



HAL
open science

Analyse de la dynamique de la nappe superficielle d'un bassin versant élémentaire

Rihab Tayechi, Maroua Bouteffeha, Jérôme Molenat, Rachida Bouhlila

► **To cite this version:**

Rihab Tayechi, Maroua Bouteffeha, Jérôme Molenat, Rachida Bouhlila. Analyse de la dynamique de la nappe superficielle d'un bassin versant élémentaire. Sciences de l'environnement. 2022. hal-04559560

HAL Id: hal-04559560

<https://hal.inrae.fr/hal-04559560>

Submitted on 25 Apr 2024

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

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



République Tunisienne
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique Université de Tunis El Manar
Ecole Nationale d'Ingénieurs de
Tunis Ecole Doctorale STI



MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du

Diplôme de Mastère de Recherche

Spécialité : Modélisation en Hydraulique et Environnement

Élaboré par :

TAYACHI Rihab

Analyse de la dynamique de la nappe superficielle d'un bassin versant élémentaire

Soutenu le 13/12/2022 devant le jury d'examen composé de :

Présidente	: Mme Zoubeida Bargaoui	(ENIT)
Examineur	: Mr. Mohamed Habib Sellami	(ESIM)
Encadrant(e)s	: Mr. Jérôme Molénat	(IRD Tunisie)
	Mme Maroua Bouteffeha	(ENIT)
	Mme Rachida Bouhlila	(ENIT)

Laboratoire(s) de Recherche /entreprise

LR-LMHE-ENIT / IRD Tunisie



Institut de Recherche
pour le Développement
FRANCE



DEDICACE

Je dédie cet évènement marquant de ma vie

A l'âme de ma grand-mère

Qui nous a quittés cette année mais elle est toujours avec moi

Au meilleur des pères Bachir

A ma très chère maman Naima

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté

A qui je dois tout

A mes sœurs Soumaya et Bochra et mes frères Walid, Yahya et Yassine

A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

A mon fiancé Salhi Chakir

Qui m'encourage toujours

A mes chers oncles Bourguiba Ridha et Amdouni Nour Eddin

A mes Amis et ma famille du proche ou du loin

*A tous ceux qui me sont chers, proches de mon cœur, et à tous ceux qui m'aiment et
qui aurait voulu partager ma joie...*

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je commence par remercier dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et l'amour du savoir pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury pour leur présence, pour leur lecture attentive de mon mémoire de recherche ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer mon travail. Votre engagement et votre expertise ont été essentiels pour rendre ce travail aussi enrichissant et significatif.

Je tiens à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin m'ont aidée à la conception et la réalisation de ce document.

Qu'ils trouvent, ici, l'assurance de ma grande gratitude. Mes remerciements vont :

A mon encadrant Monsieur **Molénât Jérôme**, directeur de recherche INRAE mis à disposition de l'IRD en accueil au LMHE de l'ENIT d'avoir accepté de m'encadrer pour mon mémoire de mastère, je tiens à lui adresser un grand et spécial remerciement pour ses compétences professionnelles, ses qualités humaines, sa gentillesse et son aide, durant ce travail.

Mes vifs remerciements à **Madame Bouhlila Rachida**, professeur à l'ENIT qu'elle m'a permis de réaliser ce travail sous sa direction, de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet de mastère. C'est avec un grand plaisir que je lui exprime mon profond respect et mon infinie reconnaissance.

A mon encadrante Madame **Bouteffeha Maroua**, ingénieur principal et maitre-assistant à l'ENIT, pour l'aide qu'elle m'a apporté et le temps précieux qu'elle m'a accordé tout au long du travail. Je suis extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension. Sa patience, compréhension, rigueur de travail sont pour moi un exemple à suivre. Je la conserverai toujours ma profonde reconnaissance.

Je remercie également, **Mme Khemiri Khaoula**, ingénieur principal et maitre-assistant à l'ENIT pour sa disponibilité et tous ses conseils instructifs et judicieux.

J'adresse mes chaleureux remerciements à mes collègues et tous les personnels du Laboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement, pour tous les moments que nous avons vécu ensemble et leur support. J'adresse mes remerciements particulièrement à madame Mejri Emna, Bejaoui Amel, Dridi Ahlem. A qui je souhaite un avenir radieux.

Je remercie également tous les membres de l'IRD Tunis, pour leur accueil et leur sympathie.

Merci infiniment à tous mes professeurs qui ont contribué à ma formation tout au long de mes études.

Tout ceci n'aurait jamais pu se faire sans mes proches. Je remercie ma famille qui m'a toujours soutenue dans la poursuite de mes études. Je dédie ce travail à mes parents et mes soeurs qui m'ont toujours encouragée à suivre ma voie, et pour leur énorme soutien.

Merci à mon fiancé pour son soutien indispensable pour la finalisation de ce travail.

Enfin je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

L'eau est indispensable à la vie des organismes vivants et de l'homme. Sous toutes ses formes, elle joue un rôle fondamental dans la plupart des processus physicochimiques qui affectent la croûte terrestre. Par conséquent, il est nécessaire de raisonner et d'optimiser la gestion des ressources en eau, notamment dans les zones arides et semi-arides. Cela passe entre autres priorités par la caractérisation de la dynamique hydrologique des nappes phréatiques et la compréhension des processus de recharge de ces nappes.

Le présent travail a pour objectif de contribuer à l'étude de la dynamique des nappes superficielles en milieux sub-humides et semi-arides en se focalisant sur leur recharge. Plus spécifiquement, l'objectif est de comprendre les facteurs (climatiques, topographiques, pédologiques) conditionnant la recharge des nappes de subsurface. Ce travail s'appuie sur les données hydrologiques, piézométriques, climatiques et pédologiques issues du bassin versant de Kamech (Cap Bon, Tunisie) appartenant à l'observatoire OMERE.

Pour atteindre cet objectif et bien étudier la recharge de la nappe et les facteurs susceptibles de l'affecter, nous avons suivi trois étapes. :

La première étape, nous avons déterminé les caractéristiques des événements de recharge (amplitude de montée de nappe suite à la pluie, temps de montée, temps de réaction par rapport à la pluie,) à partir de chroniques piézométriques longues de 12 ans acquises à une fréquence de 5 min à 10min et de données pluviométriques journalières. Compte tenu de la masse de données piézométriques, nous avons réfléchi à l'automatisation de la détermination des caractéristiques des événements de recharge. Pour cela, nous avons contribué à la conception et au test de scripts R permettant leurs détections automatiques.

Dans une deuxième étape, les facteurs de contrôle ont été calculés pour conduire une analyse de corrélation entre les caractéristiques de recharge et les facteurs de contrôle.

Dans une troisième étape, une analyse de corrélation statistique a été réalisée entre d'un côté, les caractéristiques de la réaction de la surface piézométrique aux pluies (temps de réaction, amplitude de fluctuation...), et de l'autre des caractéristiques hydroclimatiques (cumul de pluie, intensité maximale de pluie, indice des pluies antérieures, profondeur initiale de la nappe)

Ce développement a permis d'identifier les caractéristiques et les facteurs clé de la recharge des nappes est les corrélations existantes entre eux.

Mots clés :

Nappe, subsurface, milieux semi-arides, recharge, piézométrie, amplitude de fluctuation.

Analysis of Surface Water Table Dynamics in an Elementary Watershed

Abstract

Water is indispensable to the life of living organisms and man. In all its forms, it plays a fundamental role in most of the physicochemical processes that affect the earth's crust. Consequently, it is necessary to reason and optimize the management of water resources, especially in arid and semi-arid areas. This requires, among other priorities, the characterization of the hydrological dynamics of groundwater and the understanding of the processes of groundwater recharge.

The objective of this work is to contribute to the study of surface groundwater dynamics in sub-humid and semi-arid environments by focusing on their recharge. More specifically, the objective is to understand the factors (climatic, topographic, soil) conditioning the recharge of the subsurface layers. This work is based on hydrological, piezometric, climatic and soil data from the Kamech watershed (Cap Bon, Tunisia) belonging to the OMERE observatory.

To achieve this goal and to study the recharge of the groundwater and the factors likely to affect it, we followed three steps:

The first step, we determined the characteristics of the recharge events (amplitude of rise of the tablecloth following the rain, rise time, reaction time compared to the rain,) from 12-year-long piezometric chronicles acquired at a frequency of 5 to 10min and daily rainfall data. Given the amount of piezometric data, we have considered the automation of the determination of the characteristics of recharge events. For this, we have contributed to the design and testing of R scripts allowing their automatic detections. In a second step, control factors were calculated to conduct a correlation analysis between recharge characteristics and control factors.

In a third step, a statistical correlation analysis was carried out between, on the one hand, the characteristics of the reaction of the piezometric surface to the rains (reaction time, amplitude of fluctuation, etc.) and, on the other hand, the hydroclimatic characteristics (cumulative rainfall, maximum rainfall intensity, previous rainfall index, initial depth of groundwater)

This development has made it possible to identify the characteristics and key factors of groundwater recharge and the existing correlations between them.

Keywords:

Groundwater, subsurface, semi-arid environments, recharge, piezometry, fluctuation amplitude.

تحليل ديناميكيات منضدة المياه السطحية في متجمعات المياه الأولية

الخلاصة

الماء لا غنى عنه لحياة الكائنات الحية والإنسان. في جميع أشكاله، يلعب دورًا أساسيًا في معظم العمليات الفيزيائية الكيميائية التي تؤثر على قشرة الأرض. وبالتالي، من الضروري التفكير في إدارة الموارد المائية وتحسينها على النحو الأمثل، لا سيما في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. ويتطلب ذلك، ضمن أولويات أخرى، توصيف الديناميكيات الهيدرولوجية للمياه الجوفية وفهم عمليات تغذية المياه الجوفية والهدف من هذا العمل هو المساهمة في دراسة ديناميكيات المياه الجوفية السطحية في البيئات شبه الرطبة وشبه القاحلة بالتركيز على إعادة شحنها. وبشكل أكثر تحديدًا، فإن الهدف هو فهم العوامل (المناخية والطبوغرافية والترربة) التي تكيف إعادة شحن الطبقات الجوفية. ويستند هذا العمل إلى بيانات هيدرولوجية وبيزومترية ومناخية وبيانات عن التربة مستمدة من متجمعات مياه كاميش (كاب بون، تونس) التابعة لمرصد أومير لتحقيق هذا الهدف ودراسة إعادة شحن المياه الجوفية والعوامل التي من المحتمل أن تؤثر عليها، اتبعنا ثلاث خطوات:

الخطوة الأولى، حددنا خصائص أحداث إعادة الشحن (سعة ارتفاع مفرش المائدة بعد المطر، ووقت الارتفاع، ووقت رد الفعل مقارنة بالمطر)، من سجلات بيزومترية مدتها 12 عامًا تم الحصول عليها بتردد من 5 إلى 10 دقائق وبيانات هطول الأمطار اليومية. نظرًا لكمية البيانات القياسية، فقد نظرنا في آلية تحديد خصائص أحداث مما يسمح باكتشافها تلقائيًا R إعادة الشحن. لهذا، ساهمنا في تصميم واختبار نصوص. وفي الخطوة الثانية، حُسبت عوامل الرقابة لإجراء تحليل للارتباط بين خصائص إعادة الشحن وعوامل التحكم وفي خطوة ثالثة، أُجري تحليل للارتباط الإحصائي بين خصائص تفاعل السطح البيزومترية مع الأمطار (وقت التفاعل، وسعة التقلب، وما إلى ذلك)، من جهة، والخصائص الهيدروليكية المناخية (هطول الأمطار التراكمي، وشدة هطول الأمطار القصوى، والمؤشر السابق لسقوط الأمطار، والعمق الأولي لهطول الأمطار وقد مكن هذا التطور من تحديد خصائص وعوامل تغذية المياه الجوفية والعلاقات القائمة بينها

الكلمات الرئيسية

المياه الجوفية، تحت سطح الأرض، البيئات شبه القاحلة، إعادة الشحن، قياس التذبذب، سعة التذبذب

Sommaire

Sommaire	1
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
Liste des équations	6
Liste des principaux symboles et acronymes	6
Introduction générale	7
Chapitre 1 : Etude bibliographique	10
A. Caractéristiques hydrologiques des milieux sub-humides et semi-arides	10
I. Spécificité des milieux subhumides et semi-arides :	10
II. Caractéristiques hydrologiques :	10
B. Procédés de recharge des nappes superficielles	11
I. Spécificité des nappes superficielles :	11
II. Notion et processus de recharge :	11
2. Classification des différentes sources de recharge :	12
3. Classification des différents types de recharge :	14
4. Facteurs déterminants dans le processus de recharge :	15
5. Méthodes d'estimation de recharge :	17
Chapitre 2 : Méthodes, Outils et formulations du calcul	22
A. Présentation de site d'étude	22
I. Cadre géographique et administratif :	22
II. Cadre climatique :	24
III. Cadre édaphique :	27
IV. Ressources en eau :	33
B. Description du dispositif et jeux de données disponibles	35
I. Description du dispositif, technique de mesure et jeux de données piézométriques :	35
II. Description du dispositif et jeux de données météorologiques :	39
C. Méthodes et outils de traitement des données	42
I. Méthodologie de traitement des données :	42
1. Méthodologie de traitement des données piézométriques :	46
2. Méthodologie de traitement des données pluviométriques :	46

3. Méthodologie de raffinement des données :	46
4. Méthodologie de détection des caractéristiques des évènements de recharge.....	47
II. Outil de traitement des données :	47
1. Premier Script : Décomposition piézométrique.....	48
2. Deuxième Script : Traitement pluviométrique	48
3. Troisième Script : Raffinements piézométrique	49
4. Quatrième Script : Détection des évènements de recharge.....	49
CHAPITRE 3 : Analyse de la dynamique hydrologique de la nappe.....	51
A. Résultat du traitement des données.....	51
I. Résultats de traitement des données piézométriques :	52
II. Résultats de traitement des données pluviométriques :	53
III. Résultats de raffinement des données :.....	54
IV. Détection des évènements et des caractéristiques de recharge :.....	55
B. Analyse de la dynamique hydrologique de la nappe.....	56
I. Analyse des variations piézométriques et des facteurs de recharge :.....	56
II. Analyse statistique :.....	57
III. Étude de la dynamique des nappes en se référant aux résultats :.....	61
1. Résultats des traitements et des corrélations obtenues :	61
2. Analyse des résultats des traitements et des corrélations obtenues :.....	64
Liste des références	66
Webographie.....	68
Annexes	70

Liste des figures

Figure 1: Quelques notions sur les nappes phréatiques (Agence de l'Eau Artois-Picardie. République Française)	11
Figure 2: Recharge des nappes avec infiltration et percolation Source : COBALI, Centre d'Information La République Française	13
Figure 3: Schéma présentant quelques modes de recharge artificielle dans différents environnements hydrogéologiques (SIGES : La recharge artificielle des nappes).....	14
Figure 4: Alimentation des nappes d'eau souterraines par les précipitations. (BRGM)	16
Figure 5: Localisation de Bassin Versant de Kamech Source : L'Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau (OMERE)	23
Figure 6: Statistiques mensuelles des précipitations (en mm) sur Kamech de 1994 à 2012	24
Figure 7: Cumul annuel sur Kamech de 1994 à 2012	25
Figure 8: Lame d'eau mensuelle évaporée à Kamech.....	25
Figure 9: Carte bioclimatique de la Tunisie et du Cap Bon Source : JOINT RESEARCH CENTRE EUROPEAN SOIL DATA CENTRE (ESDAC)	26
Figure 10: Diagramme Ombro-thermique de Gausсен.....	27
Figure 11: Carte géologique du bassin versant de Kamech (Mekki I., 2003)	28
Figure 12: Coupe géologique schématique dans l'anticlinal du Cap Bon et localisation du bassin versant de Kamech (L'Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau : OMERE).....	29
Figure 13: Coupe géologique détaillée dans l'anticlinal du Cap Bon et localisation du bassin versant de Kamech (L'Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau : OMERE).....	29
Figure 14: vallées dissymétriques bordées par un escarpement raide - cuesta -	30
Figure 15: Carte pédologique (Mekki I., 2003).....	31
Figure 16: Carte d'occupation du sol pour l'année 2007-2008 (Mekki I., 2003).....	33
Figure 17: Réseau hydrographique de Kamech.....	34
Figure 18: Régime d'écoulement moyen mensuel à Kamech (1994-2002) (Mekki I., 2003).....	34
Figure 19: Emplacement des piézomètres échantillonnés autour du lac et en aval (à gauche) et en amont (à droite) du bassin versant de Kamech (Mekki I., 2003).....	36
Figure 20: Dispositifs de mesure installée à Kamech (Damier R., 2008).....	37
Figure 21: : Schéma des éléments d'un piézomètre	38
Figure 22: visite des membres de l'équipe d'omere (m. jerome molenat, m. radhouane hamdi, m. pierre carlevaris et m. kilani ben azzez) et les étudiants m2 mhe a l'enit promotion 2022, avec mme guellouz lamia (maitre-assistant a l'enit) au bv kamech.	38
Figure 23: Station météorologique installée au BV Kamech Source : Catalogue ORE OMERE	40
Figure 24: Mesure intégrée de l'évapotranspiration réelle. Anémomètre sonique et hygromètre installés à 10m du sol (Damier R., 2008).....	40
Figure 25: Mesure de l'évapotranspiration réelle à l'échelle locale. Anémomètre sonique et hygromètre optique à hauteur de 2m du sol (Damier R., 2008).....	40
Figure 26: Profil de la recharge d'une nappe	43
Figure 27: Chronogramme de la variation piézométrique journalière	52
Figure 28: Chronogramme de la variation pluviométrique journalière	53
Figure 29: Chronogramme de la variation piézométrique raffinée	54

