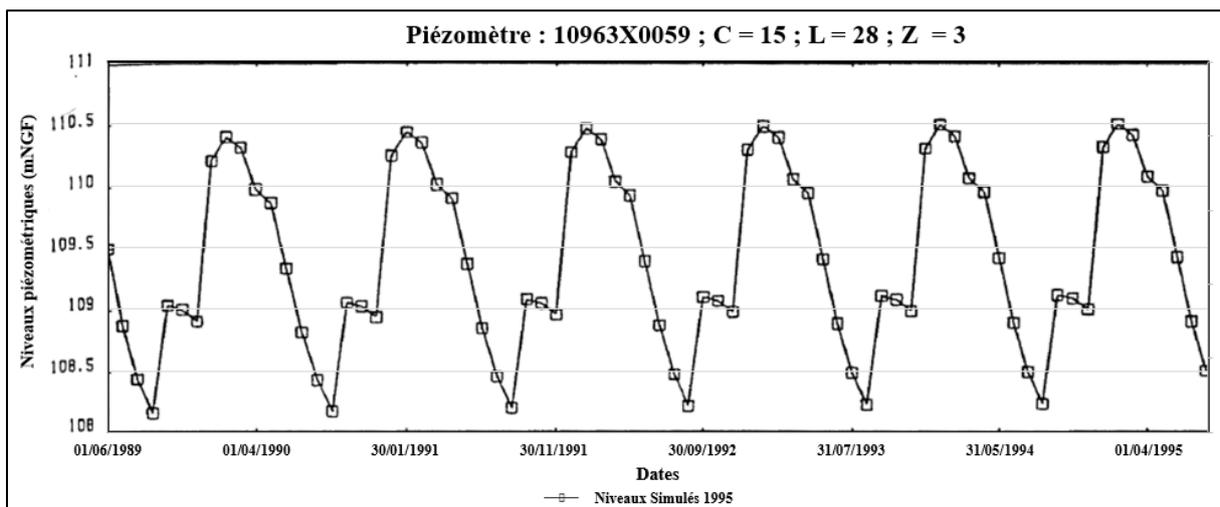


Figure 18 : Résultats du diagnostic pour le piézomètre 10972X0137



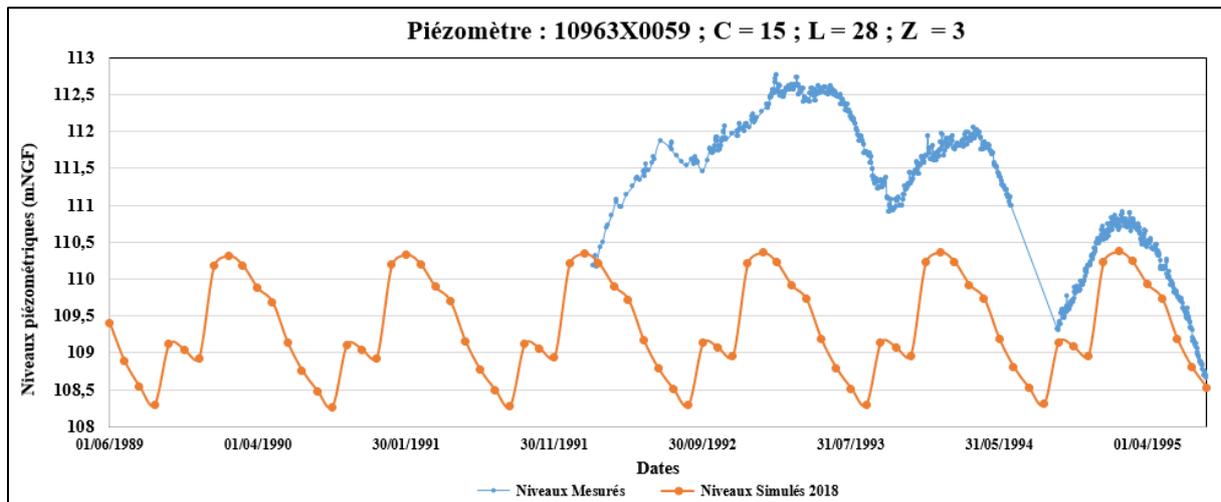


Figure 19 : Résultats du diagnostic pour le piézomètre 10963X0059

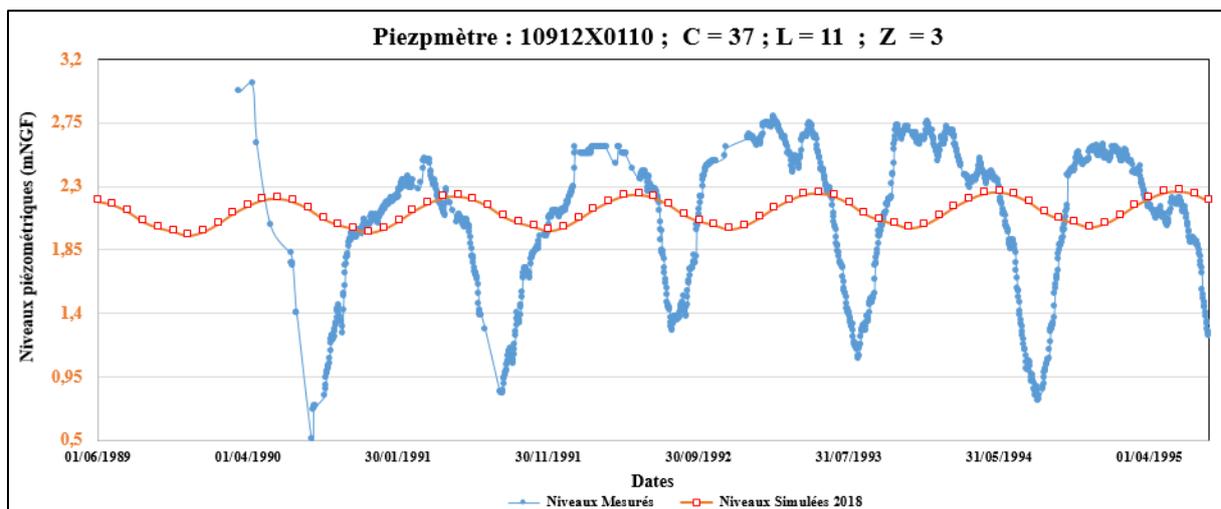
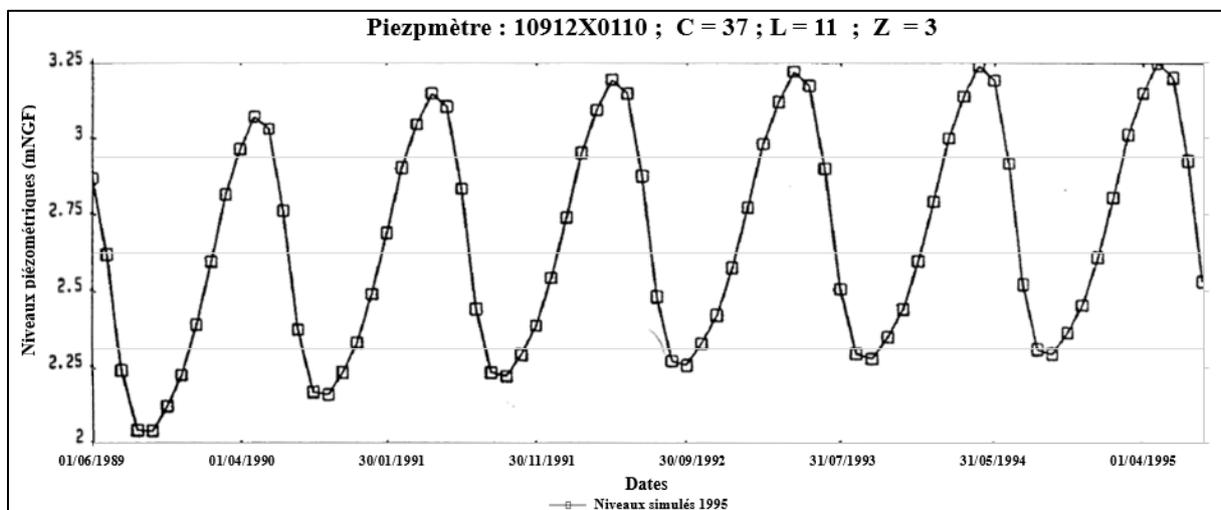


Figure 20 : Résultats du diagnostic pour le piézomètre 10912X0110

Il ressort de l'analyse de ces figures que d'une manière générale, les simulations obtenues en 1995 et celles obtenues en 2018 avec la même architecture du modèle, mais avec un module de simulation MARTHE mis à jour, sont globalement différentes à l'exception du point 10963X0059 (Figure 19) situé

au Sud-Ouest de la plaine, dans le bassin de la Canterrane (Figure 21) et pour lequel on observe une similitude entre les deux courbes simulées. Ainsi, même en utilisant les mêmes géométries, les mêmes paramètres et les mêmes données, l'application MARTHE dans version 2018 ne permet pas de reproduire les simulations qu'avait obtenues Chabart en 1995. De manière intéressante, le seul point sur lequel les simulations sont très proches correspond au point sur lequel ont été effectuées de nombreuses expériences dans le cadre de la thèse de Chabart et sur lequel elle a conduit le calage du modèle.

1.2. Spatialisation de la qualité des simulations

Sur la Figure 21, sont localisés les neuf points qui ont servi pour la comparaison des simulations aux observations de piézométrie. Sur cet ensemble, les deux points pour lesquels on a simulé des dynamiques piézométriques similaires en 2018 et en 1995 sont figurés en vert. Ils sont situés au Sud-Ouest (site de Terrats : point **10963X0059**) et au Nord (site de SaintHippolyte : **10911X0139**).

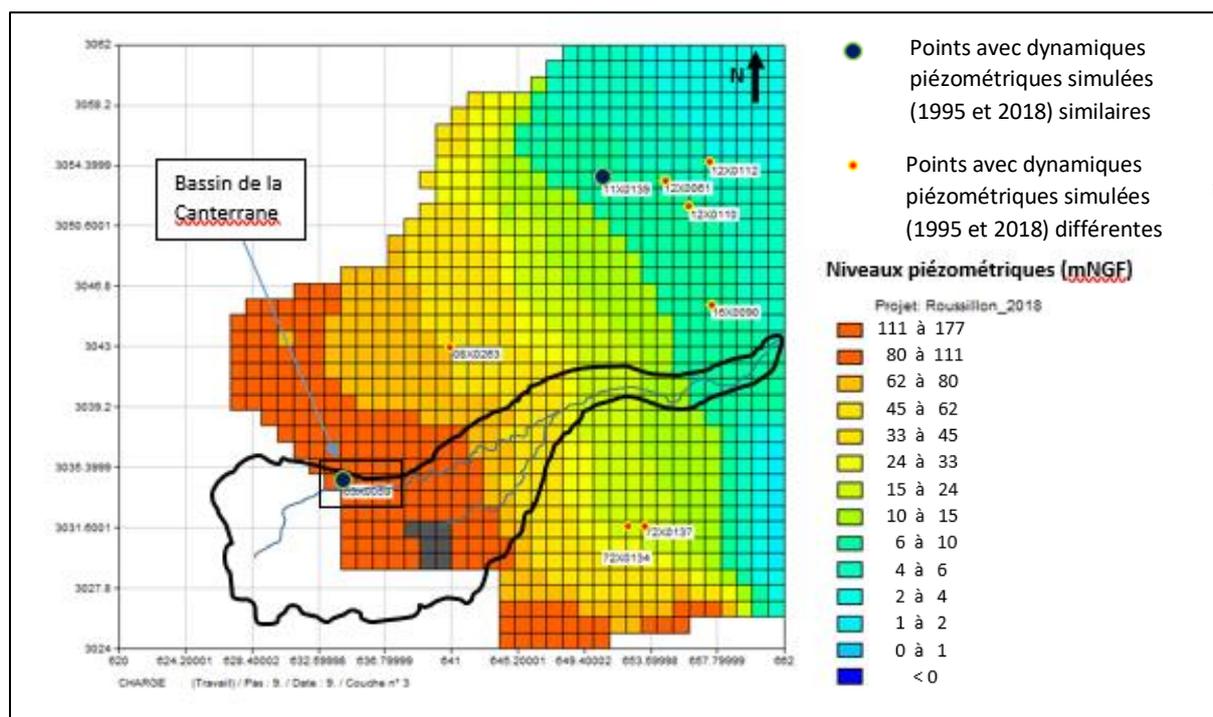


Figure 21 : Localisation des piézomètres de comparaison des simulations et observations

Les simulations 2018 (réalisées avec le paramétrage et suivant la méthodologie adoptée par Chabart en 1995) n'ayant pas permis de reproduire les observations (en termes de dynamique saisonnière) sur la période 1989 – 1995, de nouvelles simulations ont été conduites sur une période plus complète et s'étendant jusqu'à nos jours (1959 – 2013), dont les résultats sont présentés à continuation.