Figure 30: Chronogramme de la variation piézométrique raffinée et détection des évènements de recharge	55
Figure 31: Diagrammes de dispersion pour le piézomètre - pz 1 -.....	58
Figure 32: Coefficients de corrélations –pz 1- par R	60

Liste des tableaux

Tableau 1: Lois de transfert reliant les flux intensifs aux forces qui les causent pour un écoulement hydrique Source : BRUNO Ambroise : La dynamique du cycle de l'eau dans un Bassin Versant : Processus-Facteurs-Modèles.....	15
Tableau 2: Script de décomposition piézométrique	48
Tableau 3: Script de traitement pluviométrique.....	48
Tableau 4: Script de raffinement piézométrique	49
Tableau 5: Script de détection des évènements de recharge	49
Tableau 6 : Caractéristiques des évènements de recharge	55
Tableau 7: Tableau récapitulatif de nombre des évènements détectés pour chaque évènement durant les 12 ans de la période l'analyse	56
Tableau 8: Table des caractéristiques de recharge pour le premier pz 1	57
Tableau 9: coefficients de corrélations par R.....	61
Tableau 10: Tableau récapitulatif des corrélations entre les différents paramètres.....	62

Liste des équations

Équation 1: Equation de masse.....	17
Équation 2: Indice des Précipitations Antérieures.....	59

Liste des principaux symboles et acronymes

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

ZNS : Zone Non Saturée

BV : Bassin Versant

galva. : Galvanomètre

piezo : piézomètre

Rive G : Rive Gauche

Rive D : Rive Droite

pz : Piézométrie

Introduction générale

L'eau est une indispensable source de vie sur la planète et force motrice pour les activités de développement de l'humanité.

Elle couvre les trois quarts de la surface de notre planète, constitue les rivières, les eaux souterraines, les lacs, les mers, les océans, présente dans les sols et constitue les êtres vivants. Sous toutes ses formes, l'eau joue un rôle fondamental dans la plupart des processus physicochimiques qui affectent la croûte terrestre, les nappes phréatiques, les aquifères souterrains et occupent une fonction centrale dans ce système.

En effet, la pénurie des ressources en eau suite aux catastrophes hydrologiques, aux changements climatiques de l'environnement global de la planète et aux prélèvements excessifs et l'usage intensifiés de l'eau dans différents domaines, présente un sujet majeur sur le territoire national tunisien et dans beaucoup de pays du monde pour les études de recherches qui s'occupent par la connaissance des flux de recharge pour la compréhension du fonctionnement des nappes et de leur renouvellement.

De ce fait, la connaissance des phénomènes permettant le transit de l'eau à travers les premières couches de sol et les facteurs affectant cet échange est primordial pour évaluer l'alimentation des nappes superficielles par les apports de surface.

Du coup, cette connaissance permettra par la suite la bonne gestion des ressources en eau afin d'assurer, à la fois, le développement des activités humaines et la préservation de ces ressources.

A ce propos, ce travail a pour objectif principal l'analyse hydrodynamique des nappes phréatiques dans les milieux arides et semi-arides et le suivi des flux de recharge à travers, des analyses de la variation piézométrique de ces nappes d'une part, et l'analyse des différents facteurs susceptibles d'expliquer leurs recharges d'autre part.

Pour atteindre cet objectif et mieux étudier la recharge de la nappe, une approche méthodologique bien détaillée est mise en œuvre dans le bassin versant expérimental appartenant à l'Observatoire de Recherche en Environnement ORE-OMERE (Observatoire Méditerranéen de l'espace rural de l'eau). Ce bassin versant, de 2,63 km², est un site

expérimental en hydrologie, pédologie et bioclimatologie. Il est équipé par des appareils de mesures à haute fréquence (minute à journée) de la pluie, des débits et des profondeurs de la nappe.

De ce fait, nous avons procédé à une méthode automatisée permettant de dégager les principales caractéristiques temporelles de la recharge de nappe à partir des variations piézométriques et des principaux évènements pluvieux sur plusieurs années hydrologiques.

Cette méthode permet alors d'analyser la réponse des charges pluviométriques à la fois à ces évènements pluvieux et à ces caractéristiques d'une part et d'effectuer une analyse de corrélation statistique entre les différentes caractéristiques pour finir avec l'analyse de la dynamique de la nappe en se référant aux différentes caractéristiques tirées de cette approche.

Ce mémoire présente l'ensemble du travail réalisé. Il est articulé en trois principaux chapitres :

- ✓ Etude bibliographique : dans ce chapitre, nous rappelons les caractéristiques hydrologiques des milieux sub-humides et semi-arides et les processus associés à la recharge des nappes superficielles.
- ✓ Méthodes, Outils et formulations du calcul : dans ce chapitre, on a élaboré une description de site d'étude, du dispositif et jeux de données disponibles et les méthodes et outils de traitement des données.
- ✓ Analyse de la dynamique hydrologique de la nappe : le chapitre expose le résultat du traitement des données, une analyse statistique des différentes caractéristiques piézométriques et hydroclimatiques et une analyse de la dynamique hydrologique de la nappe.

CHAPITRE 1 :
Etude bibliographique

Chapitre 1 : Etude bibliographique

A. Caractéristiques hydrologiques des milieux sub-humides et semi-arides

I. Spécificité des milieux subhumides et semi-arides :

Emberger en 1960 a donné une classification des étages bioclimatiques en fonction des précipitations, selon laquelle on peut décrire les spécificités bioclimatiques des milieux subhumides et semi-arides :

Etage semi-aride, : les précipitations sont entre 400 et 600 mm et où souvent 2 sous étages l'un supérieur et l'autre inférieur sont distingués ;

Etage subhumide, ou les précipitations sont entre 600 et 800 mm.

Du coup, de ce qui concerne l'étage bioclimatique, la Tunisie est caractérisée, en sa totalité, par les étages bioclimatiques méditerranéens. En tenant compte de sa situation géographique et son orographie, la Tunisie est soumise aux influences méditerranéennes dont la dominance, au Nord de la Dorsale (SCID).

II. Caractéristiques hydrologiques :

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle hydrologique et les processus associés à ce cycle : les précipitations, l'infiltration, le stockage, la redistribution et le ruissellement, le drainage, l'évaporation et la transpiration. L'étude de la dynamique hydrologique des nappes ainsi que ses modes de recharge est une composante majeure et indispensable de l'hydrologie (Aqua Portail).

La région méditerranéenne est occupée par des sols à argiles gonflantes d'une part affectant le régime d'écoulement des eaux de ruissellement et de nature verticales d'autre part avec une forte dynamique structurale de ces sols. Cette dynamique hydro-sédimentaire des bassins est affectée par les fentes de retraits existantes en abondance sur le site notamment en fin de saison sèche (INOUBLI N.,2016).

B. Procédés de recharge des nappes superficielles

I. Spécificité des nappes superficielles :

Une nappe libre est l'eau comprise dans un aquifère ; elle représente un réservoir d'eau situé entre la surface du sol et une couche imperméable. Elle est alimentée par les infiltrations d'eau de pluie. Les nappes superficielles sont celles dont la surface piézométrique est proche de la surface du sol (0 à 5 m pour donner un ordre de grandeur) et dont le mur est situé à quelques mètres à dizaines de mètres de profondeur.

On distingue deux types de nappes :

- Des nappes qui se rechargent régulièrement en eau (eaux de ruissellement, percolation...) (Figure 1).

Des nappes plus anciennes et plus profondes, dites « fossiles » ou encore « paléohybriques », se sont des nappes non renouvelables (Agence de l'Eau).

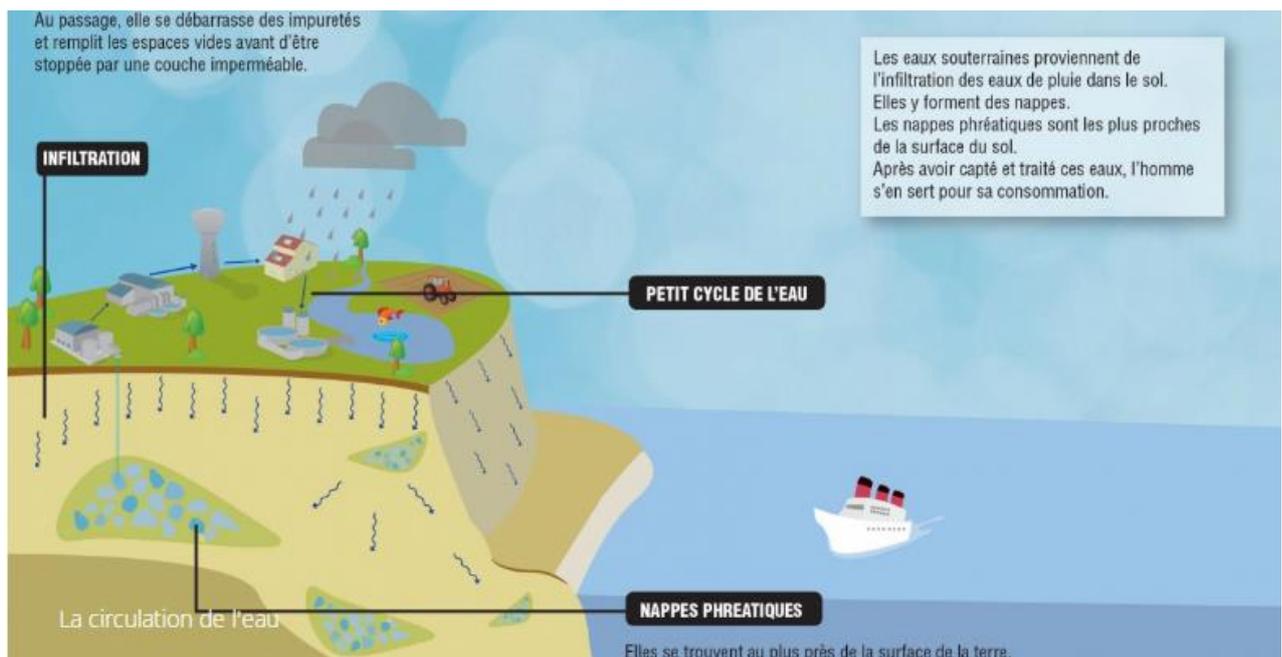


FIGURE 1: QUELQUES NOTIONS SUR LES NAPPES PHREATIQUES (AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE. REPUBLIQUE FRANÇAISE)

II. Notion et processus de recharge :

Pour étudier le processus de recharge des nappes aquifères on doit tout d'abord aborder la distinction des différentes sources de recharge, classifier les différents types qui peuvent avoir lieu en zone aride et semi-aride, et description des différentes méthodes d'estimation de recharge.

1. La recharge :

Durant le cycle de l'eau, les différents réservoirs de la planète (océans, eaux continentales, atmosphère) sont le siège des transferts incessants de masses d'eau. Cependant, l'eau ne circule pas constamment d'un réservoir à l'autre.

A ce propos, la recharge des nappes est essentiellement tributaire des eaux de pluie qui se décomposent en :

- $\frac{2}{3}$ des pluies repartent dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau ;
- $\frac{1}{3}$ des pluies efficaces.

La pluviométrie est plus abondante en automne et en hiver car l'évaporation est faible, l'humidité des sols favorise l'infiltration, et les plantes consomment peu d'eau, du coup, les aquifères sont alimentés et reconstituent leurs réserves principalement au cours de cette période. En revanche, en été, ils n'accumulent plus d'eau mais peuvent contribuer à alimenter les cours d'eau (SIGES_1).

2. Classification des différentes sources de recharge :

La recharge des nappes superficielles s'effectue à travers diverses sources :

▪ Sources naturelles :

La contribution des ressources naturelles dans la recharge des nappes se produit à partir des précipitations, des rivières ou des lacs. En fait, la pluie est soumise à deux chemins : soit elle est interceptée par les végétaux soit elle atteint le sol selon des conditions données. Cette dernière fraction comporte de son tour :

- Evaporation directe du sol ;
- Ecoulement en surface jusqu'aux cours d'eau c'est le ruissellement de surface ;
- Infiltration dans le sol selon son infiltrabilité. L'eau infiltrée peut subir :
 - Emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, susceptible d'être utilisée par la végétation.
 - Percolation vers les zones plus profondes pour alimenter de son tour la nappe souterraine et contribuer au renouvellement de son réserve (SIGES_2).

A cet égard, la recharge des nappes superficielles peut être effectuée naturellement à travers diverses sources :

- ↳ Recharge à partir de l'infiltration directe des eaux de pluie des précipitations, des rivières ou des lacs... et à partir de la percolation longitudinale et latérale des eaux infiltrées ;

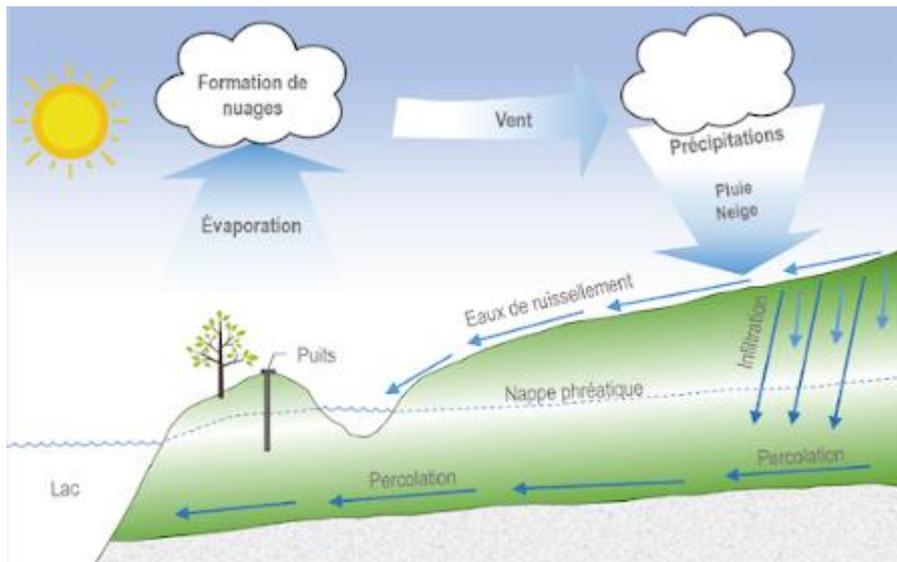


FIGURE 2: RECHARGE DES NAPPES AVEC INFILTRATION ET PERCOLATION
SOURCE : COBALI, CENTRE D'INFORMATION LA REPUBLIQUE FRANCAISE

- ↪ L'infiltration et la percolation des eaux de ruissellement au niveau des lits des oueds (Figure 2) et des rivières ;
- ↪ L'infiltration et la percolation des eaux d'irrigation ;
- ↪ Les écoulements entre les aquifères (Bouteffeha M.,2010).