2. Résultats du diagnostic sur la période 1959 – 2013

Dans ce paragraphe, sont présentés les résultats de simulation après avoir imposé une recharge calculée sur la période allant de Janvier 1959 à Décembre 2013, suivant la méthode décrite précédemment (sections Diagnostic du modèle existant sur la période 1959 – 2013, Page 14).

2.1. Initialisation des charges hydrauliques

Les charges hydrauliques initiales ont été obtenues après une transformation sous forme de fichiers de grilles des cartes piézométriques disponibles en 1961. Puis, ces fichiers ont été importés dans le logiciel MARTHE (Figure 22).

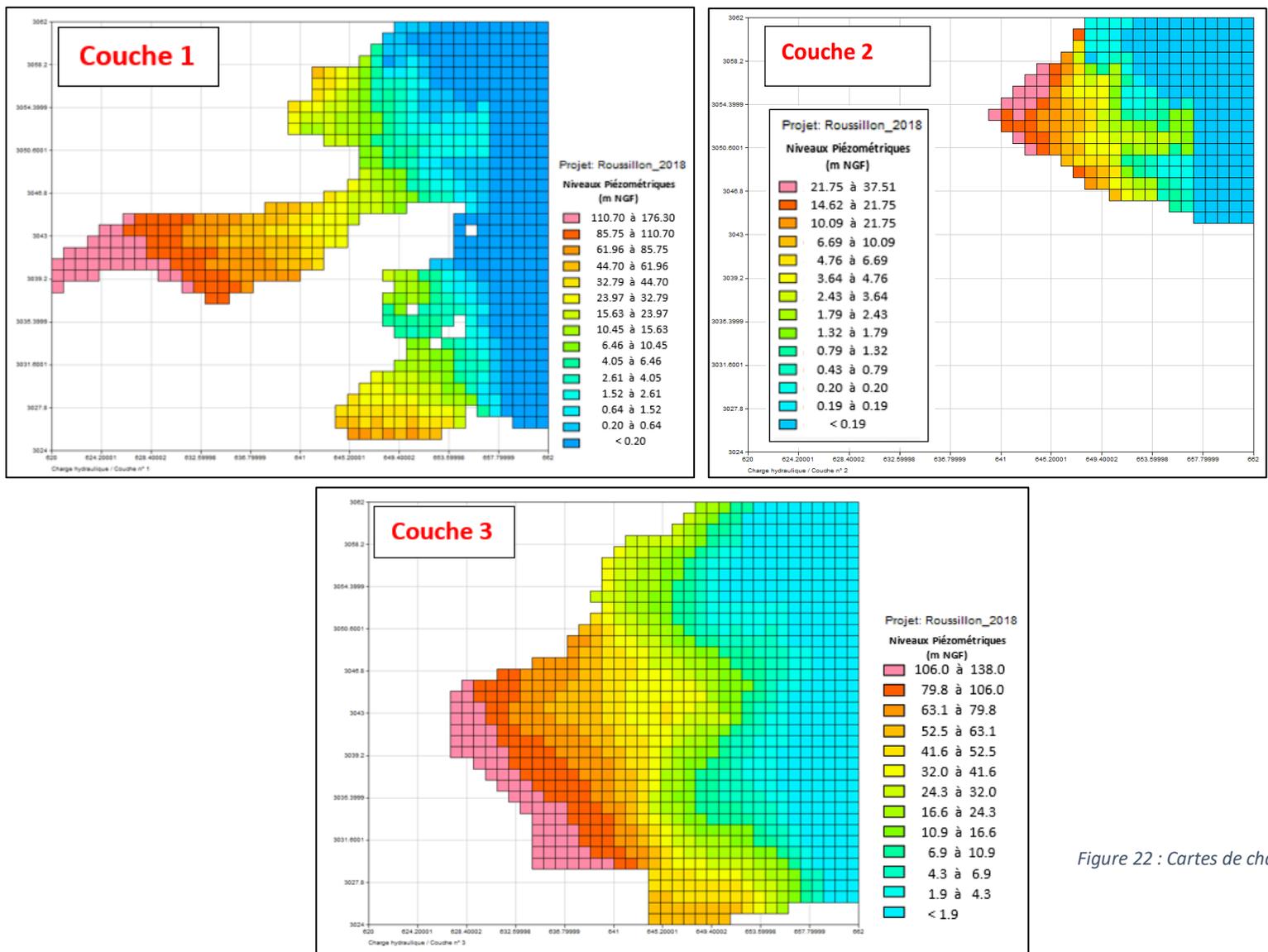


Figure 22 : Cartes de charges hydrauliques initiales (1961) des trois couches

2.2. Choix de la période de comparaison

Pour avoir une période de représentation ayant la même référence temporelle pour toutes les chroniques piézométriques simulées, les longueurs des chroniques observées des 25 piézomètres (sur les 41 au total) pour lesquels on dispose des chroniques d'observations qui recoupent la période de simulation ont été représentées sur un même graphe (Figure 23). La période choisie (15 ans allant du 22/12/1998 au 31/12/2013 représentée par le cadre vert sur la Figure 23) correspond à celle où l'on a le plus de données. Cependant, les piézomètres suivants ne seront pas concernés (**10911X0139**, **10912X0118**, **10972X0088** et **10972X0134**) puisque leur période d'observation se situe quasiment en dehors de la période choisie (et que par ailleurs ils ne sont plus suivis depuis longtemps).

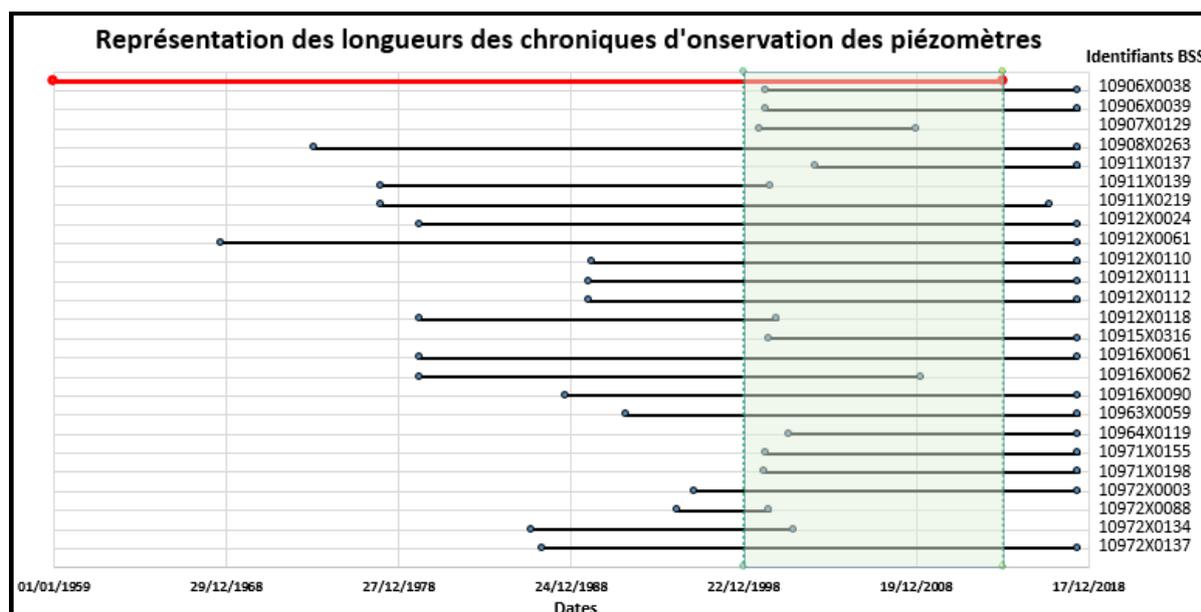


Figure 23 : Représentation des longueurs des périodes d'observation des piézomètres

2.3. Comparaison des niveaux piézométriques simulés et observés avant calage

Nous présentons ici les résultats pour cinq points (sur les 21) pour lesquels il existe un écart considérable entre les observations et les simulations. Ces points ne sont pas forcément ceux qui ont été présentés précédemment (dans la section diagnostic sur la période 1989 – 1995).

✓ Quaternaire ou couche 1 :

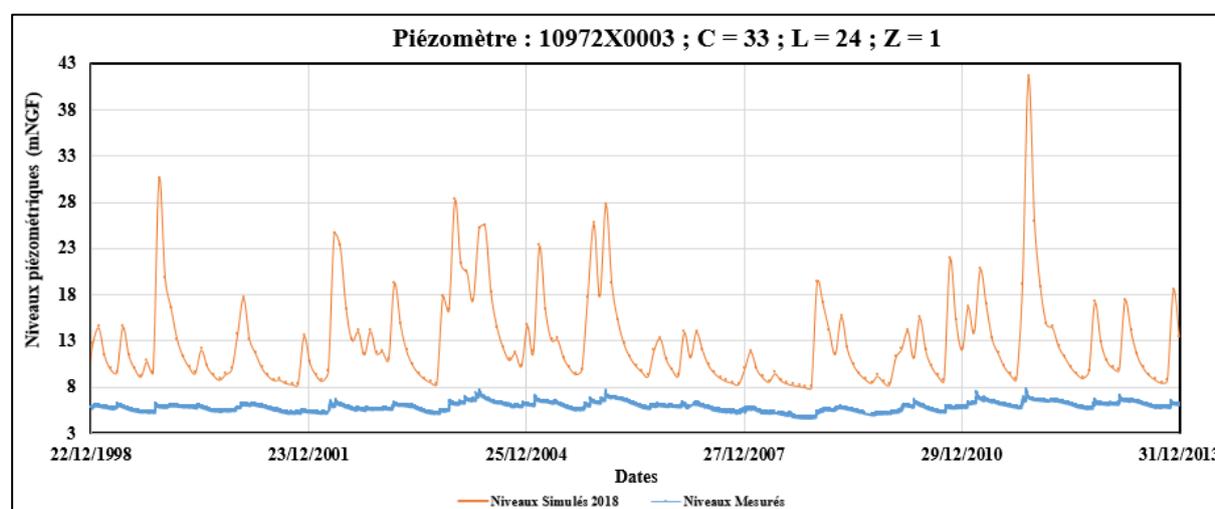


Figure 24 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10972X0003

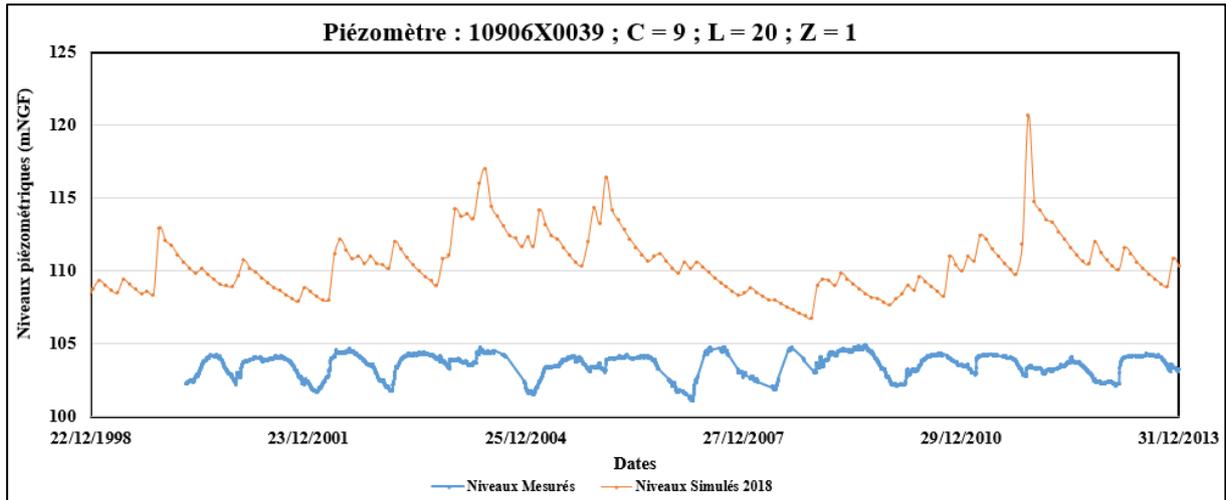


Figure 25 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10906X0039

✓ **Pliocène de la Salanque ou couche 2 :**

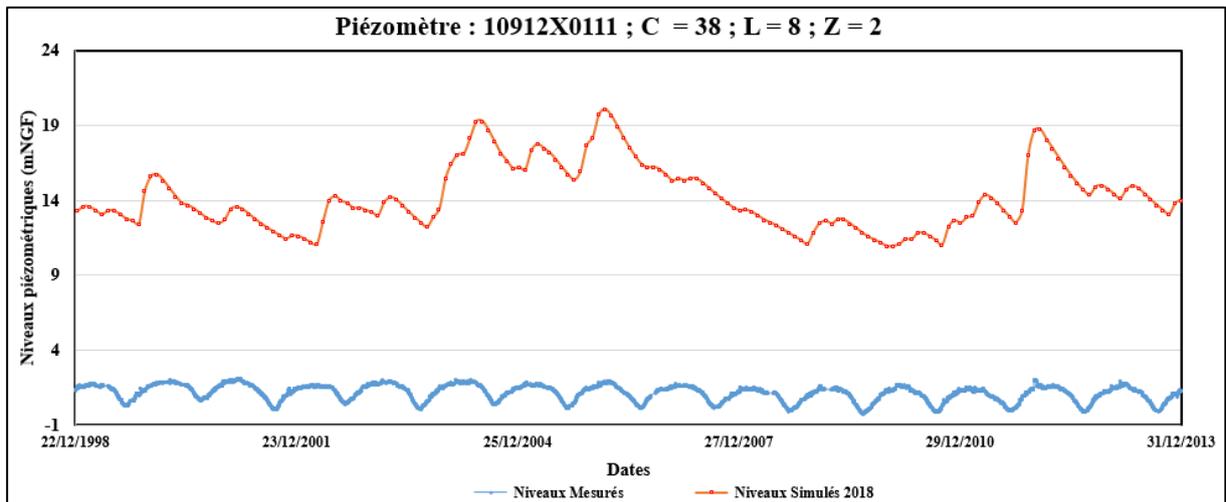


Figure 26 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10912X0111

✓ **Pliocène profond ou couche 3 :**

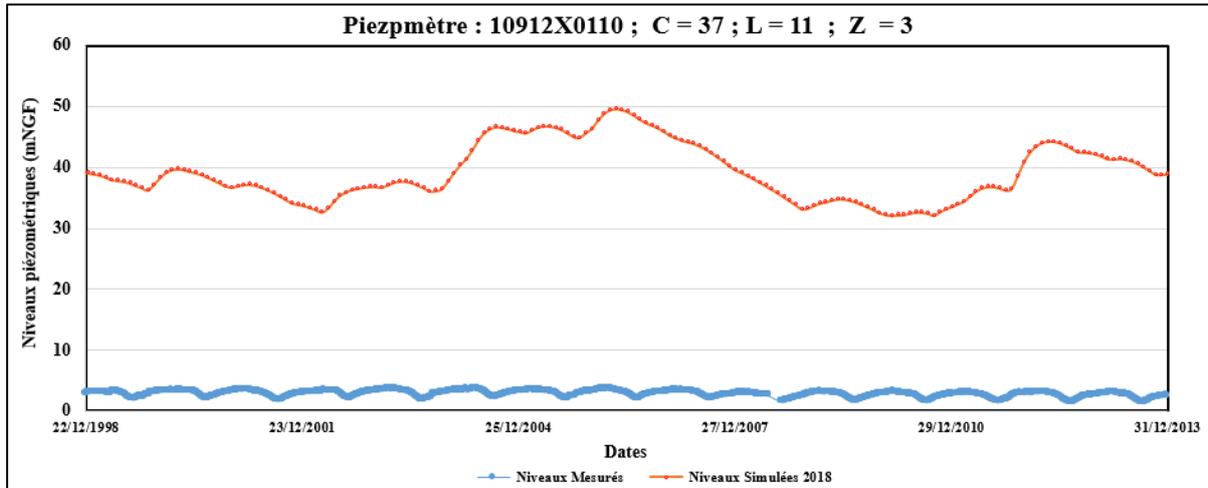


Figure 27 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10912X0110

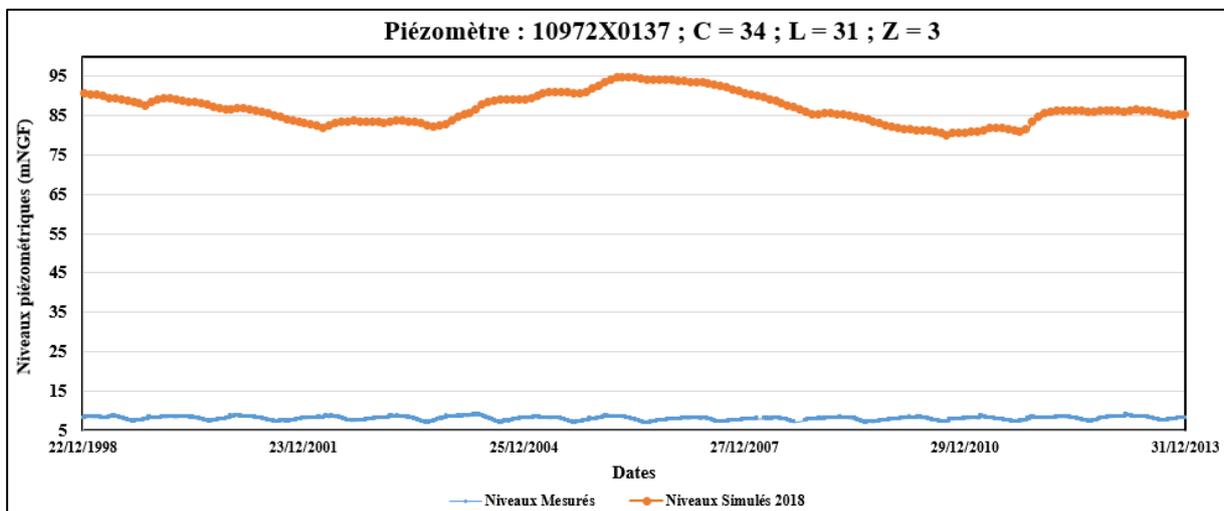


Figure 28 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur le piézomètre 10972X0137

Ces résultats montrent qu'en imposant de nouvelles recharges au modèle, les niveaux piézométriques simulés sont considérablement plus élevés pour l'ensemble des points que les valeurs observées (et globalement reproduites avec la recharge proposée par Chabart). A ce stade, plusieurs facteurs peuvent entrer en ligne de compte pour expliquer cette augmentation excessive des niveaux piézométriques simulés : 1) des paramètres hydrodynamiques non adaptés (perméabilité, coefficients d'emmagasinement captif et libre etc.) ; 2) des débits de prélèvements non réalistes ; 2bis) une surestimation de la recharge imposée ; 3) un schéma de calcul du modèle non adapté (représentation en pseudo-3D : c'est un schéma de calcul dans lequel les épontes ne sont pas représentées par des couches ayant des propriétés hydrodynamiques différentes des couches aquifères (on peut seulement leur imposer des flux) et 4) une architecture de modélisation (nombre et géométrie des couches non adaptée).

2.4. Bilans hydriques aux années 1961 et 2012 en condition de basses eaux

Le bilan hydrique issu de la modélisation sous le logiciel MARTHE après calage manuel a été effectué à partir du fichier de résultats « bilan.deb » qui donne l'historique des flux globaux (dans toutes les couches) à chaque pas de temps. Il s'agit des flux calculés aux mailles à charges imposées ainsi que les flux de débordements dans les cours d'eaux. Ainsi, pour chacune des années 1961 et 2012, les valeurs globales des flux entrants et sortants de l'aquifère (Pliocène et Quaternaire) ont été calculées et les résultats sont consignés dans le tableau suivant (*Tableau 6*).

Tableau 6 : Récapitulatif du bilan hydrique à partir du logiciel MARTHE

Années	1961	2012
Flux entrant (m3/an)	1,13E+07	0
Flux sortant (m3/an)	3,63E+07	1,20E+08
Balance (m3/an)	2,50E+07	1,20E+08

On remarque de façon générale que les flux sortants sont élevés que les flux entrants pour chacune des années. Aussi, les flux sortants sont plus élevés en 2012 qu'en 1961, ce qui est contraire au niveau des flux entrants. Ceci semble ne pas être cohérent avec les observations à la suite de l'évaluation des flux à partir des cartes de piézométries et de transmissivité (*Tableau 4*).

2.5. Comparaison des cartes piézométriques du Pliocène des années 90

Pour illustrer de façon spatiale les observations déjà faites, une carte piézométrique simulée traduisant la situation en 1990 a été représentée (*Figure 29*). Celle-ci a été superposée à la carte piézométrique observée en 1990 afin de les comparer. L'année 1990 a été choisie car les données de prélèvements entrées dans le modèle correspondent à cette année (Chabart, 1995). On pourrait donc penser que la simulation devrait être le plus proche de la réalité à cette période.

On remarque que si les orientations des courbes sont similaires de manière générale, les deux cartes ne se superposent pas parfaitement partout. Car, des différences significatives sont visibles dans les parties Sud-Est et Sud-Ouest de la plaine. Dans le Sud-Est, les niveaux piézométriques simulés sont inférieurs à 20 mNGF et présentent en moyenne 30 m d'écart avec les niveaux réels qui varient entre +10 mNGF et +20 mNGF. Aussi, le Sud-Ouest est un secteur pour lequel les orientations des courbes simulées et observées diffèrent fortement.