- Sources artificielles :

La recharge artificielle est « l'augmentation de la quantité d'eau bénéficiant aux réservoirs d'eau souterraine via des dispositifs artificiels » (Todd,1959).

Elle est définie ainsi comme étant « l'introduction d'eaux extérieures dans une formation aquifère par leur transit dans la zone non-saturée à travers des bassins d'infiltration, puits, aménagement des cours d'eau, etc. » (Flint et al.,2002).

Du coup, c'est la recharge des nappes phréatiques via les activités anthropiques (Figure 3) telles que l'irrigation, les réseaux d'adduction d'eau potable, les lâchers de barrages.

La recharge artificielle des nappes a pour objectif principal l'amélioration quantitative voire qualitative de la ressource en eau. D'une part, l'amélioration quantitative vise à la restauration des nappes surexploitées avec un rabattement préjudiciable. En fait, c'est le but premier de la recharge artificielle. D'autre part, l'amélioration qualitative : à travers la dilution ou via le pouvoir d'autoépuration du sol, la recharge artificielle contribue à la baisse des concentrations en certains éléments chimiques (nitrate, pesticides...). Ce qui permet une gestion plus simple et plus économique des traitements de potabilisation.

De plus, ce type de recharge vise à la sauvegarde des aquifères côtiers de l'effet de l'intrusion marine en créant une sorte de barrière hydraulique et à la conservation de l'intégrité de l'environnement (SIGES_3).

Les principales techniques de recharge artificielle sont :

- La recharge à travers les bassins d'infiltration ;
- Les méthodes d'injection directe ;
- La recharge artificielle indirecte.

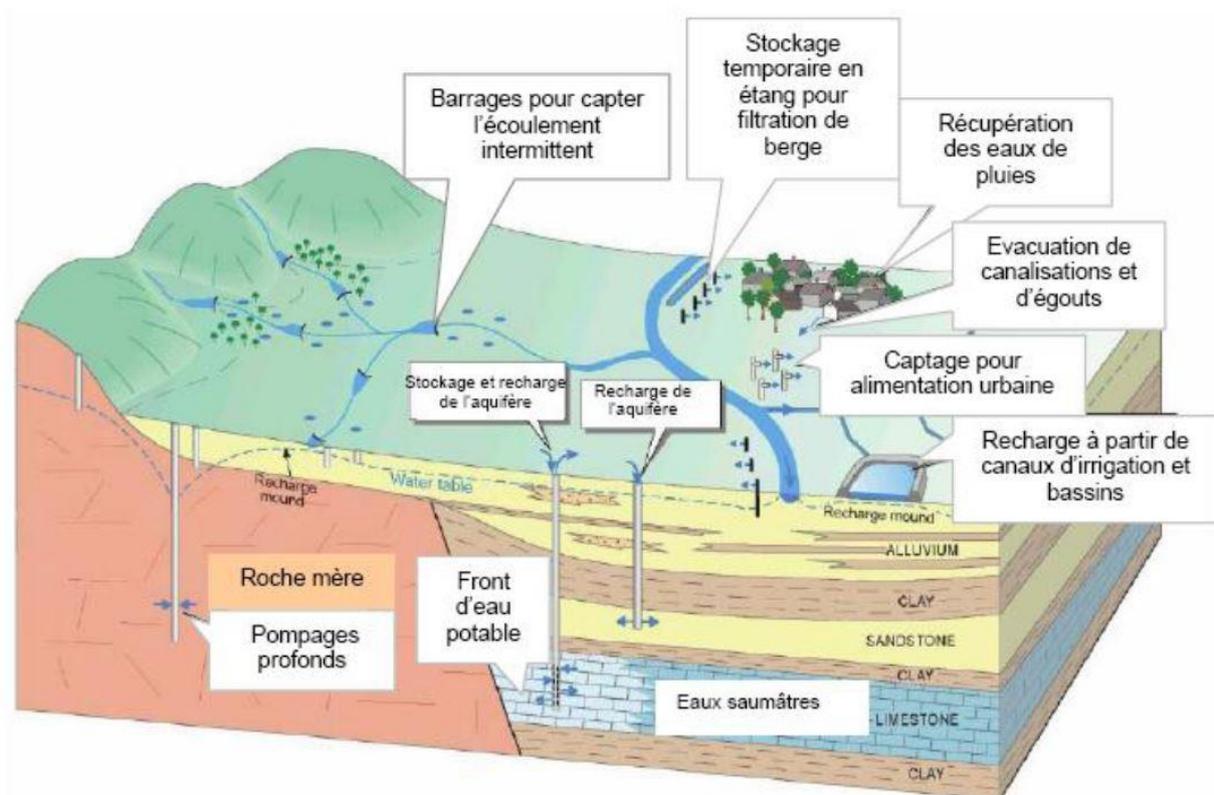


FIGURE 3: SCHEMA PRESENTANT QUELQUES MODES DE RECHARGE ARTIFICIELLE DANS DIFFERENTS ENVIRONNEMENTS HYDROGEOLOGIQUES (SIGES : LA RECHARGE ARTIFICIELLE DES NAPPES)

3. Classification des différents types de recharge :

En exploitant les sources citées au-dessus, on peut classifier les différents types de recharge des nappes selon Lerner (1990) (Simmers, 1997) :

- Recharge directe ou diffuse:

C'est la recharge des nappes à travers l'eau provenant de l'infiltration des eaux de pluie via la zone non saturée.

- Recharge localisée:

C'est une forme intermédiaire de la recharge due à l'accumulation de l'eau en surface.

- Recharge indirecte ou concentrée:

Cette recharge est due à l'infiltration des eaux à partir des lits des oueds, des cours d'eau et des rivières (Bouteffeha M.,2010).

4. Facteurs déterminants dans le processus de recharge :

La recharge des nappes phréatiques dépend de divers facteurs, citons :

- **Conductivité hydraulique :** La conductivité hydraulique (K_h) d'un sol est un paramètre de transfert qui renseigne sur l'aptitude d'un milieu poreux à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. (Tableau 1). C'est la propriété physique fondamentale et indispensable pour le design d'un système de drainage souterrain (RCI 155, Rhone Chimie Industrie).

TABLEAU 1: LOIS DE TRANSFERT RELIANT LES FLUX INTENSIFS AUX FORCES QUI LES CAUSENT POUR UN ECOULEMENT HYDRIQUE SOURCE : BRUNO AMBROISE : LA DYNAMIQUE DU CYCLE DE L'EAU DANS UN BASSIN VERSANT : PROCESSUS-FACTEURS-MODELES

Densité de flux extensif	Potentiel énergétique	Paramètre de transfert
Ecoulement hydrique en milieu poreux saturé : $V = -K_h \text{ grad } H$ Flux de volume d'eau V	Loi de Darcy : Charge hydraulique H	Conductivité hydraulique K_h
Ecoulement hydrique en milieu poreux non saturé : $V = -K_h(h) \text{ grad } (z-h)$ Flux de volume d'eau V	Loi de Darcy généralisée : Charge hydraulique $H = z-h$	Conductivité hydraulique $K_h(h)$ en fonction de la tension h

- **Nature et épaisseur de la zone non saturée :** la zone non saturée représente un milieu déterminant dans la recharge des nappes. En fait, d'une part, le type de sol de cette zone (ses caractéristiques telles que structure, texture, perméabilité...) représente un facteur primordial qui intervient dans la recharge des nappes. D'autre part, l'épaisseur de cette zone représente de son tour un facteur majeur qui influe sur l'alimentation des nappes et le temps de recharge ;

- **Vitesse d'infiltration** : peut-être de l'ordre du mètre/an, d'un mètre/mois (Calcaires de Beauce), d'un mètre/jour (Alluvions) et de plusieurs dizaines de mètres par jour pour les systèmes très fissurés de type karstique (craie karstifiée) ;
- **Volume d'eau mouvante a une surface en pente** ; ce facteur est étroitement lié au relief d'où le déséquilibre de recharge d'une zone à une autre vu la différence de volume d'eau apporté de hautes zones vers les basses zones (SIGES_4).
- **Paramètres climatiques** : certains paramètres climatiques représentent des facteurs majeurs affectant la recharge des nappes tels que la température, l'évaporation et notamment les précipitations...

A ce propos, la meilleure période pour que les nappes se rechargent c'est principalement la période hivernale en raison de certains facteurs (Figure 4) :

- Les précipitations sont les plus importantes durant cette période ;
- L'évaporation est faible vu que la température est plus faible ;
- La végétation est peu active et ne prélève pratiquement pas d'eau dans le sol ;
- Importance des pluies hivernales variable de durée quasiment étendue (SIGES_4).

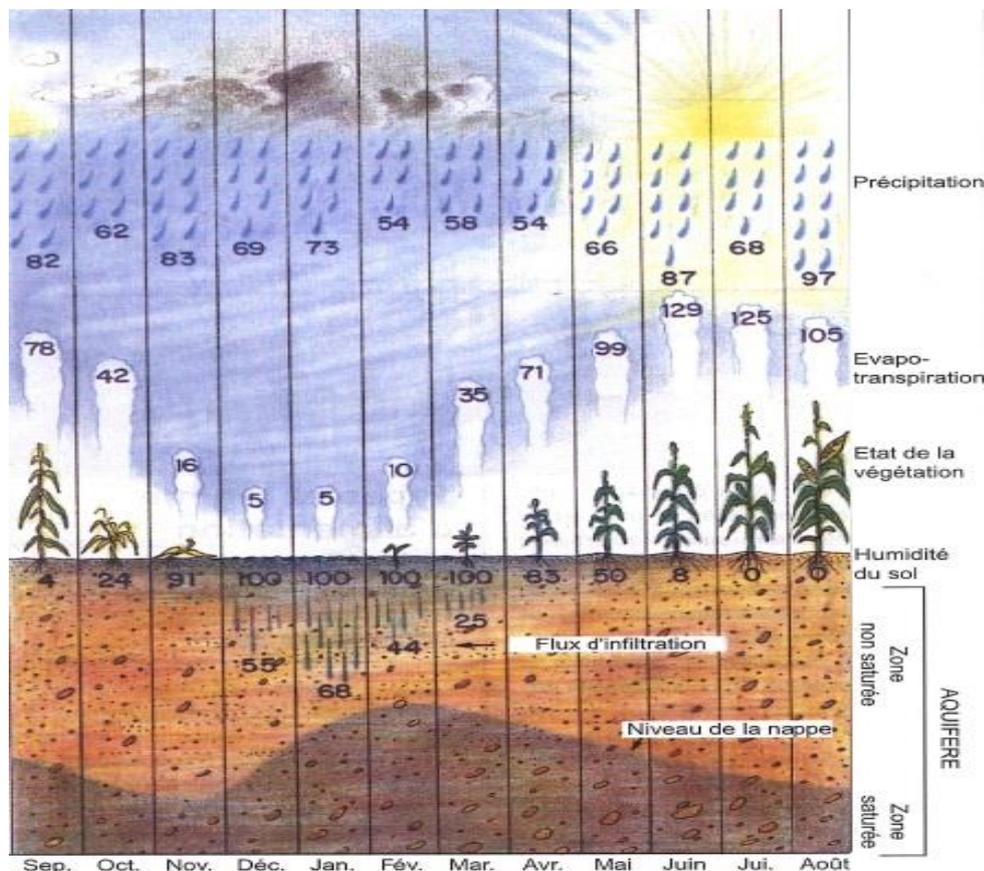


FIGURE 4: ALIMENTATION DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINES PAR LES PRECIPITATIONS. (BRGM)

5. Méthodes d'estimation de recharge :

En s'inspirant d'une classification de Favray Guillaume en 2000, on peut organiser les méthodes d'estimation de recharge des nappes notamment en zones semi-arides en méthodes qui se reposent sur des mesures dans la zone non saturée et celles dans la nappe.

▪ Mesures dans la zone non saturée :

L'estimation de la recharge d'une nappe peut être étudiée à partir de différentes méthodes :

- **Mesures géochimiques** : mesures dans les zones non-saturées à travers la recherche du pic de tritium thermonucléaire qui permet de déterminer le taux de recharge en mm/an pour une pluviométrie donnée.
- **Méthode du bilan des chlorures** : c'est une méthode au principe similaire qui utilise le caractère conservatif de l'ion chlorure pour déterminer la part de l'eau infiltrée à partir d'une équation de masse :

ÉQUATION 1: EQUATION DE MASSE

$$Re = (P \cdot Cp) / C_{ZNS}$$

Avec :

- Re : Recharge (inter)annuelle de la nappe en [L/T] ;
- P : Moyenne annuelle des précipitations en [L/T] ;
- Cp : Concentration moyenne pondérée en chlorure dans l'eau de pluie en [M/L³] ;
- C_{ZNS} : Concentration moyenne en chlorures dans la zone non-saturée, au-delà de la zone de reprise évapotranspiratoire en [M/L³].

Avantages de la méthode :

L'avantage de cette méthode est principalement sa simplicité et son apparence robuste, ce qui explique sa fréquente utilisation.

Limites de la méthode :

Cette méthode a certaines limites : d'une part ses conditions d'application nécessitent un examen rigoureux des processus de recharge (de préférence directs) ainsi qu'homogénéité géologique de l'aquifère, et d'autre part, l'absence de source de chlorure autre que l'eau de pluie, et l'absence d'exportation des chlorures, notamment par ruissellement.

- **Les teneurs en isotopes stables de la molécule d'eau** : c'est une technique qui utilise les isotopes stables de la molécule d'eau pour déterminer les processus de recharge : au Burkina-Faso par exemple, Mathieu et Bariac en 1996 ont utilisé ces traceurs pour discriminer les infiltrations rapides (préférentielles) et lentes (diffuses) dans un sol argileux.

(Tao Wang , Wei-min Bao , Hai-li Xu , Zhen Zhu , Si-min Qu , Peng Shi , Hai-ying Hu , Rui-qi Fan , Qian Li, 2010)

- **Recharge de type indirect** : estimé par Bazie et al. en 1995, au Burkina-Faso, ont déterminé à partir d'un dispositif de mesures tension-neutroniques et de Lysimètre un processus, et une profondeur maximale de reprise de l'eau par évaporation.

Limites de la méthode :

Ces méthodes sont plus lourdes sont, moins utilisées qu'en zone tempérée.

▪ **Mesures dans la nappe :**

Ces mesures représentent une grande voie d'étude de la recharge qui implique un échantillonnage in situ dans la nappe en utilisant la plupart des traceurs utilisés dans la zone non-saturée.

Par exemple, à partir de mesures en tritium dans la nappe :

- Conrad et al. (1975) mettent en évidence l'alimentation actuelle des nappes libres du Sahara ; avec le même traceur ;
- Leduc et al. (1996) estiment la recharge proche de 25 mm/an au sud-ouest du Niger.

Et à travers la méthode des chlorures appliquée à la zone saturée :

- Edmunds et Gaye (1994) estiment la variabilité de la recharge au nord-ouest du Sénégal de 1 à 13 mm/an, pour une pluviométrie de 280 mm/an ;
- Bazuhair et Wood (1996) applique ainsi cette méthode en Arabie Saoudite, et fournit des valeurs plus variables, entre moins de 1 et près de 60 mm/an.

Enfin, comme en zone non-saturée, l'utilisation des isotopes stables de la molécule d'eau permet d'évaluer les processus de recharge en zone semi-aride (e.g. Onodera et al., 1995 ; Njitchoua et al., 1995).

- ↳ Dans des milieux semi-arides, que se soient par des méthodes différentes en zone non-saturée ou dans la nappe, ces estimations variées (de quelques mm à plus de 100 mm/an) apparemment proches, peuvent illustrer la variabilité des situations naturelles, ou la variabilité des précisions des méthodes.
- ↳ Souvent, pour préciser les estimations, on recourt à la combinaison de plusieurs approches (Favreav G.,2000).

▪ **Méthode de l'analyse des variations piézométriques :**

La suivie de la recharge des nappes et l'analyse piézométrique représentent une partie principale et indispensable dans l'étude hydrodynamique des nappes. On définit alors la notion de la piézométrie et son intérêt ainsi que la méthodologie de cette analyse.