Système de projection : Lambert zone II carto Sud France. Unité de mesure : le kilomètre

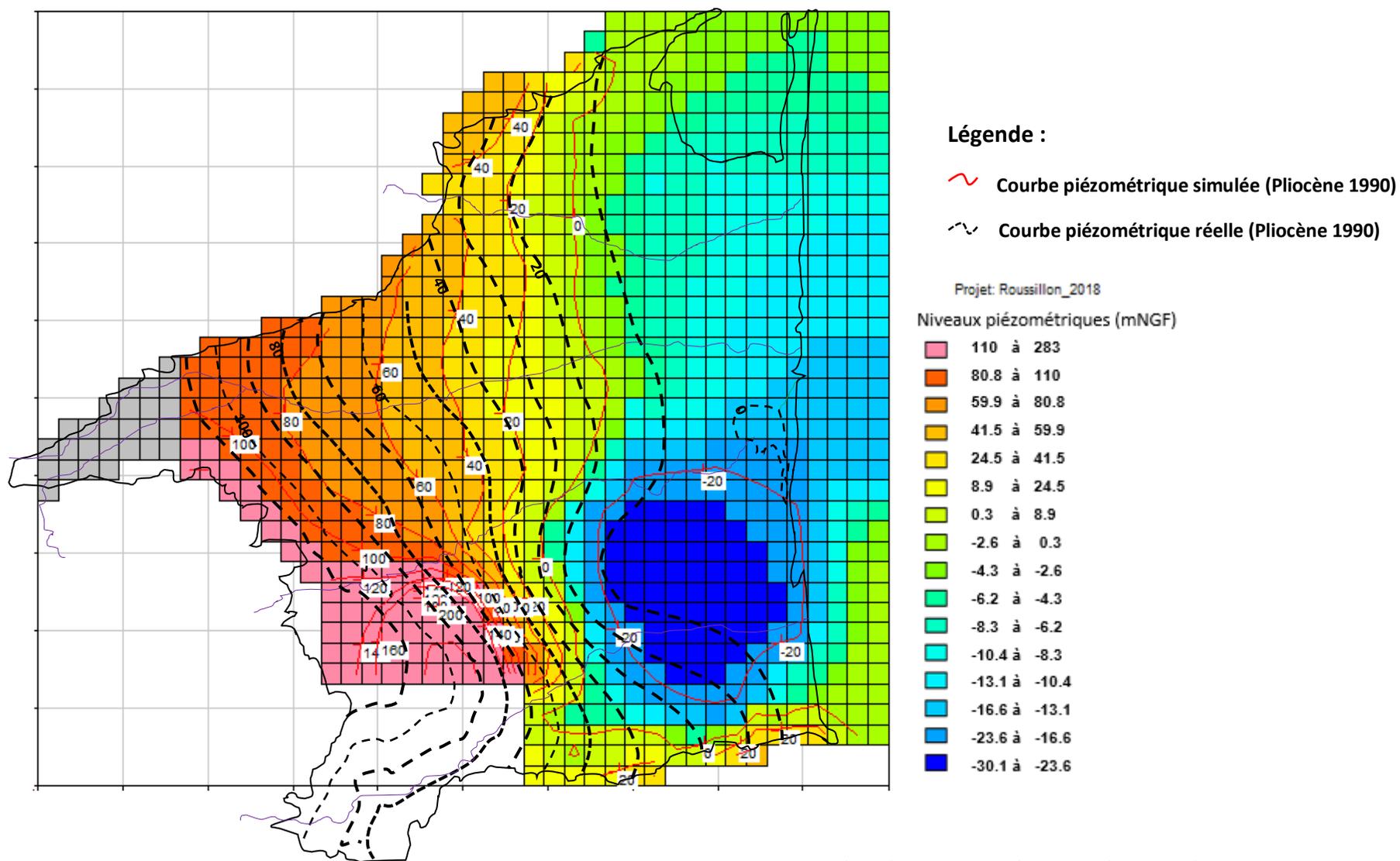


Figure 29 : Comparaison des cartes piézométriques observée et simulée du Pliocène en 1990

DISCUSSIONS

La caractérisation du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère du Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon a consisté d'une part à compléter la base de données hydrogéologiques et hydrogéochimiques et à la valoriser notamment en estimant les flux en ses limites et d'autre part à diagnostiquer le modèle numérique existant.

Les flux estimés aux limites de l'aquifère par la méthode de Darcy montrent que d'une manière générale, au niveau des bordures, l'aquifère est alimenté par les formations environnantes dans sa partie amont tandis qu'en aval, il est drainé en direction de la mer. L'analyse des interactions avec les cours d'eau montre qu'ils ont tendance à être alimentés par l'aquifère en amont, mais que cette situation s'inverse en aval, où ils alimentent plutôt l'aquifère. Les situations en 2012 et 1961 montrent que les flux entrants dans l'aquifère sont plus élevés que ceux de 1961 alors que les flux sortants sont élevés en 2012. Ce phénomène est probablement lié aux prélèvements qui sont de plus en plus importants au cours du temps, surtout dans la partie Est de la plaine. Toutefois, cette analyse se base sur la comparaison de deux situations instantanées et nécessiterait d'être confortée par une caractérisation dynamique de l'évolution entre les deux périodes. De plus, les données ayant servi à cette estimation sont entachées d'une forte incertitude liée à la qualité et à la distribution des points de mesure de la piézométrie.

Ensuite, le diagnostic du modèle sur une courte période (1989 – 1995) puis, sur une longue période (1959 – 2013) a permis de tester sa capacité à reproduire les niveaux piézométriques observés dans les aquifères de la plaine du Roussillon notamment le Quaternaire et le Pliocène.

Il est ressorti de cette étude que d'une manière générale, en conservant la même architecture que celle proposée par Chabart en 1995 dans le cadre de sa thèse, le modèle simule des niveaux piézométriques qui diffèrent de ceux qu'avait obtenu Chabart en termes d'ordre de grandeur et aussi en termes de variations saisonnières. Ceci montre que celle-ci n'est pas suffisamment représentative pour reproduire correctement le comportement de l'aquifère. De plus, nous avons constaté que l'évolution du modèle MARTHE n'améliore pas les performances du modèle et ne facilite pas sa réutilisation. Seul le point 10963X0059 situé dans le bassin de la Canterrane, au Sud-Ouest de la plaine n'est pas dans cette situation. Cela est dû au fait qu'il s'agit du piézomètre où ont été effectuées les expériences et pour lequel le calage a été effectué correctement.

Par ailleurs, en imposant une chronique de recharge sur une longue période et calculée avec les données météorologiques, on obtient des niveaux piézométriques beaucoup plus élevés que les niveaux observés. Ceci est sans doute dû au calage des paramètres hydrodynamiques qu'il faudrait reprendre pour essayer d'améliorer la performance du modèle.

En outre, le modèle adopte une géométrie de couches continues avec une représentation en pseudo-3D c'est-à-dire que les épontes sont représentées par des couches ayant les mêmes propriétés que les formations aquifères et pour lesquelles on ne peut que jouer sur les flux pour représenter leur caractère peu perméable. La version actuelle de MARTHE permet de représenter ces épontes avec leurs caractéristiques propres, mais il n'était pas envisageable de reconstruire un modèle de ce type dans le temps imparti.

De plus, la considération d'une géométrie des couches continues ne semble pas être adaptée compte tenu des connaissances que l'on a actuellement sur ces formations. En effet, les observations faites dans de nombreux forages montrent que, les formations d'âge Pliocène sont constituées d'une alternance de niveaux sableux et argileux comme l'indiquent la figure ci-dessous (*Figure 30*) (section de

carotte d'un forage) et la coupe technique de l'ouvrage 10972X0075 (Figure 44) en annexe 3. Sur cette image de carotte obtenue lors de l'exécution d'un forage exploitant la couche du Pliocène profond dans la commune de Saint-Cyprien, on peut remarquer qu'entre 56.80 m et 59.60 m, on retrouve un niveau argileux au sein duquel s'intercale un niveau sableux entre 57.80 m et 58.21 m. Ainsi, pour se rapprocher donc de la réalité, il faudrait prendre en compte cette variation lithologique verticale au niveau des couches.

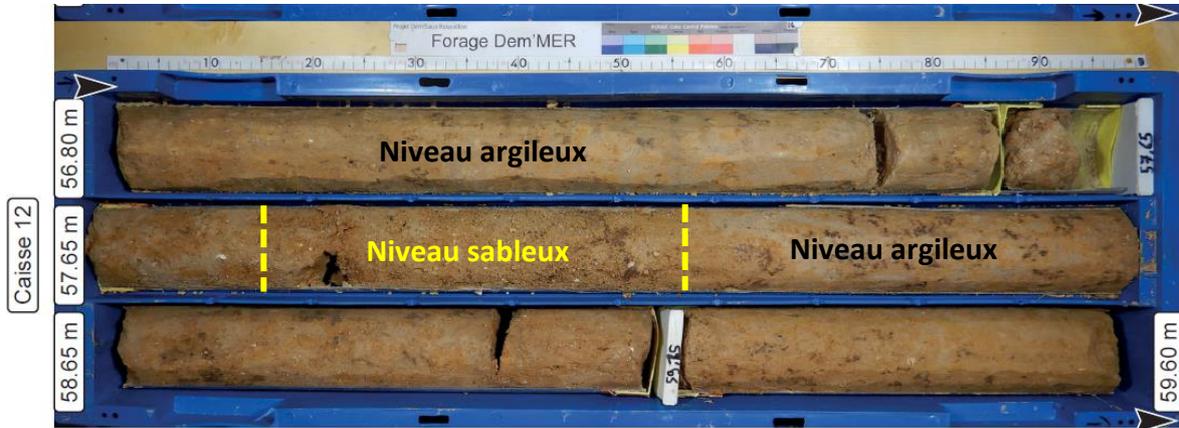


Figure 30 : Observation d'une alternance de niveaux sableux et argileux dans un forage réalisé à Saint-Cyprien

Par ailleurs, dans certains forages, les crépines ne sont pas placées devant tous les niveaux sableux, ce qui a un impact sur les valeurs des paramètres hydrodynamiques que l'on en déduit tels que la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et la perméabilité obtenus lors des interprétations des essais de pompages. Ce sont dans la plupart des cas des valeurs apparentes. Il serait aussi bien de reprendre ces interprétations d'essais de pompage en étant capables de différencier les niveaux aquifères.

Enfin, comme on peut le remarquer sur la figure suivante (Figure 31), que les niveaux piézométriques simulés ont tendance à augmenter dans le temps et cela est pareil pour la plupart des piézomètres simulés. Alors que les niveaux observés quant à eux, diminuent avec le temps (effets des prélèvements de plus en plus importants). Cela est dû au fait que les prélèvements introduits dans le modèle sont ceux des années 90 et ceux-ci ont été considérés constants dans le temps, ce qui n'est pas réaliste et constitue le principal défaut du modèle considéré. Il faudrait donc considérer les chroniques de prélèvement réelles sur toute la période de simulation.

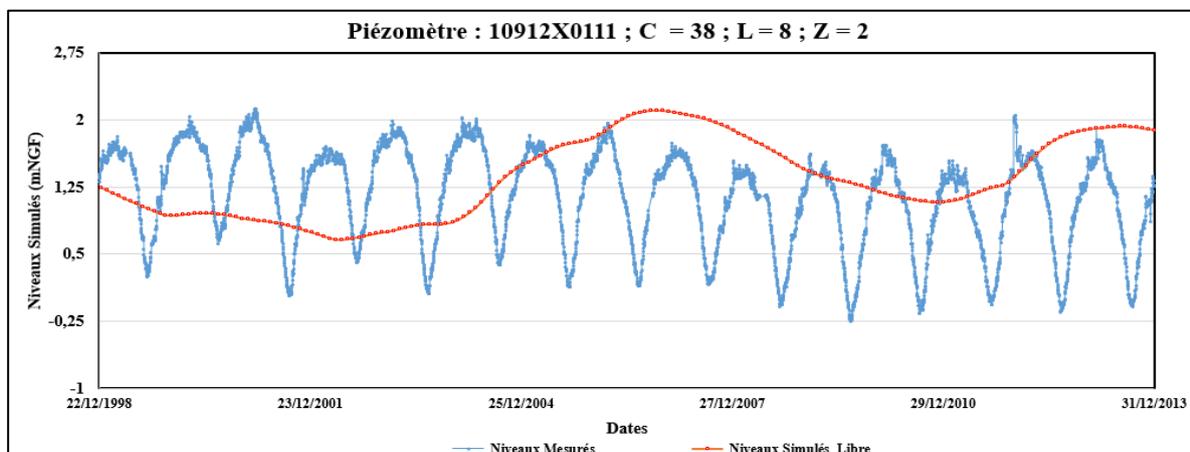


Figure 31 : Comparaison des tendances d'évolution des simulations et observations

CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était de contribuer aux activités du projet Dem'Eaux Roussillon qui vise à caractériser le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon. Pour ce faire, la première étape a consisté à compiler la base de données du projet à partir de plusieurs sources de données à savoir le Syndicat mixte, l'entreprise Aquaforage et la Banque de données du Sous-Sol du BRGM. Ceci a permis de compléter les informations relatives à l'hydrodynamisme (transmissivité, coefficient d'emmagasinement etc.) et à la chimie des eaux (pH, Température, concentration des éléments géochimiques) de l'aquifère. Ensuite, la valorisation des données hydrodynamiques a permis d'actualiser les flux aux limites des aquifères notamment au niveau des cours d'eaux et des bordures en 1961 puis en 2012. Il est ressorti que d'une manière générale, l'aquifère a tendance à se recharger par les cours d'eaux en amont et cette situation s'inverse en aval. Par ailleurs, au niveau des bordures, il apparaît de façon générale que les flux sont orientés vers l'aquifère dans sa partie amont même si à certains endroits ce n'est pas le cas et dans sa partie avale, les flux sont plutôt orientés en direction de la mer. En plus, l'évaluation des valeurs absolues des différents flux a permis de constater que les flux entrants sont plus importants en 2012 qu'en 1961 contrairement aux flux sortants qui sont plus faibles en 2012. Cette observation confirme l'influence des prélèvements (de plus en plus élevés) sur la piézométrie de l'aquifère. Enfin, le modèle existant (mis au point dans les années 90) a été diagnostiqué en vue de tester sa capacité à reproduire les niveaux piézométriques observés dans les différents niveaux d'aquifère. Ainsi, il est ressorti qu'en conservant la même architecture du modèle tel que nous l'avons récupéré, celui-ci ne parvient pas à reproduire les simulations obtenues en 1995 ainsi que les observations. Aussi, en modifiant les paramètres de forçage extérieur tels que la recharge car disposant des données météorologiques sur une longue période, ainsi que les coefficients d'infiltrations calculés à partir des indices IDPR, on remarque aussi que le modèle n'arrive toujours pas à reproduire les observations en termes d'ordre de grandeurs et de variations saisonnières. Les niveaux piézométriques simulés ont tendance à augmenter avec le temps ce qui n'est pas le cas pour les chroniques observées qui, pour la plupart ont plutôt tendance à diminuer sous l'effet des prélèvements. Cela pourrait être lié au fait que d'une part, les prélèvements ont été supposés constants dans le modèle et d'autre part, la géométrie considérée dans le modèle n'est pas représentative de la réalité car elle ne prend pas en compte les alternances entre les niveaux sableux et argileux au sein des formations et les épontes ne sont pas représentées avec leurs vraies propriétés. Et de ce fait, les valeurs des paramètres hydrodynamiques utilisés ne sont que des moyennes sur l'ensemble des formations.

Enfin, ce stage fut très enrichissant pour moi en ce sens que j'ai appris à utiliser plusieurs logiciels développés par le BRGM à savoir MARTHE (pour la modélisation hydrogéologique), ESPERE (pour le calcul des pluies efficaces et des recharges des nappes), OUAIP (pour l'interprétation des essais de pompage) et aussi d'autres fonctionnalités d'Excel pour faciliter la compilation de la base de données. Aussi, j'ai appris à me familiariser au monde professionnel et améliorer d'avantage mes relations humaines. Enfin, ce stage à vocation plutôt orienté vers la recherche, a stimulé mon envie pour la recherche et à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique des aquifères.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUNAY B.** – 2007. Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers. Thèse de doctorat en Hydrogéologie Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc. Discipline : Hydrogéologie, Ecole Doctorale : Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie, Géosciences, Hydrologie, Environnement (ED 167 - SIBAGHE).
- CABALLERO Y. et al.** – **2016.** Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport BRGM/RP-65807-FR.
- 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.
- DUVAIL C, LE STRAT P., BOURGINE B., 2001** - Atlas géologique des formations plio-quaternaires de la plaine du Roussillon (Pyrénées - Orientales). *Rapport BRGM/RP-51197-FR.*
- GADEL F.** – 1966. Contribution à l'école géologique et hydrogéologique des Corbières Orientales et des plaines de Rivesaltes, Lapalme-Caves et Sigean. Thèse de 3^{ème} cycle, Institut Géologique de Montpellier
- GADEL F., GOT H** – 1968. Sédimentation plio-quaternaire de la plaine de l'Agly – conséquences hydrogéologiques Bulletin du BRGM. Section III. Montpellier.
- GENTET V.** – 2018. Evolution de l'aquifère dans la plaine du Roussillon : de 1960 à nos jours. Rapport de stage de fin d'études pour le diplôme d'Ingénieur à l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre.
- HUFFMAN E.** – 2014. Fiche de résultats : Gestion des ressources en eau, Banque Mondiale
- HYDRIAD** – 2013. Etude des volumes prélevables des nappes Plio-Quaternaires de la plaine du Roussillon Phase 1 : Estimation des volumes prélevés. Etape 1 : Homogénéisation des données administratives.
- HYDRIAD** – 2012. Etude des volumes prélevables des nappes Plio-Quaternaires de la plaine du Roussillon Phase 1 : Estimation des volumes prélevés. Etape 1 : Homogénéisation des données administratives.
- MARDHEL V., FRANTAR P., UHAN J., MISO A., 2004** – Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. International conference on groundwater vulnerability assessment and mapping. Ustroń, Poland, 15-18 June 2004., Poland 15 to 18 June 2004
- VIDAL J-P, MARTIN E, FRANCHISTEGUY L, BAILLON M, SOUBEYROUX J-M,** - 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the safran system. International Journal of Climatology, 30(11) : 1627–1644.

WEBOGRAPHIE

<http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=BSS002MUTM> (11/09/2018)

www.brgm.fr (01/08/2018)

<http://www.brgm.fr/brgm/le-brgm-service-geologique-national/brgm-service-geologique-national>
(16/07/2018)

<http://www.banquemondiale.org/fr/results/2013/04/15/water-resources-management-results-profile>
(16/08/2018)

ANNEXES

Annexe 1 : Conception du modèle.....	D
1- Valeurs des paramètres hydrodynamiques.....	D
2- Cartes des coefficients hydrodynamiques.....	E
2.1. Cartes des perméabilités.....	E
2.2. Cartes des coefficient d'emmagasinement.....	F
2.3. Cartes des débits et prélèvement.....	H
Annexe 2 : Méthodes de calculs de la pluie efficace.....	J
1- Méthode de Thornthwaite.....	J
2- Méthode de Dingman-Hamon.....	K
3- Méthode de Dingman-Penman.....	K

ANNEXE 1 : CONCEPTION DU MODELE

1. Valeurs des paramètres hydrodynamiques

Tableau 7 : Récapitulatif des valeurs des coefficients de perméabilité

Couches	Zones	Perméabilités en 10 ⁻⁴ m/s
Couche 1	Généralement, sur l'ensemble de la plaine	0.1 à 5
	Vallée de la Têt Frange littorale et Salanque Secteur d'Elne	5 à 40
	Couche 2	Bordures latérales Ouest Sud
	Secteur St Hippolyte – St Laurent	15 à 30
Couche 3	Secteur Sud	0.01 à 0.05
	SudOuest et Centre	0.05 à 0.5
	Vallée de la Têt en amont de Perpignan	0.5 à 1
	Zone de bordure Ouest, limite avec le massif calcaire et zone d'affleurement du Pliocène	1 à 2.5
	Sous l'aquifère de la Salanque, de Salses à Ste Marie	0.5 à 2.5