Notion de la piézométrie et intérêt de la suivie piézométrique :

La piézométrie est la mesure de la profondeur de la surface de l'eau souterraine, elle sert à diverses tâches indispensables dans l'étude hydrologique :

- Définir le sens de l'écoulement souterrain ;
- Evaluer la capacité d'un aquifère (réserves en eau) ;
- Estimer le débit d'une nappe ;
- Etudier l'évolution de la recharge naturelle (fluctuations de la surface piézométrique), régime d'alimentation de l'aquifère ;
- Etudier, apprécier les caractéristiques d'une nappe sur un territoire (propriétés hydrodynamiques, limites de l'aquifère, études géotechniques avant réalisation d'un ouvrage...);
- Suivre une nappe exploitée (durabilité de l'exploitation) ;
- Analyse des relations de la nappe avec la surface (recharge, décharge).

L'expression de la piézométrie se définit sous deux formes de la surface piézométrique :

- la profondeur par rapport au sol/référence de lecture ;
- l'altitude selon une référence régionale (Ponchant I. et Massuel S.,2015).

Méthodologie de l'analyse de la variation piézométrique :

L'analyse des variations piézométriques est l'une des méthodes nécessaires pour l'étude hydrodynamique des nappes. En effet, en mettant en considération la variation piézométrique pendant une durée de temps bien déterminée tout en se référant à certaines caractéristiques telles que la variation pluviométrique, on peut alors décortiquer les différentes phases de l'évolution hydrodynamique de la nappe en tant que recharge et rabattement (décharge).

Modélisation géologique 3D du système aquifère :

Cette méthode élaborée par Hassen I., Gibson H., Hamzaoui-Azaza F., Negro F., Khanfir R., Bouhlila R. (2016), vise à créer un modèle géologique et structurel 3D pour le système aquifère (Dans l'étude, cas de Kasserine (KAS) au centre de la Tunisie et son extension naturelle vers le nord-est de l'Algérie). Cela a été fait à l'aide d'une méthode 3D implicite, respectant les données géologiques concernant les limites de formation et les failles. En présentant un modèle actuel

qui permet d'obtenir des prévisions valables de répartition spatiale de la géologie et des ressources en eau dans les aquifères dans l'ensemble du modèle.

Chapitre 2 :
Méthodes, Outils et formulations du
calcul

Chapitre 2 : Méthodes, Outils et formulations du calcul

Le présent chapitre présente un stade principal dans l'étude des bassins versants puisqu'il englobe une présentation de site d'étude et ses caractéristiques géographiques et physiques, ainsi qu'un ensemble des procédures de collecte et de traitement de données prises en compte pour l'obtention d'un jeu de données permettant par la suite l'analyse et le traitement de ces données tout en définissant auparavant toute méthodologie de traitements et les divers outils considérés.

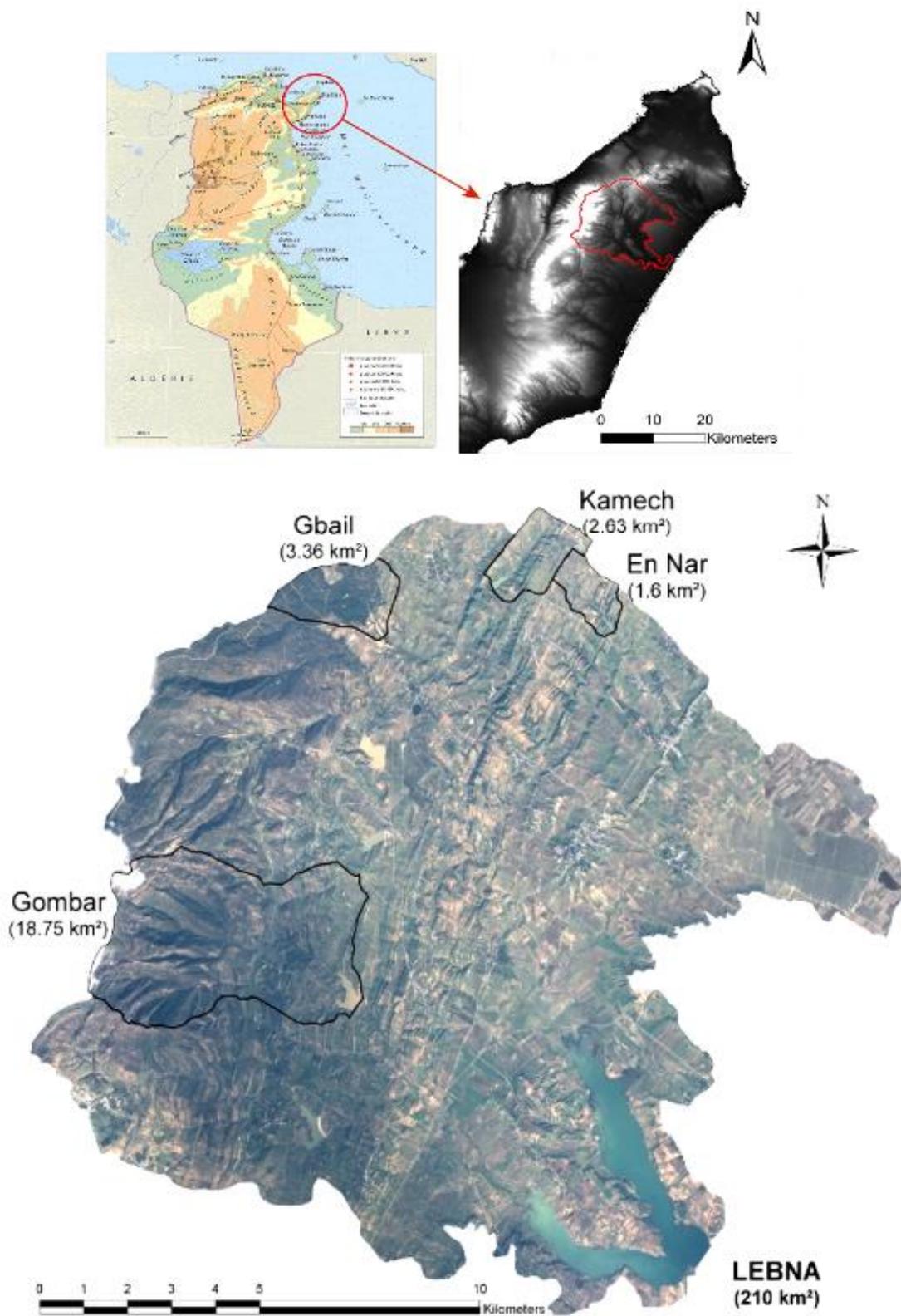
A. Présentation de site d'étude

Afin de mieux présenter le site d'étude, on vise définir ses caractéristiques géographiques, administrative, démographiques, climatiques, édaphique, hydraulique et enfin topographiques.

I. Cadre géographique et administratif :

Kamech est un bassin versant à vocation agricole et de forme rectangulaire fait partie d'un réseau de trente bassins expérimentaux de lacs collinaires sur la dorsale tunisienne.

Il se trouve au Nord Est de la Tunisie, se situe à la délégation d'EL Haouaria du gouvernorat de Nabeul appartenant au centre de la péninsule du Cap Bon (Figure 5). Il s'étend entre 10°45'-10°58'E et 36°43'-36°53'N. Il s'étale jusqu'à 2.5 km² avec environ 2.5 km de longueur et 0.9 km de largeur et il est situé au pied du Djebel Sidi Abd er-Rahmane (637 m) qui est la dernière montagne de la Dorsale tunisienne (Haut Tell), chaîne calcaire qui s'étend de Tébessa (Algérie) au Cap Bon. De surcroît, c'est un sous bassin versant de Lebna (BV source de 218 km²) (BOUTEFFEHA M. ,2010,Damien R.,2013, OMERE).



Localisation, modèle numérique de terrain et vue satellitale (image Quickbird) des bassins versants du Lebna et de Kamech. Trois autres sous-bassins versants équipés sont également identifiés.

FIGURE 5: LOCALISATION DE BASSIN VERSANT DE KAMECH SOURCE : L'OBSERVATOIRE MEDITERRANEEN DE L'ENVIRONNEMENT RURAL ET DE L'EAU (OMERE)

II. Cadre climatique :

Le BV de Kamech est caractérisé principalement par un climat méditerranéen subhumide à semi-aride.

En fait, La station météorologique officielle de l'Institut National Météorologique la plus proche se trouve à Kélibia (environ 15 km de Kamech) avec d'autres stations pluviométriques installées à Tazoghane (village attenant au bassin versant de Kamech) et Dar Chichou (environ 10 km de Kamech). La station de Kélibia enregistre une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 450-600 mm (INM, 1999). L'évaporation Piche annuelle, représentant le pouvoir évaporant de l'air, est inférieure à 1200 mm au Nord Est du Cap Bon. C'est l'évaporation annuelle la plus faible de toute la Tunisie (INOUBLI N., 2016).

▪ Température et pluviométrie :

Le climat de BV de Kamech se caractérise par une température inter-annuelle moyenne de 14°C et une pluviométrie inter-annuelle moyenne de 650 mm (Figure 7).

La saison pluvieuse est entre Octobre et Février et la saison sèche entre Juin et Août.

Cette classification n'empêche que de fortes pluies sont parfois observées pendant les autres mois (Figure 6) (Catalogue de l'ORE OMERE, IRD - Olivier Grûnberger).

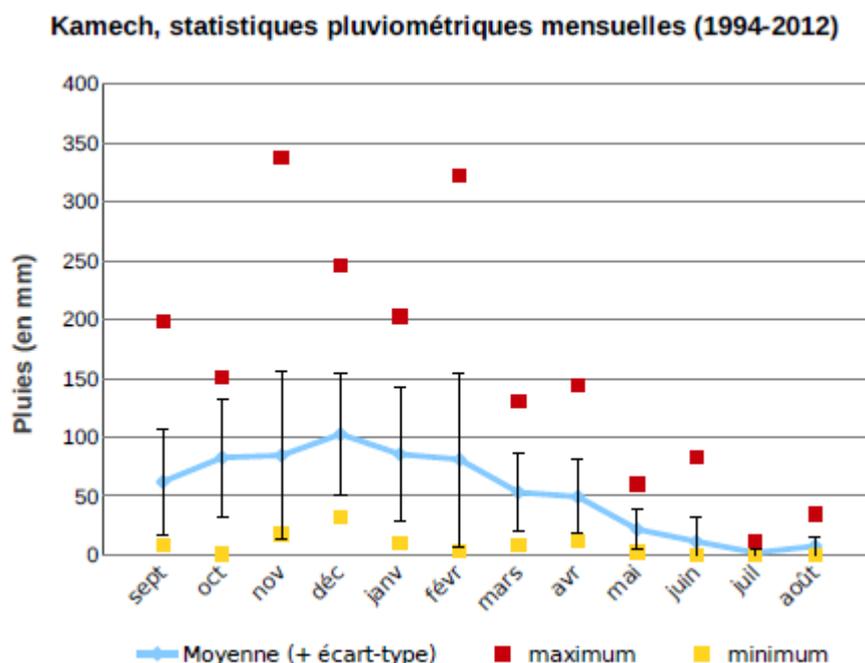


FIGURE 6: STATISTIQUES MENSUELLES DES PRECIPITATIONS (EN MM) SUR KAMECH DE 1994 A 2012

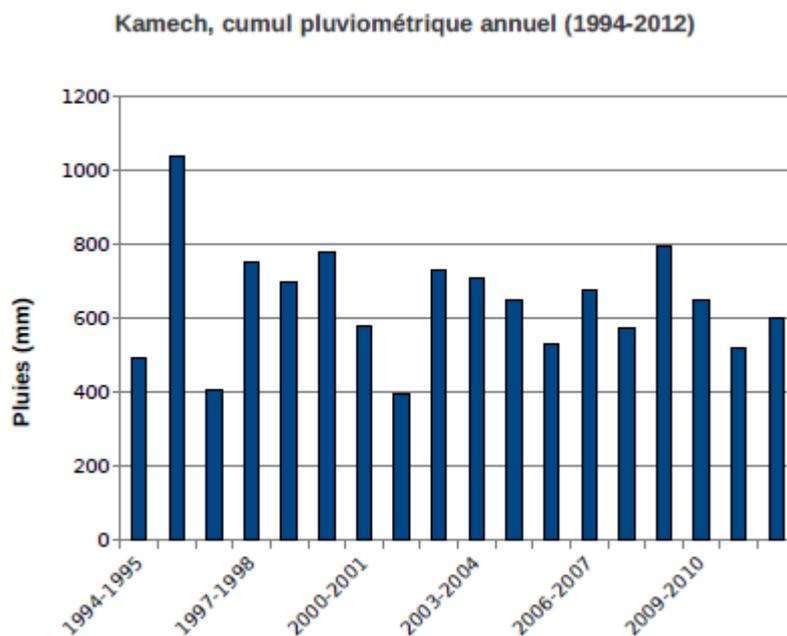


FIGURE 7: CUMUL ANNUEL SUR KAMECH DE 1994 A 2012

▪ **L'évapotranspiration :**

Les mesures au bac d'évaporation sont disponibles de 1995-2002 (Figure 8) et montrent que la lame évaporée annuelle moyenne est de l'ordre de 1500mm avec une évaporation annuelle minimale de 1200mm et une valeur maximale de 1692mm.

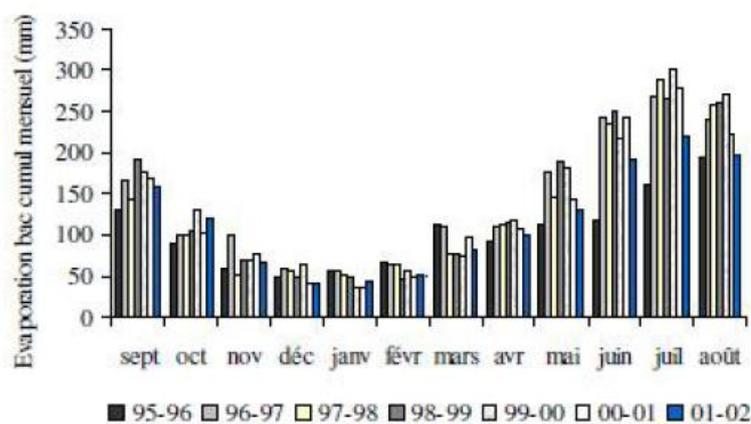


FIGURE 8: LAME D'EAU MENSUELLE EVAPOREE A KAMECH

❖ **Description de l'évolution de la lame d'eau mensuelle évaporée à Kamech:**

Les valeurs de la lame d'eau mensuelle évaporée montrent que l'évaporation se caractérise par une variation saisonnière marquée. Faible de novembre à février (en moyenne 2mm/jour), l'évaporation augmente à partir d'avril (en moyenne 5mm/j) et atteint un maximum au mois de juillet et août (en moyenne 8mm/j) (Hammouda A.,2011).

▪ **Étages bioclimatique :**

L'étage bioclimatique de BV de Kamech (Figure 9) est déterminé à travers certains paramètres : la distribution des pluies et des températures, l'amplitude thermique annuelle de 24°C et un rapport P/ETP de 0,2 à 0,5. Ces facteurs permettent de classer plus précisément ce bassin entre le bioclimat semi-aride supérieur et le bioclimat méditerranéen sub-humide inférieur (SCID).

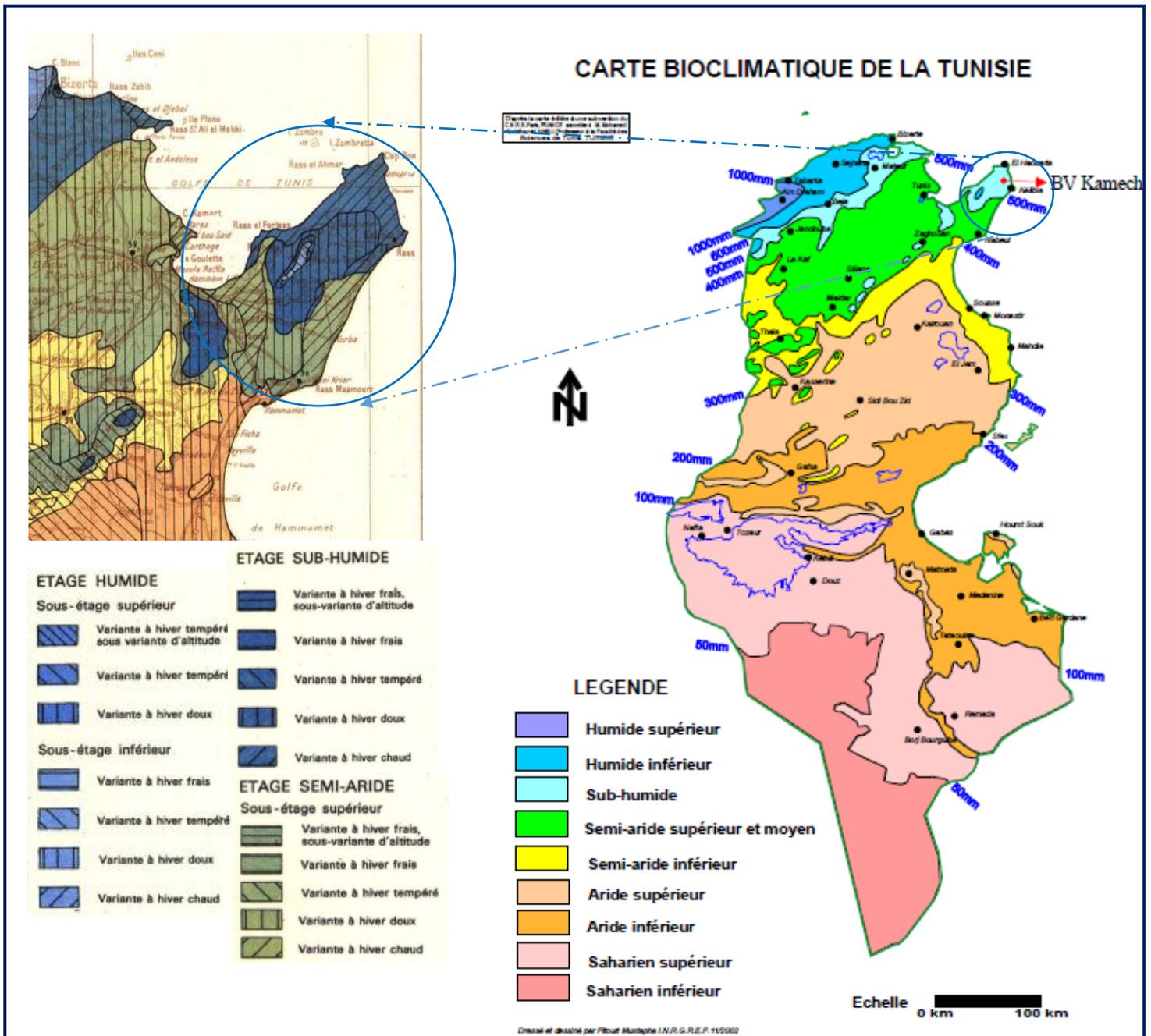


Figure 9: Carte bioclimatique de la Tunisie et du Cap Bon Source : JOINT RESEARCH CENTRE EUROPEAN SOIL DATA CENTRE (ESDAC)

▪ Diagramme ombro-thermique de Gausсен :

Un diagramme ombro-thermique (Figure 10) est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations pour mettre en évidence les périodes de sécheresses.

Dans la figure ci-dessous, on trouve la variation de la pluviométrie moyenne mensuelle et celle de la température moyenne avec l'évolution de l'évapotranspiration de référence estimée.

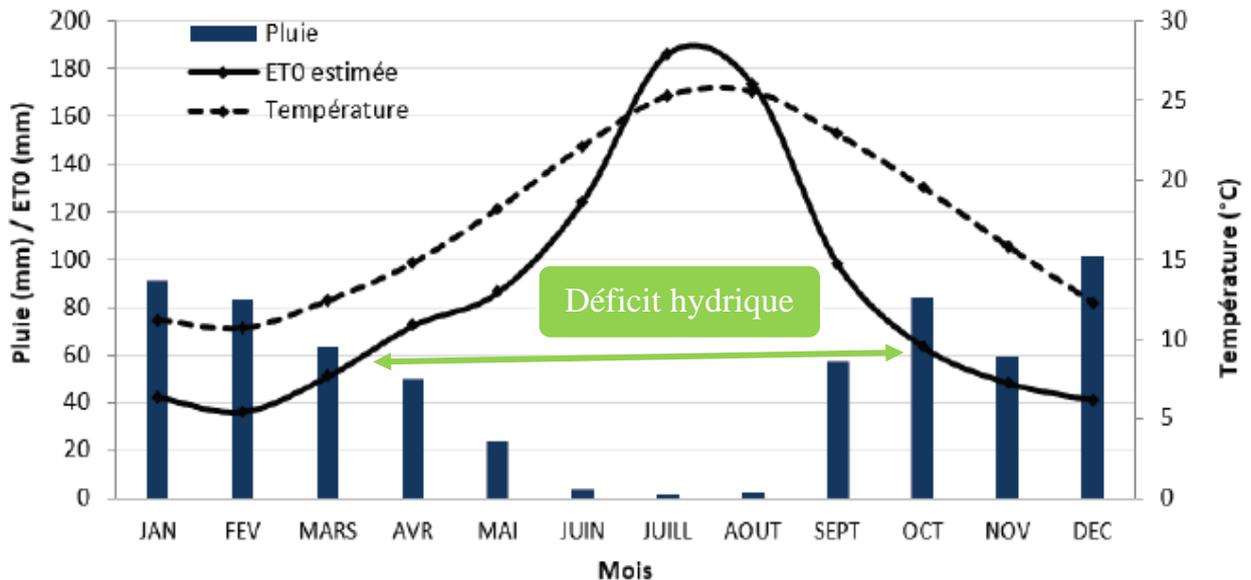


FIGURE 10: DIAGRAMME OMBRO-THERMIQUE DE GAUSSEN

❖ Interprétation :

D'après ce diagramme on peut constater que notre zone d'étude présente un déficit hydrique ou bien une période de sécheresse qui s'étale de la fin de Mars jusqu'à le début d'Octobre ou l'évapotranspiration mensuelle en (mm) emporte les précipitations mensuelles en (mm).

III. Cadre édaphique :

▪ Données géologiques et topographiques :

Kamech est situé sur le flanc sud-est de l'anticlinal Tertiaire de l'axe du Cap Bon, en rive gauche de l'oued el Ouidiane dans lequel on ne retrouve que les restes de l'ultime surface vers 160 m d'altitude en quelques alignements de sommets plans. En fait, cette surface est actuellement creusée par :

- Des vallées antécédentes coulant au nord-ouest et au sud-est de part et d'autre d'une crête nord-est – sud-ouest (sud Tazoghrane) ;
- Des vallons conséquents, comme celui de l'oued Kamech, parallèles aux axes tectoniques.
- Des ravines ou ensembles de versants perpendiculaires aux vallons précédents. Ce sont les ultimes entailles caractéristiques du bassin versant de Kamech. (Bouteffeha M. ,2010).

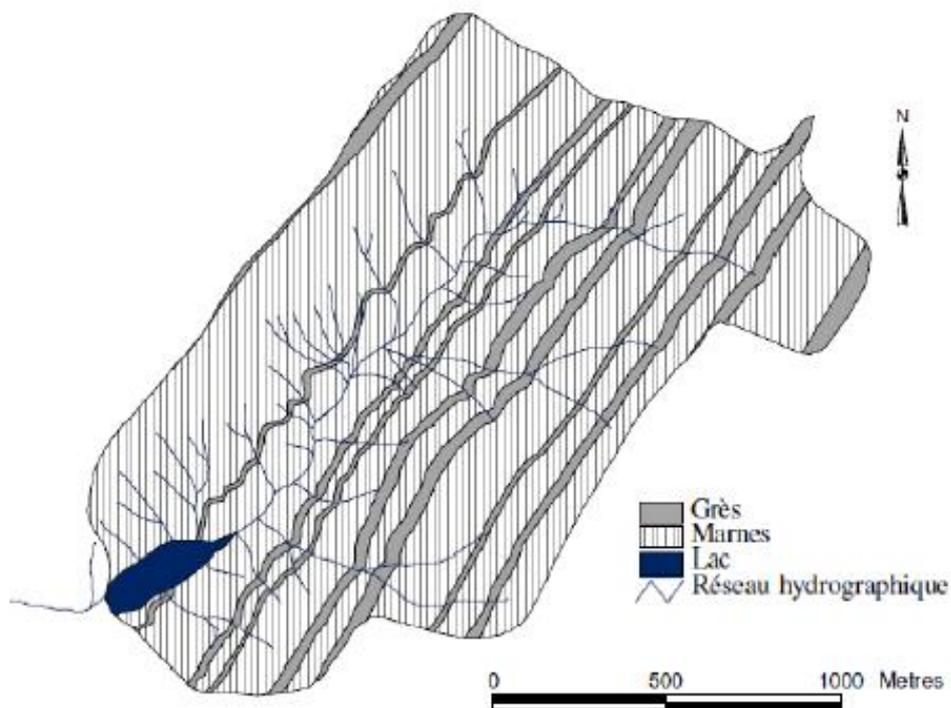


FIGURE 11: CARTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE KAMECH (MEKKI I., 2003)

❖ Interprétation de la carte géologique de site :

Le bassin versant de Kamech est situé sur le flanc sud-est de l'anticlinal Tertiaire constituant l'axe du Cap Bon. Le centre de cet anticlinal (Figure 11) est constitué par les sables et grès du Miocène inférieur (-22 Ma). Le flanc sud-est est occupé par des marnes verdâtres et de minces bancs gréseux ferrugineux du Miocène moyen (de -7 à -14 Ma) avec des pendages monoclinaux sud-est de 30 à 40° (Figures : 12 et 13).

Différentes phases d'aplanissements sont ensuite intervenues qui ont donné différents glacis (-1.8, -0.7, -0,35 et -0,1 Ma) (Hammouda A. ,2011).



FIGURE 12: COUPE GEOLOGIQUE SCHEMATIQUE DANS L'ANTICLINAL DU CAP BON ET LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE KAMECH (L'OBSERVATOIRE MEDITERRANEEN DE L'ENVIRONNEMENT RURAL ET DE L'EAU : OMERE)

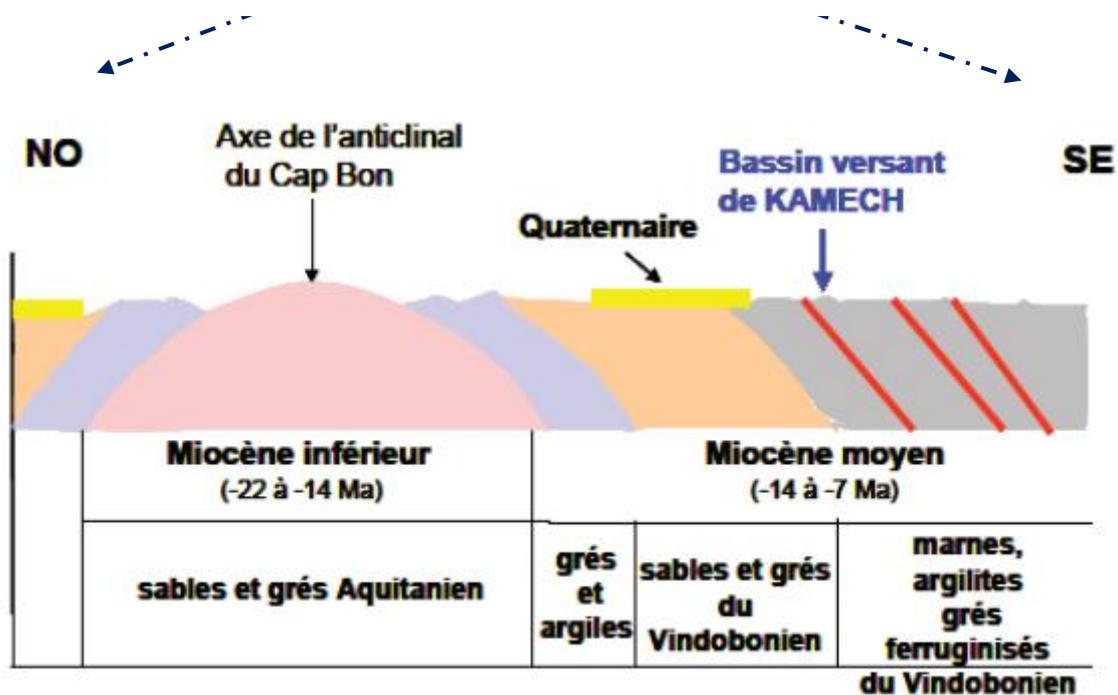


FIGURE 13: COUPE GEOLOGIQUE DETAILLEE DANS L'ANTICLINAL DU CAP BON ET LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE KAMECH (L'OBSERVATOIRE MEDITERRANEEN DE L'ENVIRONNEMENT RURAL ET DE L'EAU : OMERE)

❖ Interprétation des caractéristiques géologiques de site :

On constate une dissymétrie du BV de Kamech avec deux compartiments majeurs :

- Un versant gauche sillonné par les alignements de crêts formés par les minces bancs de grès ferruginisés armant les marnes en dépression ;
- Un versant droit en revers de côte, sa majorité est raviné vers la mi- versant aux dépens des marnes et argilites.

Le relief de Kamech est représentatif d'un relief collinaire avec une dénivelée maximale de 110 m et des pentes dépassant localement les 100% (ZITOUNA CHEBBI R.,2009).

Topographiquement, le BV de Kamech est caractérisé par une large dissymétrie entre la rive droite et la rive gauche ce qui influence le réseau hydrographique et le parcellaire.

Les pentes sont variables en magnitude et en direction puissent être réparties comme suit :

- Sur les limites du bassin versant et essentiellement sur la rive gauche et dans une moindre mesure le long du lit de l'oued : les pentes sont les plus douces, ne dépassent pas 5 % ;
- Suivent le trajet de l'oued : pentes sont les plus accentuées.

Les variations de pentes sont en lien avec le parcellaire avec variation des altitudes entre 80 et 200 m, et des pentes de 0 à 30 % (15°) (DAMIER R.,2013, OMERE).

▪ Données pédologiques :

L'altéropédogénèse est influencée par la pétrographie et le pendage des bancs sédimentaires. A Kamech, se trouvent des fronts de cuesta en rive gauche et des revers de côtes en rive droite (Figure 14) , ceci influe sur la profondeur des sols, sur leurs régimes hydriques, orientant soit une percolation soit une stagnation (DAMIER R.,2013).

En fait, trois catégories sont distinguées citées dans le dispositif d'observation sur le bassin versant de Kamech :

- Des sols argilo-limoneux à argiles actives, assez profonds (50 à 120cm en bas de versant) sur marnes et argilites.
- Des sols limoneux à limono-sableux fins, contenant peu d'argiles actives, peu profonds près des barres gréseuses dont les superficies affleurantes varient d'une rive à l'autre.
- Différentes zones de sols à caractères verticaux (topomorphes en bas fond et entre les barres gréseuses de la rive gauche, uniquement lithomorphes en rive droite) (OMERE).

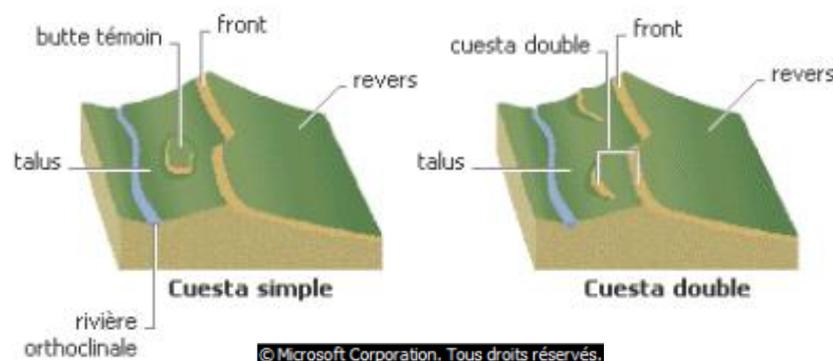


FIGURE 14: VALLEES DISSYMETRIQUES BORDEES PAR UN ESCARPEMENT RAIDE - CUESTA -

- **Texture du sol :**

La texture du sol du BV Kamech peut être classifiée sous trois catégories (Figure 15) :

- Sols argilo-limoneux à argiles actives, assez profonds (50 à 120cm en bas de versant) sur marnes et argilites ;
- Sols limoneux à limono-sableux fins, contenant peu d'argiles actives, peu profonds près des barres gréseuses dont les superficies affleurantes varient d'une rive à l'autre ;
- Différentes zones de sols à caractères vertiques (topomorphes en bas fond et entre les barres gréseuses de la rive gauche, uniquement lithomorphes en rive droite) (DAAMIER R.,2013).