2. Cartes des paramètres hydrodynamiques

2.1. Cartes des perméabilités en 10^{-4} m/s

✓ Couche du Quaternaire ou couche 1

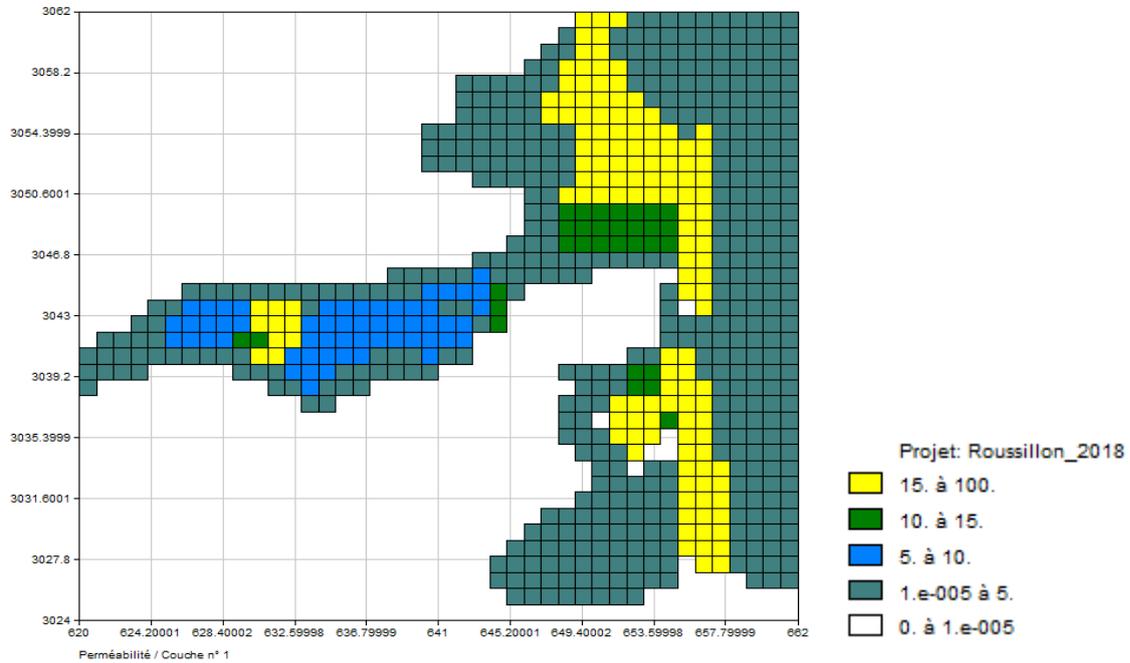


Figure 32 : Carte des perméabilités dans l'aquifère du Quaternaire

✓ Couche du Pliocène de la Salanque ou couche 2

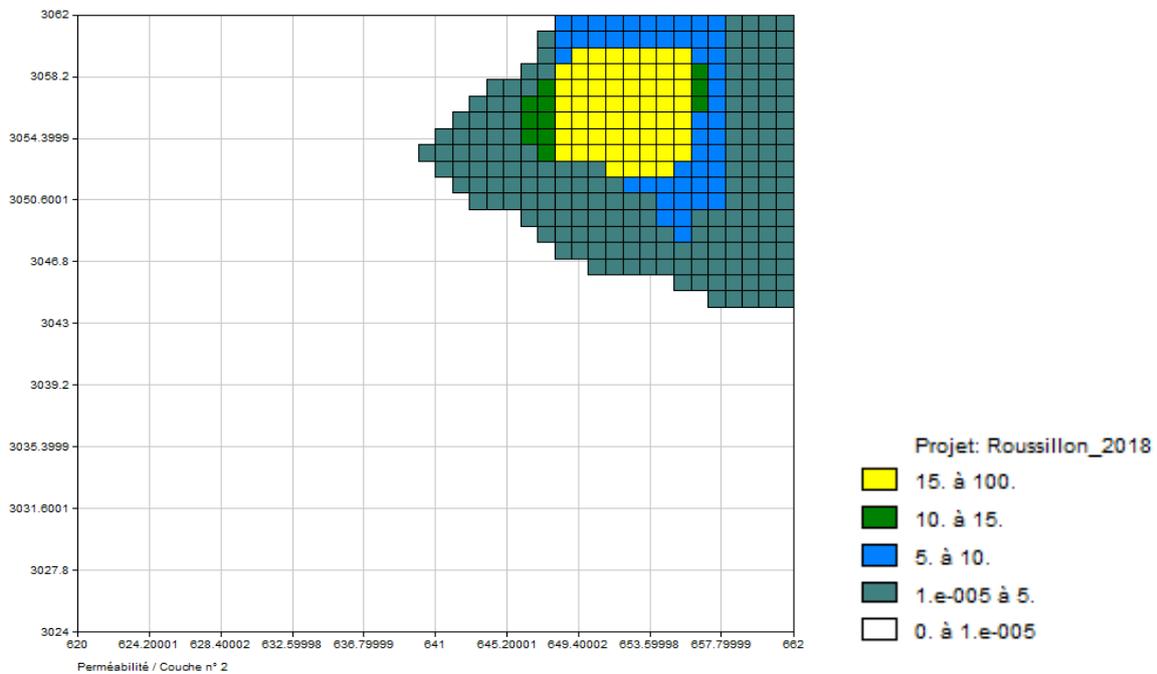


Figure 33 : Carte des perméabilités dans l'aquifère du Pliocène de la Salanque

✓ Couche du Pliocène profond ou couche 3

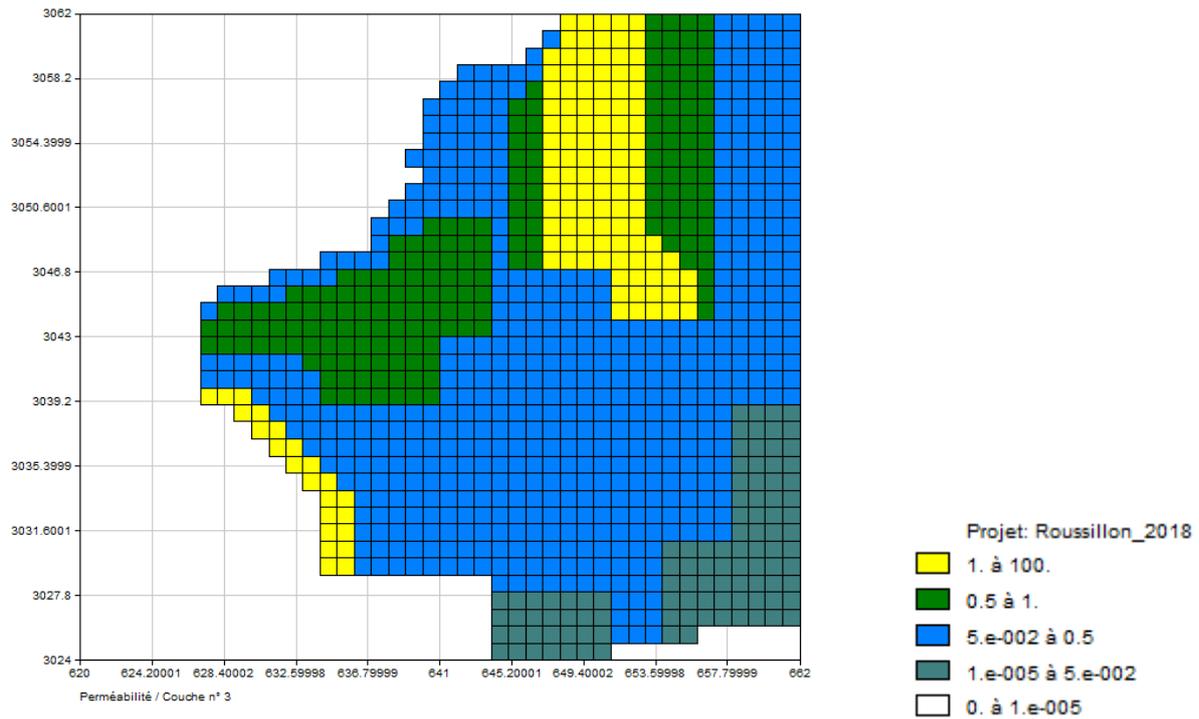


Figure 34 : Carte des perméabilités dans l'aquifère du Pliocène profond

2.2. Carte des coefficients d'emmagasinement ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

✓ Couche du Quaternaire ou couche 1

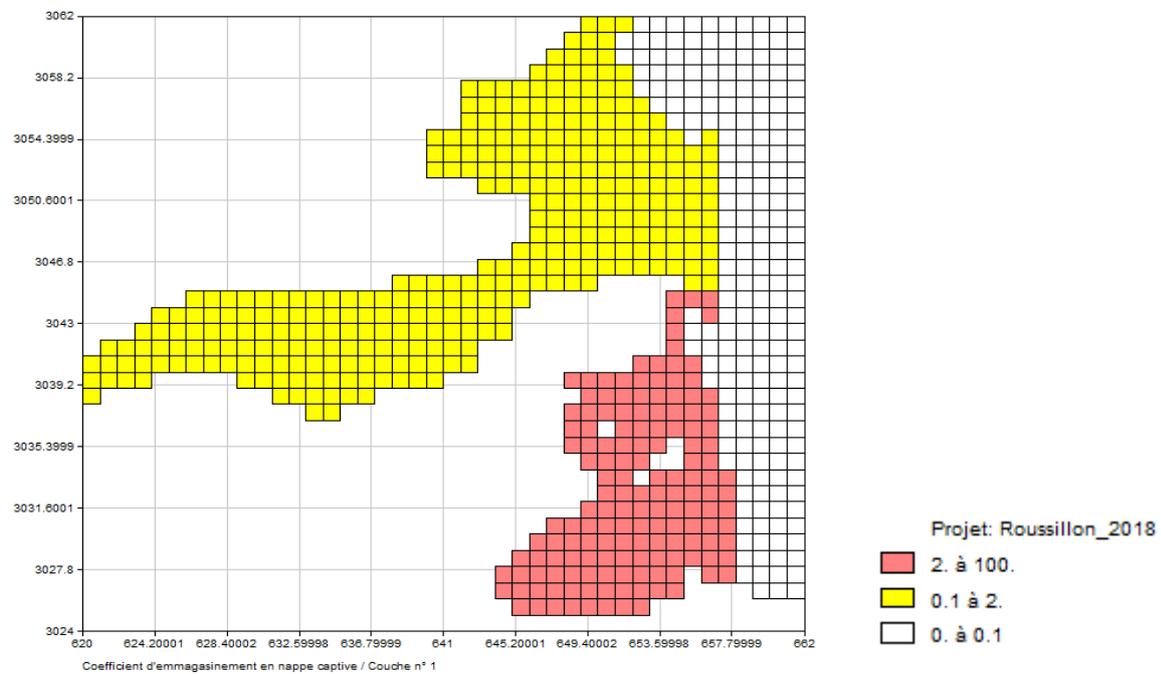


Figure 35 : Carte des coefficients d'emmagasinement dans l'aquifère du Quaternaire

✓ Couche du Pliocène de la Salanque ou couche 2

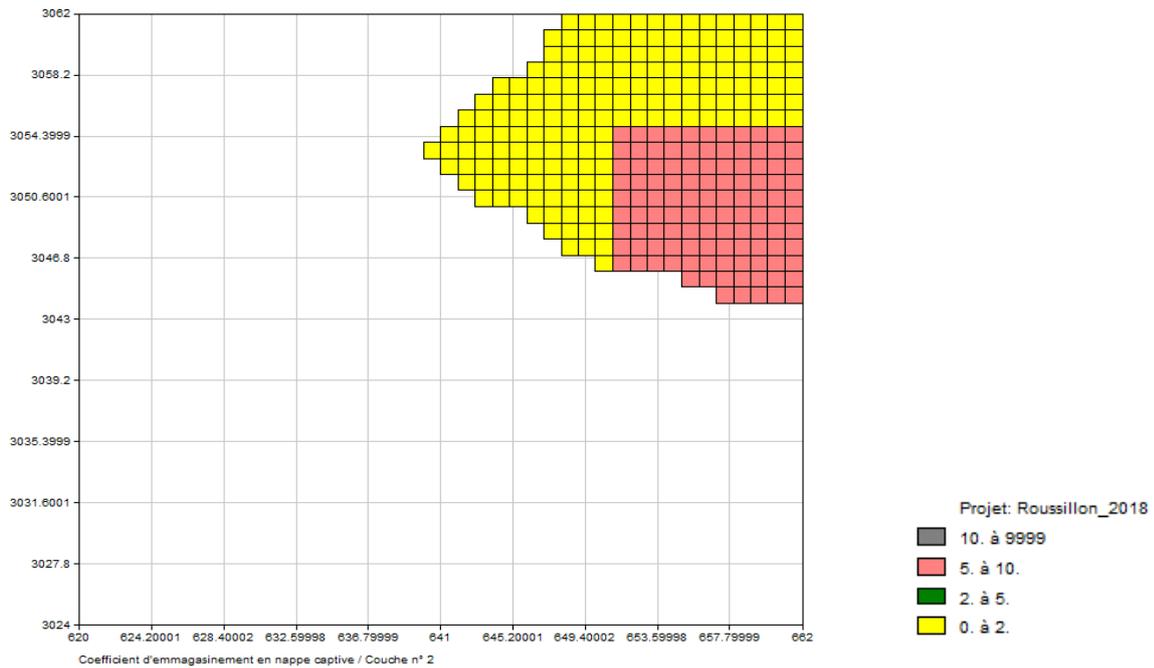


Figure 36 : Carte des coefficients d'emmagasinement dans l'aquifère du Pliocène de la Salanque