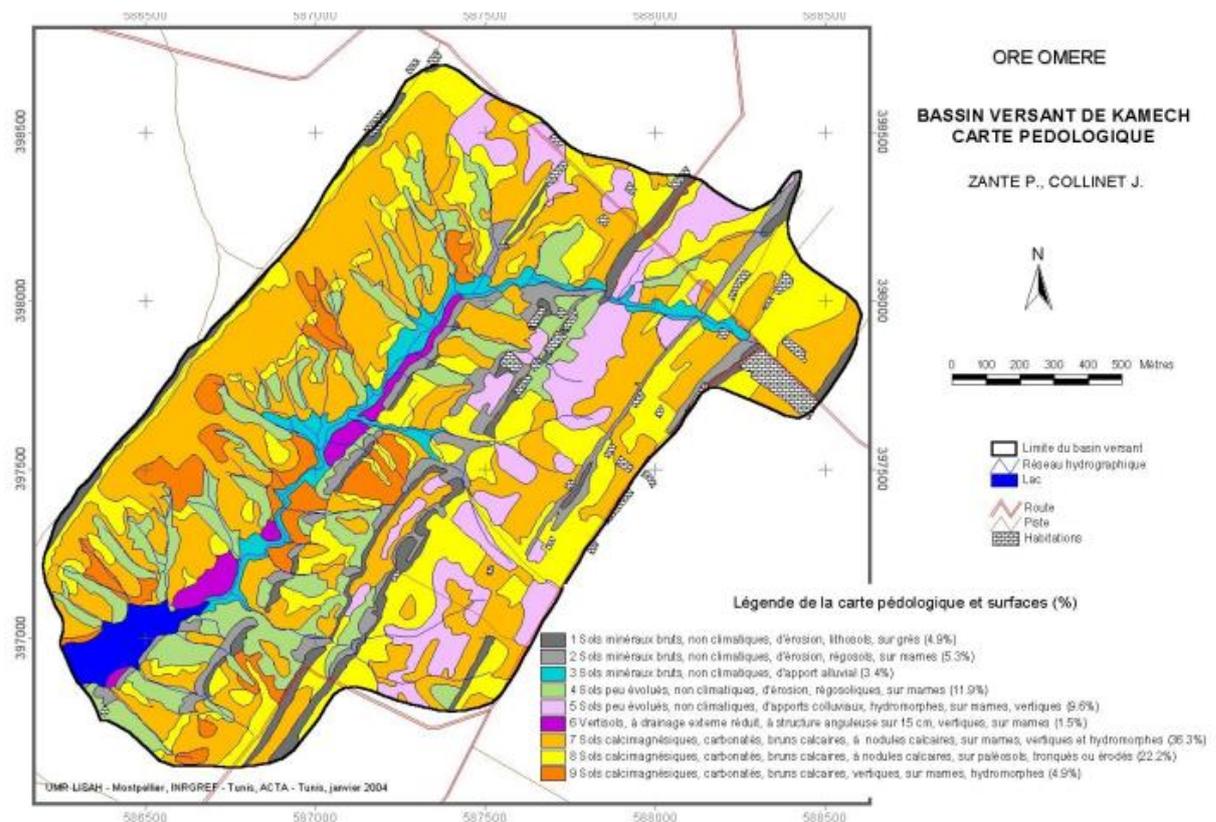


FIGURE 15: CARTE PEDOLOGIQUE (MEKKI I., 2003)

- ❖ **Description de la carte pédologique de site :**

La carte pédologique élaborée par Zante et al. En 2005 décrit neuf unités réparties dans quatre classes de la classification CPCS 1967 communément utilisée en Tunisie :

- Les sols minéraux bruts, non climatiques ;
- Les sols peu évolués, non climatiques ;
- Les vertisols ;
- Les sols calcimagnésiques.

- **Occupation du sol :**

L'occupation du sol du BV Kamech est étroitement liée au relief et à la qualité des sols (Figure 16). En effet, le bassin est très morcelé : la superficie médiane des parcelles est de 0,5 ha.

A ce propos, la variabilité spatiotemporelle de l'occupation du sol de Kamech est caractérisée par une répartition et des critères spécifiques. Elle est définie comme suit :

- La culture majoritaire est une culture circulaire de céréales et des légumineuses ;
- Des cultures de triticale, de fenugrec, de vesce et d'épices, se localisent sur les parcelles proches du lac collinaire avec quelques cultures irriguées (maraîchages) ;
- L'arboriculture est restreinte à quelques parcelles d'oliviers, avec l'existence d'une parcelle de vigne ;
- Végétation naturelle répandue sur les terrains à très fortes pentes en faveur des éleveurs pour le bétail ;

Notons bien que les parcelles emblavées en céréales ou en légumineuses peuvent être de mêmes exploitées comme parcours. (INOUBLI N.,2016, DAMIER R.,2013).

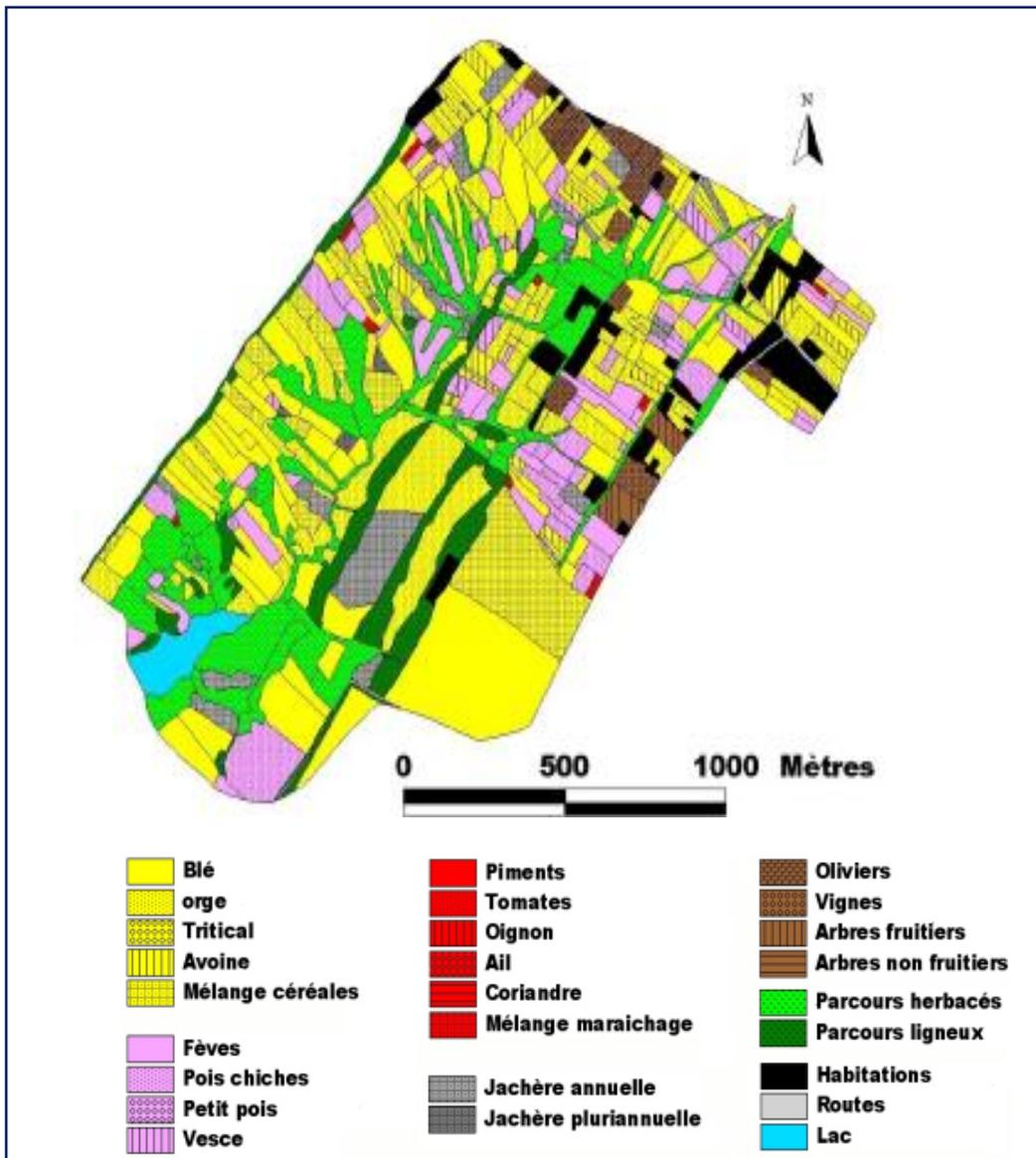


FIGURE 16: CARTE D'OCCUPATION DU SOL POUR L'ANNEE 2007-2008 (MEKKI I., 2003)

NB : La cartographie du parcellaire et la détermination des occupations des sols ont été déterminées sur Kamech depuis 1997 (DAMIER R.,2013).

IV. Ressources en eau :

▪ Réseau hydrographique :

Le BV de Kamech est traversé par l'oued el Gameh, dont l'exutoire est aménagé par un lac collinaire dont la capacité initiale de la retenue était de 140 000 m³ (OMERE, 2013).

Alors que le BV de Lebna renferme un barrage ainsi que retenues collinaires en amont (Figure 17).

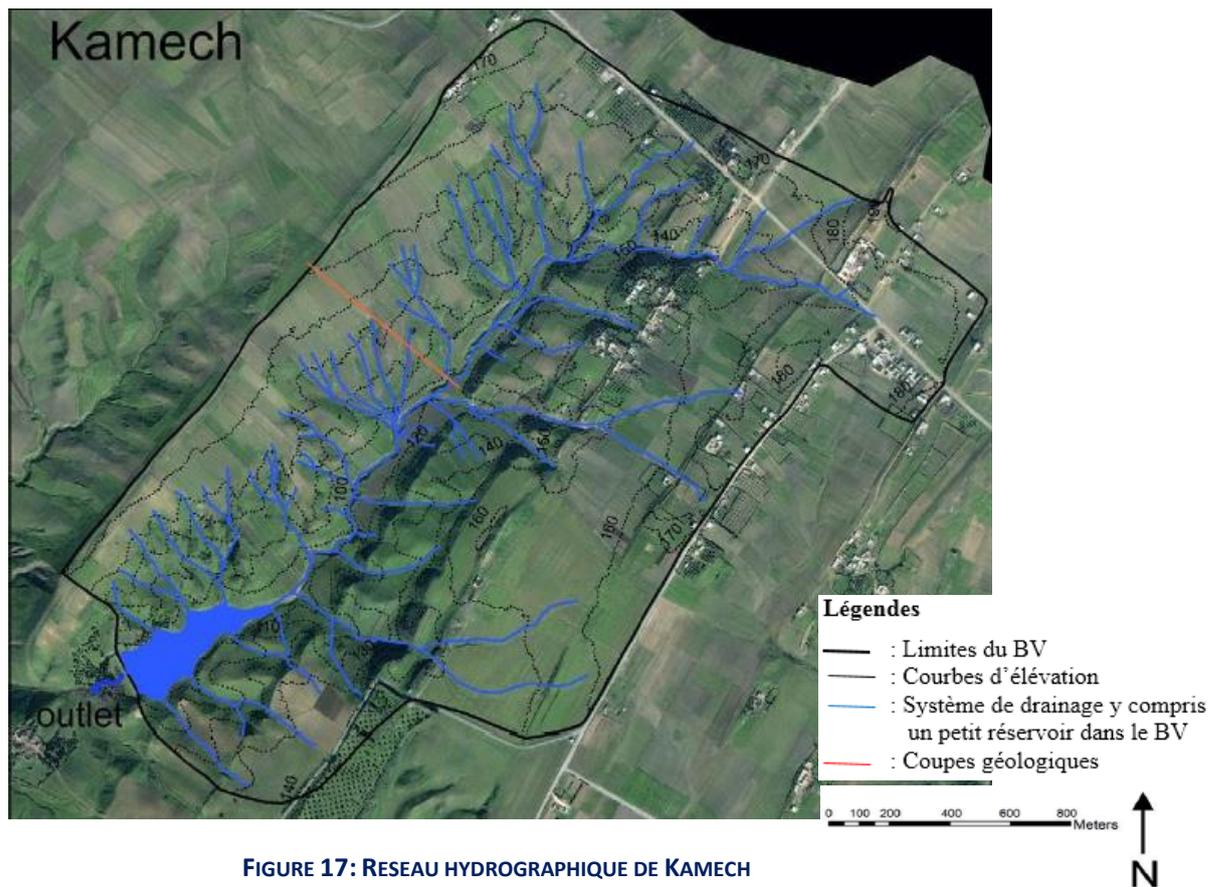


FIGURE 17: RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE KAMECH

▪ **Contexte hydrologique du bassin versant de Kamech :**

A partir des mesures du niveau du lac, traitées à travers l'analyse hydrologique faite par Mekki I. (2003), on constate une irrégularité des écoulements dans l'oued au cours d'une année (Figure 18).

Ainsi les écoulements sont quasi nuls d'avril jusqu'à septembre, et varient entre 5 et 35 L/s entre octobre et mars (environ 430 à 3 000 m³/j) avec un pic en février.

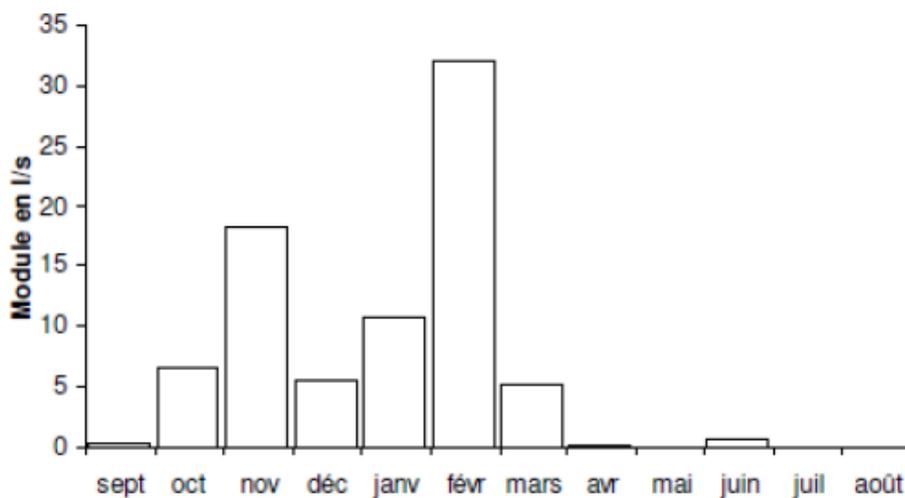


FIGURE 18: REGIME D'ÉCOULEMENT MOYEN MENSUEL A KAMECH (1994-2002) (MEKKI I., 2003)

B. Description du dispositif et jeux de données disponibles

I. Description du dispositif, technique de mesure et jeux de données piézométriques :

▪ Dispositif de mesure :

Pour assurer le suivi piézométrique sur l'ensemble du bassin versant, l'évolution de la profondeur de la surface libre de la nappe a été relevée sur divers ouvrages disposés à différents emplacements au niveau du BV de Kamech (Figures 19 et 20).

En fait, 22 piézomètres ont été récemment installés sur le BV (en 2007) répartis comme suit (Figures 19 et 21):

- 16 piézomètres en amont du bassin sont équipés par des sondes de mesure automatique toutes les 5 minutes ;
- 3 piézomètres autour du lac (piézomètres 17 et 18 en rive droite équipé par une sonde automatique et piézomètre 19 en rive gauche) ;
- 2 piézomètres dans la zone aval relevés manuellement périodiquement (HAMMOIDA A.,2011).

Alors, les différents paramètres du réseau piézométrique installé à Kamech sont récapitulés dans le tableau dans l'annexe 1.

Pour les mesures piézométriques, les prélèvements mensuels à partir des piézomètres avals (piez 21 et 22) et des piézomètres autour du lac (piez 17, 18) sont constamment chargés d'eau que ce soit pendant la période humide ou sèche.

Pour les piézomètres amont, la recharge est fortement liée à l'apport des pluies. En effet, la moitié de ces piézomètres sont à sec pendant l'été et il est impossible d'effectuer les prélèvements prévus pendant la saison sèche. Les piézomètres 5 et 6 ont été la plupart du temps à sec.

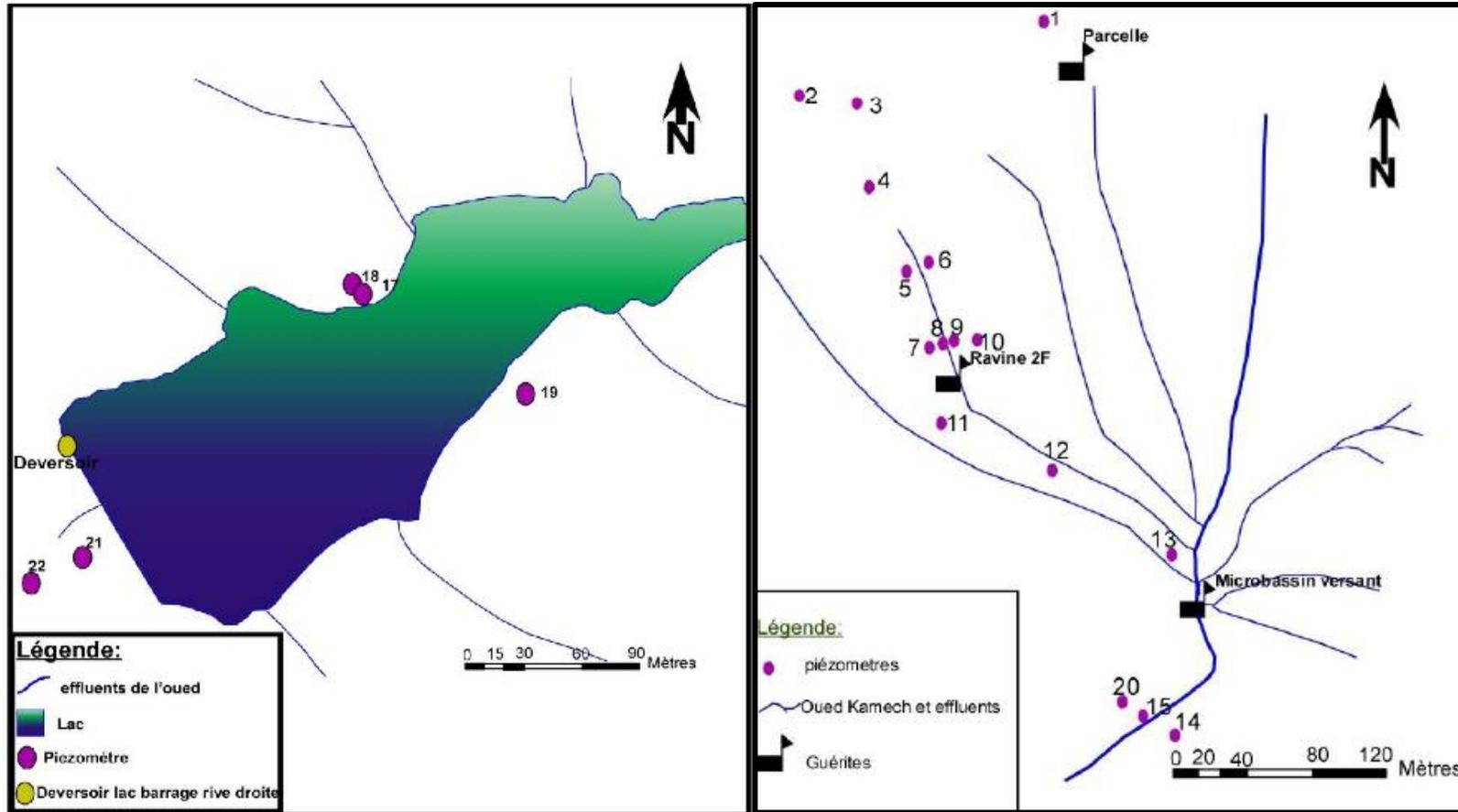


FIGURE 19: EMPLACEMENT DES PIEZOMETRES ECHANTILLONNES AUTOUR DU LAC ET EN AVAL (A GAUCHE) ET EN AMONT (A DROITE) DU BASSIN VERSANT DE KAMECH (MEKKI I., 2003)



FIGURE 20: DISPOSITIFS DE MESURE INSTALLEE A KAMECH (DAMIER R., 2008)

▪ **Technique de mesure :**

Les mesures piézométriques ont un objectif primordial dans n'importe quelle étude hydrologique. De ce fait, pour les aboutir, on doit respecter le principe de mesure (Méthodes d'auscultation de la structure auscultation des fondations,2015).

Principe et description sommaire - modalités d'applications	
Objectif	Mesure du niveau de la surface libre d'une nappe en profondeur ou de la pression d'une nappe captive.
Principe	<p>Après réalisation d'un forage, on descend dans celui-ci un tube piézométrique crépine sur une longueur minimale de 2 m et bouché à sa partie inférieure. La mesure ponctuelle de la profondeur d'eau se fait au moyen d'une sonde équipée d'une électrode que l'on descend axialement dans le tube ; lorsque l'électrode entre en contact avec l'eau elle s'allume et donne ainsi la position de la surface de la nappe. Il existe également des capteurs de pression qui peuvent permettre une acquisition en continu des niveaux d'eau en forage.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p style="text-align: center;">Schéma de principe de la méthode (CEREMA)</p> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div> <p style="text-align: center;">FIGURE 21: : SCHEMA DES ELEMENTS D'UN PIEZOMETRE</p> <p style="text-align: center;">FIGURE 22: VISITE DES MEMBRES DE L'EQUIPE D'OMERE (M. JEROME MOLENAT, M. RADHOUANE HAMDY, M. PIERRE CARLEVARIS ET M. KILANI BEN AZZEZ) ET LES ETUDIANTS M2 MHE A L'ENIT PROMOTION 2022, AVEC MME GUELLOUZ LAMIA (MAITRE-ASSISTANT A L'ENIT) AU BV KAMECH.</p>
Matériel spécifique Employé	<p>Matériel nécessaire au forage préalable (machine et atelier de forage du type de ceux employés pour les reconnaissances de sols).</p> <p>Sable pour combler l'espace annulaire entre le tube et le sol, et éventuellement argile pour confectionner le bouchon.</p> <p>Pour la mesure : Sonde piézométrique ou éventuellement capteur de pression.</p>
Domaine d'application	<p>Permet de connaître la profondeur du niveau de la nappe phréatique dans les sols au voisinage de l'ouvrage, mais aussi dans les barrages en terre, digues, etc.</p> <p>Permet de détecter des fuites à proximité d'ouvrages hydrauliques (écluses, digues, canaux, etc.) à condition de placer un nombre suffisant de forages.</p>

▪ **Données piézométriques :**

Les piézomètres installés à Kamech fournissent des mesures qui permettront de mieux comprendre les échanges entre la nappe, la surface, le lac, et de caractériser la répartition et le transfert de l'eau à l'échelle du bassin versant.

Les données piézométriques ayant les différentes caractéristiques indiquées ci-dessous :

Système géographique longitude latitude en degré décimaux basé sur le système géodésique WGS84
Coordonnées géographiques : longitude :10.87593 ° / latitude :36.88023 ° / altitude : mètre
Type de données : Piézométrie
Unité de mesure : m
Fréquence de mesure : 5 minutes
Niveau de diffusion des données : Courant
Responsable : Mr. Jérôme MOLENAT

II. Description du dispositif et jeux de données météorologiques :

▪ **Dispositif de mesure :**

L'objectif principal de ces mesures est de documenter les composantes majeures du bilan hydrologique en climat méditerranéen, à l'échelle du bassin versant.

A ce propos, une station météorologique ainsi qu'une tour à flux ont été installées sur le bassin versant de Kamech. A travers ces deux stations, un ensemble de capteurs est disposés afin de recueillir diverses variables météorologiques.

- La station météorologique, installée en 1998, est équipée de capteurs qui sont placés à deux mètres au-dessus du sol. Ces capteurs permettent l'acquisition du rayonnement global, de la vitesse et de la direction du vent, de la température et de l'humidité de l'air, de la pression atmosphérique (Figure 23).
- Les instruments utilisés sont : pyranomètre, anémomètre (A100R, vector), girouette(W200P), thermohygromètre (HPM45C, vaisala), baromètre (CS100, Setra).
- La tour à flux ou la station micro-météorologiques, installée en 2010, est équipée de capteurs installés à 10 mètres du sol, permet de mesurer l'évapotranspiration réelle (ETR) par la méthode des covariances turbulentes (Figures 24 et 25).

↳ Cette méthode est basée sur des mesures à hautes fréquences (10 à 20 mesures par seconde) de la vitesse verticale du vent, de la température de l'air et de l'humidité de l'air. Les instruments utilisés sont : anémomètre sonique (CSAT3, Campbell Sc), icor 7500, température et humidité de l'air (HMP45, vaisala).

- Des capteurs supplémentaires mesurant la température, l'humidité relative et la vitesse sont installés à 2 m de hauteur du sol permettant d'avoir un second point de mesure des variables météorologiques sur le BV.
- Une centrale d'acquisition calcule et stocke les valeurs moyennes sur des intervalles de temps de 30 minutes (Catalogue de l'ORE OMERE).



FIGURE 23: STATION METEOROLOGIQUE INSTALLEE AU BV KAMECH
SOURCE : CATALOGUE ORE OMERE



FIGURE 24: MESURE INTEGREE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE.
ANEMOMETRE SONIQUE ET HYGROMETRE INSTALLES A 10M DU SOL
(DAMIER R., 2008)



FIGURE 25: MESURE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE A L'ECHELLE LOCALE.
ANEMOMETRE SONIQUE ET HYGROMETRE OPTIQUE A HAUTEUR DE 2M DU SOL
(DAMIER R., 2008)

▪ **Données météorologiques :**

Afin de suivre la variation hydrodynamique des nappes en utilisant la méthode de l'analyse de la variation piézométrique, on recourt à la suivie des précipitations pour raffiner les mesures piézométriques obtenues.

De ce fait, les précipitations sont mesurées par trois pluviographes à auget basculeur et une dizaine de pluviomètres installés : l'un de ce pluviomètre journalier est installé sur une petite colline en rive gauche du lac collinaire. Les hauteurs aux pluviomètres sont relevées par un observateur chaque jour. Les données des pluviographes sont enregistrées automatiquement et récupérées trimestriellement. Ces données permettent de connaître la pluie instantanée. Leur cumul journalier est comparé aux pluies journalières relevées aux pluviographes. Et ci-dessous les caractéristiques des données pluviométriques obtenues.

Bassin versant : Kamech
Localisation : Kamech_Pluie_Journalière_Synthétique
Système géographique longitude latitude en degré décimaux basé sur le système géodésique WGS84
Coordonnées géographiques : longitude :10.86889 ° / latitude :36.87138 ° / altitude : mètre
Type de données : Pluviométrie
Unité de mesure : mm
Fréquence de mesure : journalier
Niveau de diffusion des données : Courant
Responsable : Mr. Damien RACLOT

C. Méthodes et outils de traitement des données

La recharge de la nappe a été étudiée sur la base d'une analyse des variations piézométriques. A ce propos, les mesures piézométriques au BV de Kamech sont collectées pour apprécier la dynamique des nappes phréatiques et de caractériser les processus de leur recharge. Ceci est conçu à partir d'un traitement bien étudié et bien raffiné des données piézométriques voire pluviométriques. Nous nous sommes appuyés sur cela sur des chroniques de mesure de 15 piézomètres avec un pas de temps suffisant (pas de temps moyenné de 10min).

Notre démarche alors repose d'un point de vue méthodologique sur deux étapes :

Dans une première étape, nous avons développé une méthode pour extraire les caractéristiques de chaque événement de recharge dans chacun des piézomètres retenus. Cependant, malgré la simplicité d'acquisition des mesures, ce fonds de connaissance constitue un apport exceptionnel (par manque de temps ou de moyens, panne ou maltraitance des appareils...), ce qui mène soit à un manque de données, soit à des mesures aberrantes. De surcroît, les séries de mesures sont assez longues, ce qui nécessite le recours à l'automatisation du traitement de ces données.

C'est l'étape que nous décrivons dans cette partie.

Dans une seconde étape, nous avons conduit une analyse statistique entre ces caractéristiques et des facteurs explicatifs.

C'est l'étape que nous décrivons dans la partie suivante.

I. Méthodologie de traitement des données :

Dans le but de l'étude de l'hydrodynamique des nappes et la détermination des caractéristiques de leur recharge, on a recours à la méthode de l'analyse des variations piézométriques permettant de déterminer les caractéristiques suivantes (Figure 26) :

- ✓ Evènement de recharge ;
- ✓ T initial : Temps de début d'un évènement (Date et heure) ;
- ✓ T pic : Temps de pic (Date et heure) ;
- ✓ T final : Temps de la fin de l'évènement (Date et heure) ;
- ✓ Temps de montée : Temps de recharge de la nappe (min) ;
- ✓ pz initiale : Valeur piézométrique initiale (m) ;
- ✓ pz max : Valeur piézométrique après recharge ;
- ✓ Amplitude piézométrique : Amplitude de la recharge de la nappe (m).

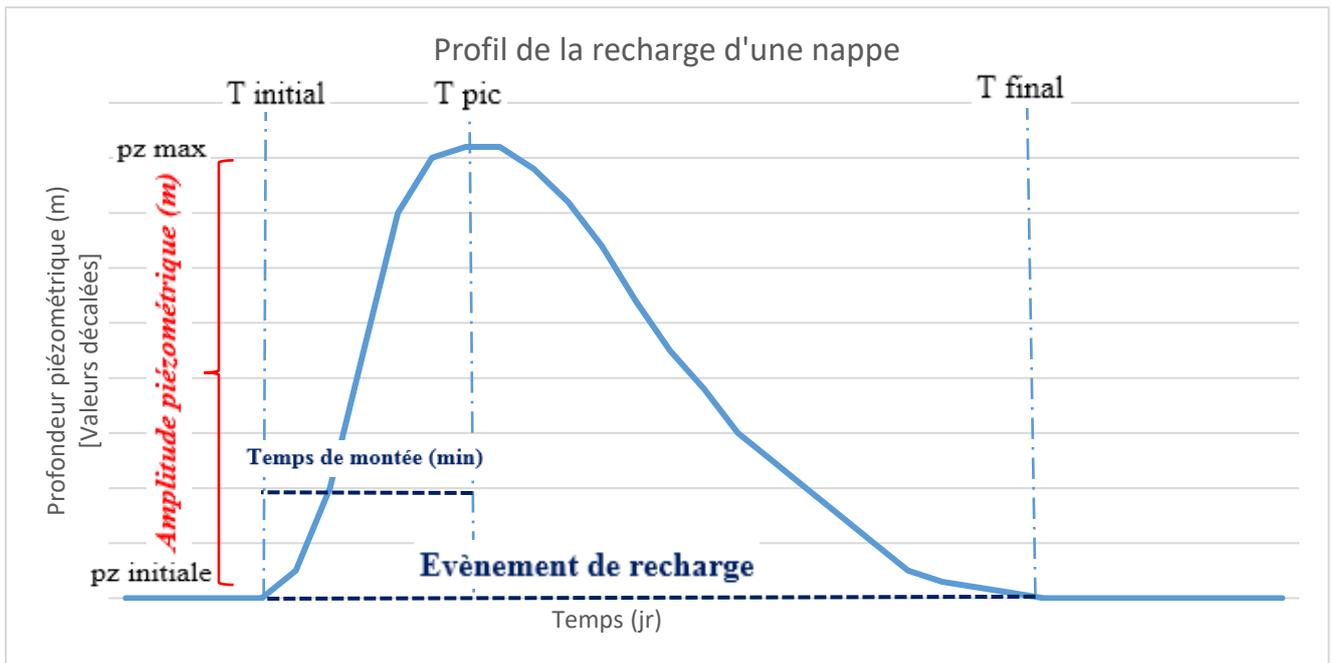


FIGURE 26: PROFIL DE LA RECHARGE D'UNE NAPPE

Toutefois qu'on vise étudier la dynamique des nappes à travers l'étude de la variation piézométrique et la détermination de ces caractéristiques, on se heurte à certaines difficultés principalement l'analyse des séries de mesures volumineuses et qui s'étalent sur des périodes assez importantes, ainsi que l'étude de la variation piézométrique de plusieurs piézomètres à la fois.