✓ Couche du Pliocène profond ou couche 3

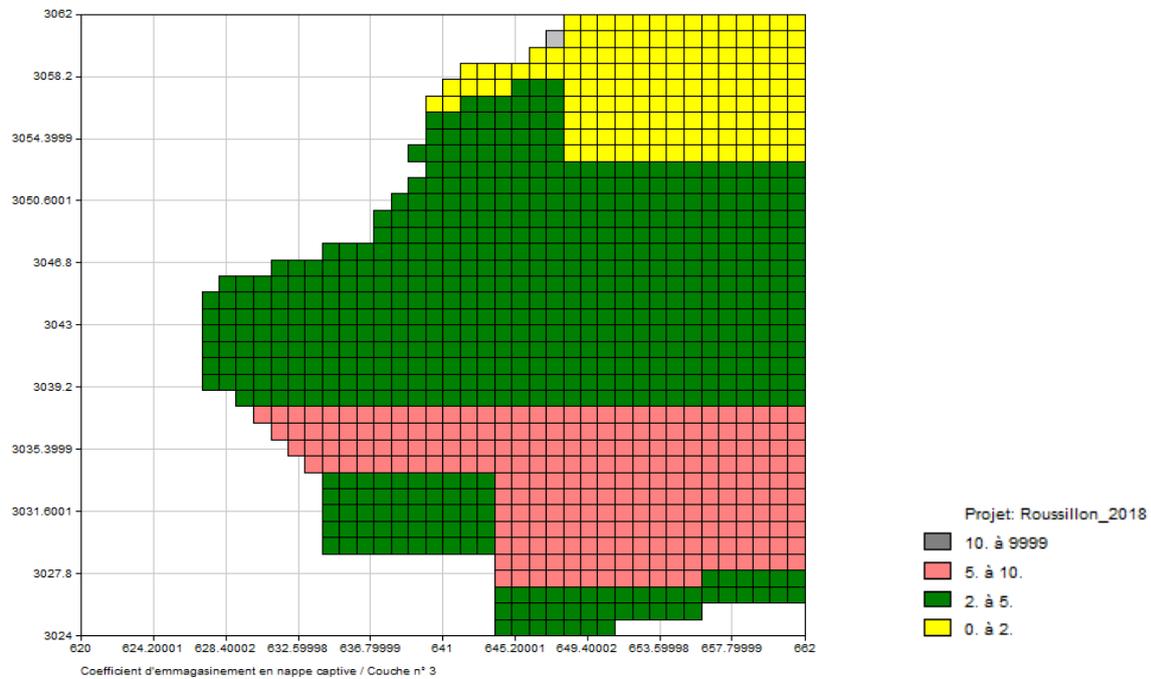


Figure 37 : Carte des coefficients d'emmagasinement dans l'aquifère du Pliocène profond

2.3. Cartes de débits de prélèvements (Mm³/an)

✓ Couche du Quaternaire ou couche 1

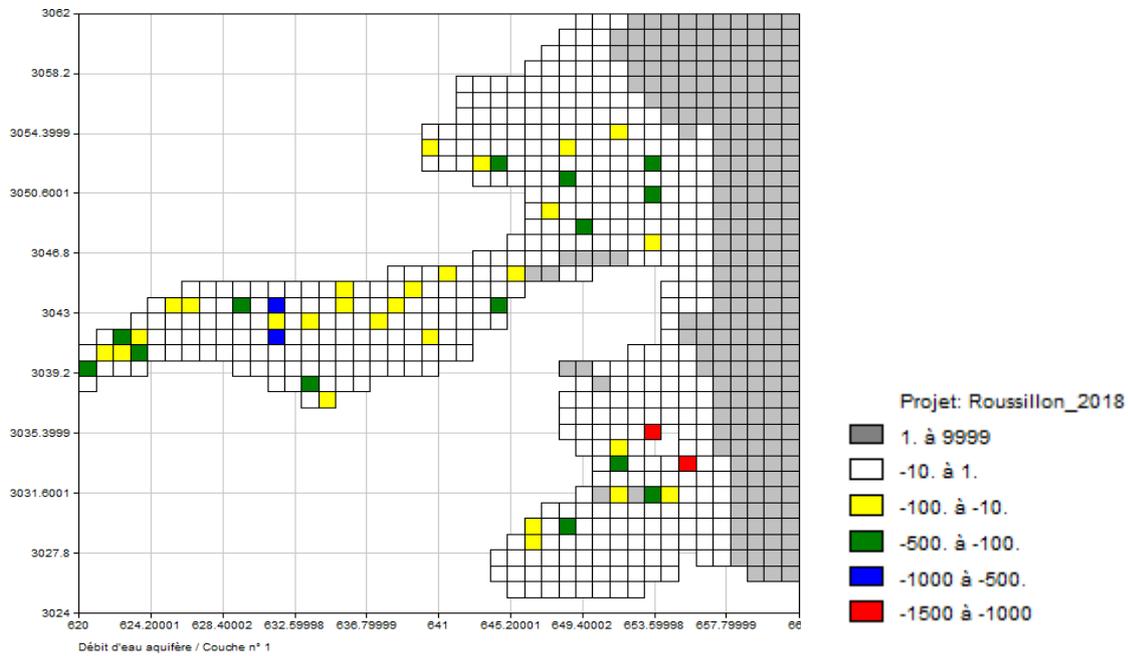


Figure 38 : Carte des prélèvements dans l'aquifère du Quaternaire

✓ Couche du Pliocène de la Salanque ou couche 2

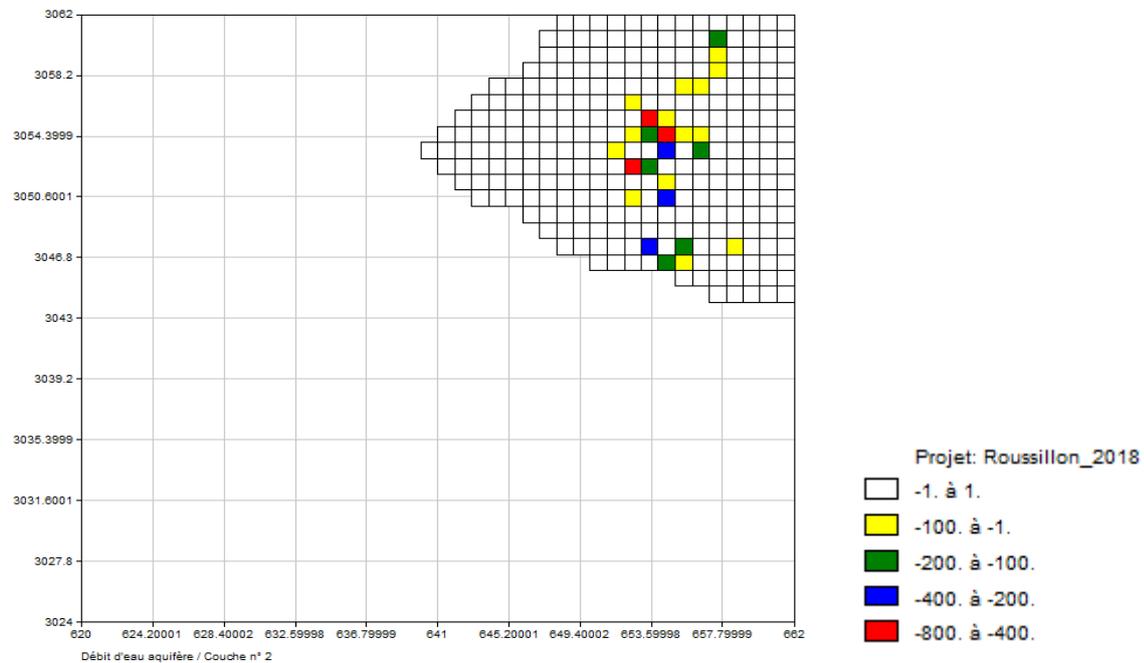


Figure 39 : Cartes de prélèvements dans l'aquifère du Pliocène de la Salanque

✓ Couche du Pliocène profond ou couche 3

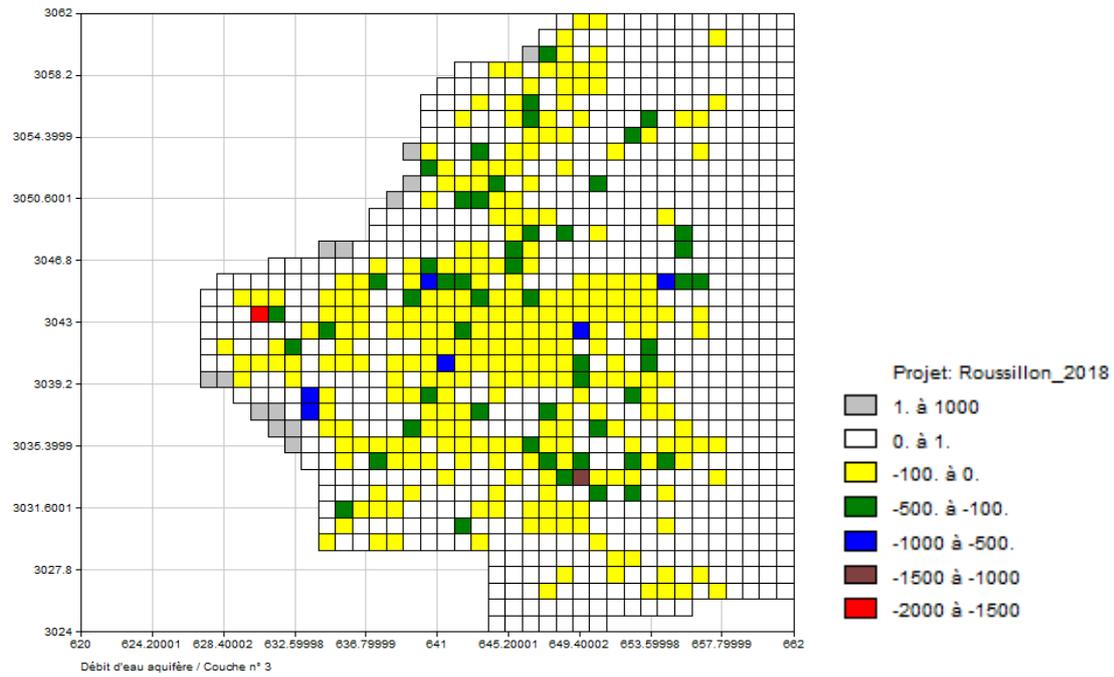


Figure 40 : Carte de prélèvement dans l'aquifère du Pliocène profond

ANNEXE 2 : METHODES DE CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE

Dans cette annexe, seront présentés les différents schémas utilisés pour le calcul des pluies efficaces.

1. Méthode de Thornthwaite

La méthode de Thornthwaite est une méthode qui permet de calculer ponctuellement (en une station) le bilan d'eau mensuel et annuel à partir des valeurs mensuelles des précipitations et des valeurs moyennes mensuelles des températures. Le schéma de calcul de la méthode est décrit sur l'organigramme suivant (Figure 41).

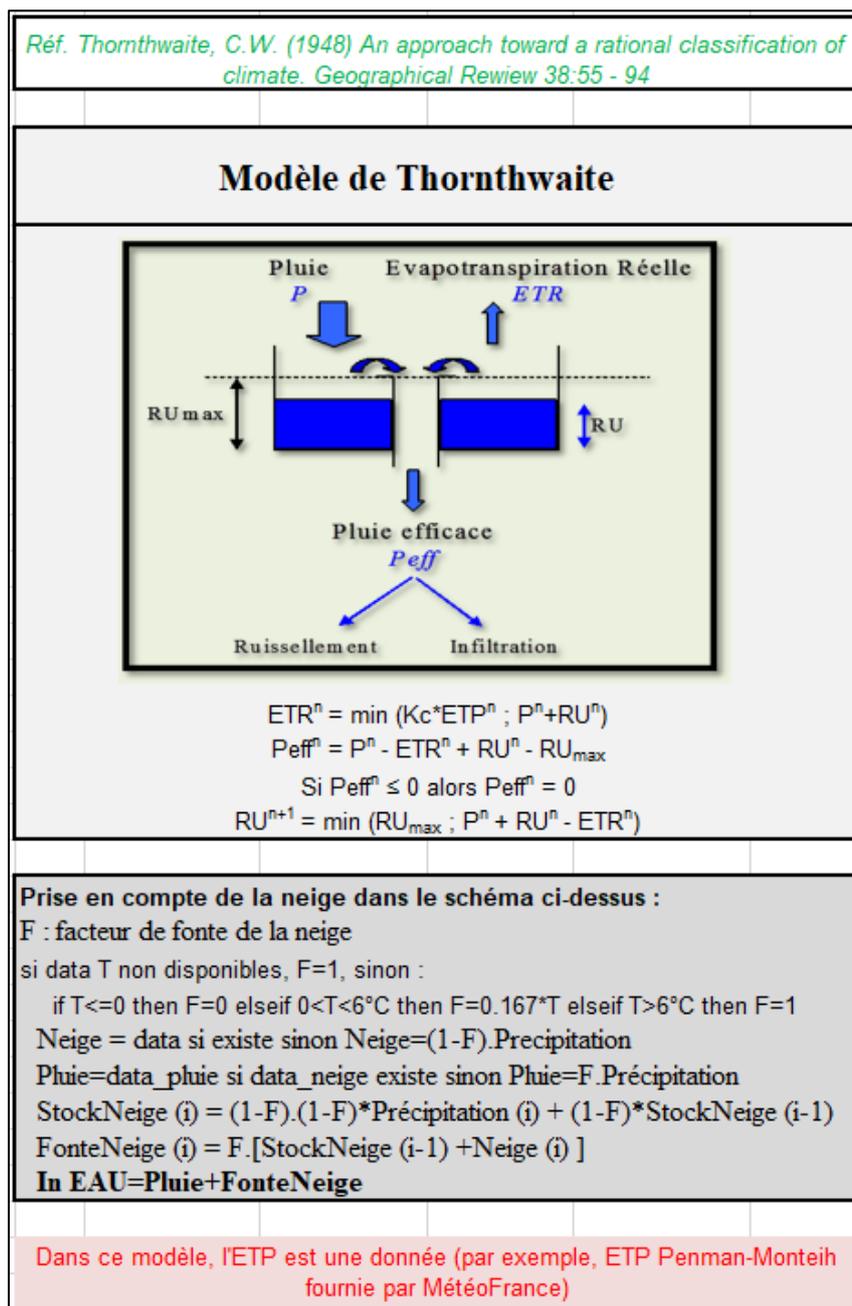


Figure 41 : Schéma de calcul de la pluie efficace par la méthode de Thornthwaite

2. Méthode de Dingman-Hamon

Réf. : S. Lawrence Dingman, *Physical Hydrology, 2002, Second Edition, Waveland Press, ISBN 978-1-57766-561-8*

Modèle de Dingman

1°) Calcul de l'ETP par la formule de Hamon

2°) Bilan hydrique du sol avec prise en compte de la neige, et vidange exponentielle de la Reserve Utile pour alimenter l'ETR lorsque les entrées d'eau (pluie + fonte de neige) sont < ETP.

F : facteur de fonte de la neige

si $T \leq 0$: $F=0$; si $0 < T < 6^\circ\text{C}$: $F=0.167 \cdot T$; si $T > 6^\circ\text{C}$ (ou data T non disponibles) : $F=1$

Neige = data si existe sinon $\text{Neige}=(1-F) \cdot \text{Précipitation}$

Pluie=data_pluie si data_neige existe sinon $\text{Pluie}=F \cdot \text{Précipitation}$

$\text{StockNeige}(i) = (1-F) \cdot (1-F) \cdot \text{Précipitation}(i) + (1-F) \cdot \text{StockNeige}(i-1)$

$\text{FonteNeige}(i) = F \cdot [\text{StockNeige}(i-1) + \text{Neige}(i)]$

EntreeEAU=Pluie+FonteNeige

si $\text{EntreeEAU} \geq Kc \cdot \text{ETP}$

$\text{ETR} = Kc \cdot \text{ETP}$

$\text{RU}(i) = \min [(\text{EntreeEAU}(i) - Kc \cdot \text{ETP}(i) + \text{RU}(i-1)), \text{RFUmax}]$

si $\text{EntreeEAU} < Kc \cdot \text{ETP}$

$\text{ETR}(i) = \text{EntreeEAU}(i) + \text{RU}(i-1) - \text{RU}(i)$

$\text{RU}(i) = \text{RU}(i-1) \cdot \exp[-(Kc \cdot \text{ETP}(i) - (\text{EntreeEAU}(i) - \text{ETR}(i))) / \text{RFUmax}]$

$\text{Pluie efficace}(i) = \text{EntreeEAU}(i) - \text{ETR}(i) - [\text{RU}(i) - \text{RU}(i-1)]$

si $\text{Pluie efficace} < 0$ alors $\text{Pluie efficace} = 0$

Formule de Hamon (1963) pour le calcul de l'ETP journalière

ETP estimée à partir de la longueur du jour (D en heure) et la tension de vapeur saturante (esat en kPa) à la température moyenne du jour (T, en °C)

$$\text{ETP} = 29.8 \cdot D \cdot \text{esat} / (T + 273.2)$$

$\text{esat} = 0.611 \cdot \exp [17.3 \cdot T / (T+273.3)]$

$D = 2 \cdot \arcsin [(-\tan(\delta) \cdot \tan(l)) / 0.2618]$

delta = déclinaison de l'axe terrestre (varie entre -23.5° et 23.5° selon le jour de l'année)

l : latitude (en radian) de la zone étudiée

Figure 42 : Schéma de calcul de la pluie efficace par la méthode de Dingman-Hamon

3. Méthode de Dingman-Penman

Application du modèle de Dingman en utilisant l'ETP Penman-Monteih fournie par MétéoFrance.	
<p>Bilan Hydrique du sol avec prise en compte de la neige et vidange exponentielle de la Réserve Utile (pour alimenter l'ETR)</p>	
<p>F : facteur de fonte de la neige si $T \leq 0$: $F=0$; si $0 < T < 6^\circ\text{C}$: $F=0.167 \cdot T$; si $T > 6^\circ\text{C}$ (ou data T non disponibles) : $F=1$ Neige = data si existe sinon $\text{Neige}=(1-F) \cdot \text{Précipitation}$ Pluie=data_pluie si data_neige existe sinon $\text{Pluie}=F \cdot \text{Précipitation}$ $\text{StockNeige}(i) = (1-F) \cdot (1-F) \cdot \text{Précipitation}(i) + (1-F) \cdot \text{StockNeige}(i-1)$ $\text{FonteNeige}(i) = F \cdot [\text{StockNeige}(i-1) + \text{Neige}(i)]$ $\text{EntreeEAU}=\text{Pluie}+\text{FonteNeige}$</p> <p>si $\text{EntreeEAU} \geq Kc \cdot \text{ETP}$ $\text{ETR} = Kc \cdot \text{ETP}$ $\text{RU}(i) = \min [(\text{EntreeEAU}(i) - Kc \cdot \text{ETP}(i) + \text{RU}(i-1)), \text{RFUmax}]$ si $\text{EntreeEAU} < Kc \cdot \text{ETP}$ $\text{ETR}(i) = \text{EntreeEAU}(i) + \text{RU}(i-1) - \text{RU}(i)$ $\text{RU}(i) = \text{RU}(i-1) \cdot \exp[-(Kc \cdot \text{ETP}(i) - (\text{EntreeEAU}(i) - \text{RU}(i-1)) / \text{RFUmax})]$</p> <p>$\text{Pluie efficace}(i) = \text{EntreeEAU}(i) - \text{ETR}(i) - [\text{RU}(i) - \text{RU}(i-1)]$ si $\text{Pluie efficace} < 0$ alors $\text{Pluie efficace} = 0$</p>	

Figure 43 : Schéma de calcul de la pluie efficace par la méthode de Dingman-Penman

ANNEXE 3 : COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE 10972X0075

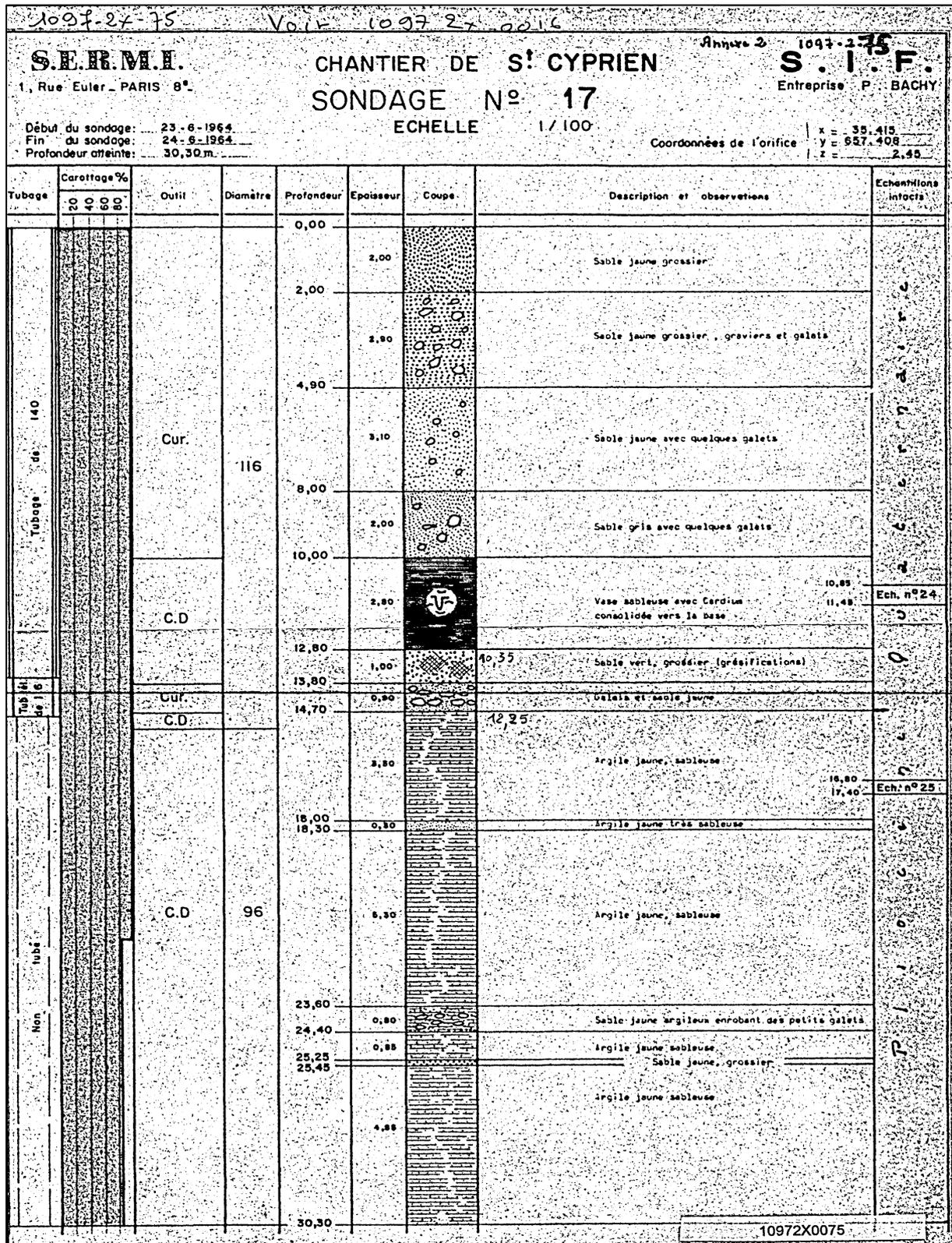


Figure 44 : Coupe technique d'un ouvrage réalisé à Saint-Cyprien (10972X0075)

Source : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=BSS002MUTM>