Dans notre cas, les chroniques de mesures piézométriques étant longues de plusieurs années selon des fréquences fines (au moyenne 10 min), nous disposons de chroniques de série de mesures volumineuse pour chaque piézomètre. Donc la détection manuelle des évènements de recharge et la détermination de ses caractéristiques demeure un peu délicate.

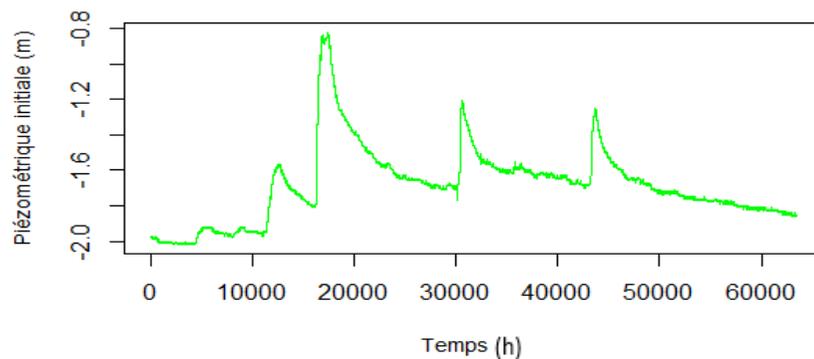
Du coup, on a essayé de développer une méthode automatisée permettant de suivre cette variation et d'extraire ensuite les caractéristiques de chaque évènement de recharge pour des séries de mesures qui s'étalent sur des durées assez importantes. Ce qui est bien développé dans partie suivante.

Cette méthode est donc bien détaillée à travers le processus ci-dessous :

Traitement piézométrique

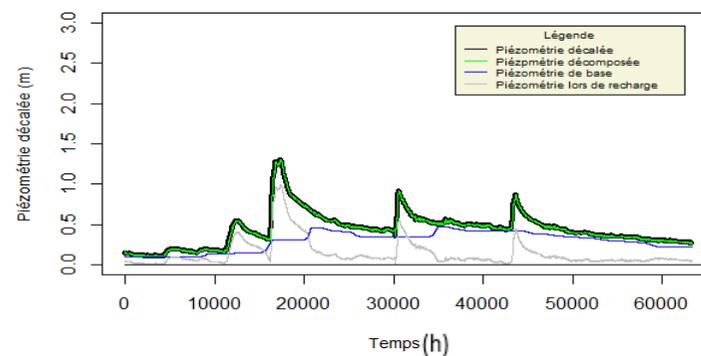
Décalage piézométrique

Décalage des valeurs piézométriques afin d'aboutir à des valeurs positives



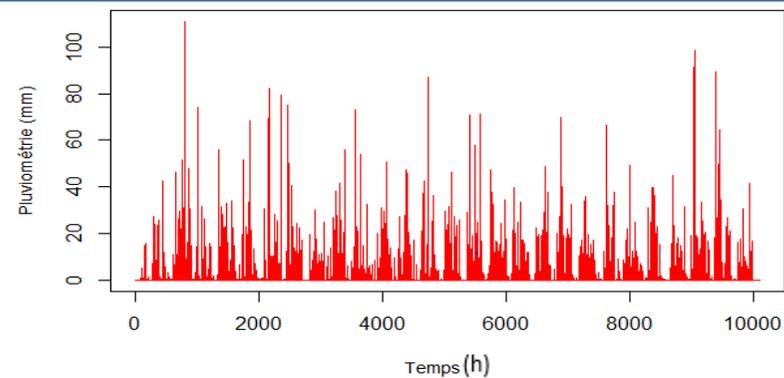
Décomposition piézométrique

Décomposition des données piézométriques avec filtrages des valeurs piézométriques



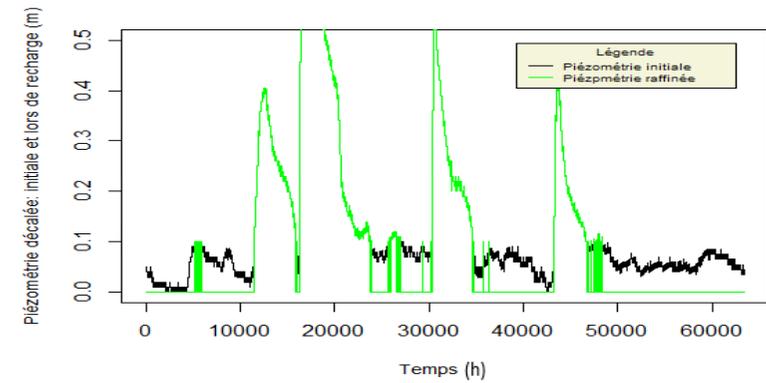
Traitement pluviométrique

Raffinement des données pluviométriques par classification des journées pluvieuses et non pluvieuses par indices



┆ Raffinement piézométrique

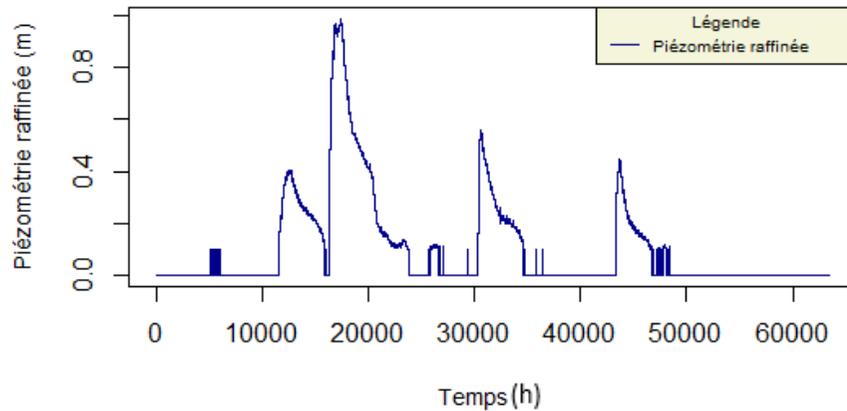
Raffinement des données piézométriques selon la base de deux critères :
raffinement pluviométrique et amplitude piézométrique



┆ Détection des caractéristiques des évènements de recharge

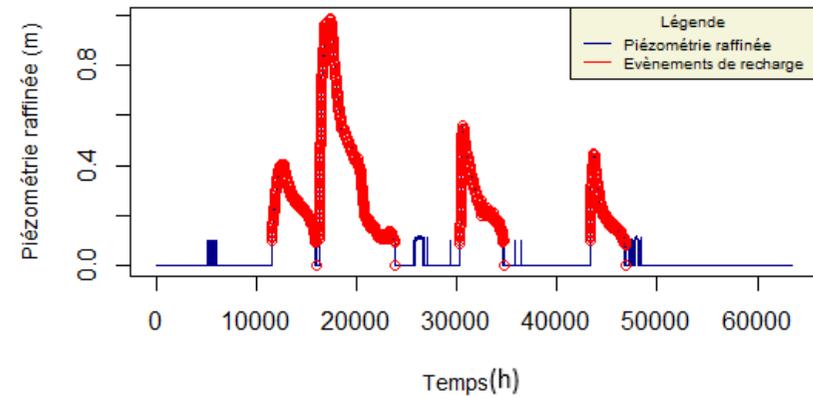
Détection des évènements

Détection des évènements et détermination des caractéristiques de la recharge



Raffinement des caractéristiques des évènements : Résultat final

Raffinement des caractéristiques des évènements et résultat final



1. Méthodologie de traitement des données piézométriques :

L'évolution hydrodynamique des nappes peut être assimilée à la variation du débit, en fait, le profil d'un événement hydrodynamique de nappe (charge, décharge) se ressemble à un hydrogramme de crue représentant (crue, décrue). Le principe duquel on a inspiré le principe du traitement piézométrique en particulier la décomposition piézométrique (Figure 26).

Du coup, le traitement des mesures piézométriques acquises est effectué en suivant cette hiérarchisation :

- ↳ Détecter toute valeur piézométrique manquante et la remplacer par la première valeur précédente non nulle ;
- ↳ Décaler des valeurs piézométriques pour les rendre positives avec un décalage égal à 0.1 m plus la valeur minimale de la série des mesures.
- ↳ Décomposition des mesures piézométriques à travers une séparation des données piézométriques de basse fréquence (ne seront pas tenus en compte) et données piézométriques de haute fréquence lors de recharge (données de base pour le traitement) en se basant sur la séparation de Nathan and McMahon (1990) qui est détaillée dans l'annexe, en choisissant un paramètre de filtrage adéquat pour notre analyse de l'ordre de 0.96 avec 375 passes.

Résultat de décomposition : retourne une base de données à deux colonnes : la première contient les données piézométriques de base (légères fluctuations piézométriques après recharge), tandis que la seconde contient les valeurs piézométriques à haute fréquence lors de la recharge. (Figure 27)

2. Méthodologie de traitement des données pluviométriques :

Les données pluviométriques ont subi de leurs tour une classification selon indice, tel qu'on correspond au jour pluvieux un indice 1 alors que celui non pluvieux on l'accorde 0. Ceci permettra par la suite le raffinement des données. (Figure 28)

3. Méthodologie de raffinement des données :

Le raffinement porte sur les variations piézométriques à haute fréquence (classées auparavant) qui sont raffinées selon deux conditions :

- Selon la pluviométrie :

Toute valeur piézométrique prise à une date bien déterminée tel que les indices pluviométriques des trois derniers jours qui précèdent cette date sont nuls, est considérée comme nulle aussi, tout en gardant le reste des valeurs.

- Selon l'amplitude de la variation piézométrique :

Toute valeur piézométrique d'amplitude inférieure à 0.1 m est considérées comme variation négligeable donc nulle. (Figure 29)

4. Méthodologie de détection des caractéristiques des évènements de recharge

A travers ces traitements, on vise à déterminer les caractéristiques des évènements de recharge, en suivant ce process :

- Définir des incertitudes :
 - Incertitude sur la mesure piézométrique de 0.02 m ;
 - Incertitude sur l'amplitude de 0.04 m, valeur au-dessous de laquelle les amplitudes sont considérés comme non significatives, du coup, les avancements ne sont pas retenus.
- Raccrocher les petits évènements par élimination des légères fluctuations rapprochées avec pas de 144 pour répondre dans notre cas à nos mesures journalières chaque les 10 min ;
- Décortiquer tout d'abord les évènements et tant que nombre des évènements, début, fin et pic de chaque évènement ;
- Déterminer pour chaque évènement le temps de montée de la nappe (temps de la recharge), l'amplitude et la valeur maximale de recharge. (Figure 30)

II. Outil de traitement des données :

Le traitement des données piézométriques et pluviométriques, leurs raffinements ainsi que la détermination des caractéristiques des évènements de recharge de la nappe (élaborés dans la partie suivante : Méthodologie de traitement des données) sont effectués à travers le langage de traitement des données, qui est dérivé du langage S, avec l'ajout du staff lexical, lui-même inspiré du Scheme, un langage de programmation différent. Le code source du R est majoritairement écrit en C, Fortran et R (Web & Tech).

Ce langage R peut être utilisé via diverses interfaces graphiques : Emacs, Jupyter ou RStudio.

RStudio est l'interface qu'on a utilisée dans ce travail.

A ce propos, le développement de ce travail est décomposé en quatre scripts décrits par suite :

- ✓ Script de décomposition piézométrique ;
- ✓ Script de traitement pluviométrique ;
- ✓ Script de raffinements piézométrique ;
- ✓ Script de détection des évènements de recharge.

Les caractéristiques de chaque Script sont représentées par un tableau récapitulatif associé.

NB : Le traitement et l'exécution sont faites pour la première série de mesures : pz1 et appliqués par suite pour les autres piézomètres :

1. Premier Script : Décomposition piézométrique

TABLEAU 2: SCRIPT DE DECOMPOSITION PIEZOMETRIQUE

Premier Script : Décomposition piézométrique	
Intitulé	Decomposition.piezogramme.V2.R
Nombre des lignes de Script	121
Les inputs	HYSAE_pz1.csv (Fichier csv) : Fichier des valeurs piézométriques (m)
Les outputs	Exportation.pz1.csv (Fichier csv)
Résultat du traitement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Décalage des valeurs piézométriques afin d'aboutir que des valeurs positives ; ▪ Décomposition des données piézométriques avec filtrages des valeurs piézométriques.

2. Deuxième Script : Traitement pluviométrique

TABLEAU 3: SCRIPT DE TRAITEMENT PLUVIOMETRIQUE

Deuxième Script : Traitement pluviométrique	
Intitulé	Traitement.pluvio.2.R
Nombre des lignes de Script	98
Les inputs	HYSAE.pluviometrie.2007-2021.csv (Fichier csv) : Fichier des valeurs pluviométriques (mm)
Les outputs	Exportation.pluv.tmp.csv (Fichier csv)
Résultat du traitement	Raffinement des données pluviométriques par classification des journées pluvieuses et non pluvieuses par indices

3. Troisième Script : Raffinements piézométrique

TABLEAU 4: SCRIPT DE RAFFINEMENT PIEZOMETRIQUE

Troisième Script : Raffinement piézométrique	
Intitulé	Raffinement.nv.R
Nombre des lignes de Script	130
Les inputs	<ul style="list-style-type: none">▪ Exportation.pz.csv (Fichier csv)▪ Exportation.pluv.tmp.csv (Fichier csv)
Les outputs	Exportation.Raffinement.pz.csv (Fichier csv)
Résultat du traitement	Raffinement des données piézométriques selon la base de deux critères : raffinement pluviométrique et amplitude piézométrique

4. Quatrième Script : Détection des évènements de recharge

TABLEAU 5: SCRIPT DE DETECTION DES EVENEMENTS DE RECHARGE

Quatrième Script : Détection des évènements de recharge	
Intitulé	Evenement.detection.R
Nombre des lignes de Script	242
Les inputs	Exportation.Raffinement.pz.csv (Fichier csv)
Les outputs	evenement.pz.csv (Fichier csv)
Résultat du traitement	<ul style="list-style-type: none">▪ Détection des évènements et détermination des caractéristiques de la recharge ;▪ Raffinement des caractéristiques des évènements et résultat final.

CHAPITRE 3 :
**Analyse de la dynamique
hydrologique de la nappe**

CHAPITRE 3 : Analyse de la dynamique hydrologique de la nappe

Dans ce chapitre on présente les résultats des traitements décrits auparavant qui définissent les événements de recharge des nappes ainsi que leurs caractéristiques à travers l'analyse de la variation piézométrique au cours du temps.

Ces résultats sont obtenus à partir du traitement de 15 piézomètres (telles que leurs caractéristiques et leur répartition déjà prédéfinies dans le deuxième chapitre), et de chroniques qui s'étalent sur une durée de mesure de 12 ans avec des mesures quasi-continues avec pas de temps de 10 min, cependant, en raison de mémoire de stockage qui est insuffisante, on s'est limité au traitement des mesures totales divisées par 20. Et ci-après les résultats des différents traitements obtenus.

A. Résultat du traitement des données

Le traitement des données piézométriques permet d'aboutir aux résultats présentés ci-dessous pour le premier piézomètre (pz.1) (Les résultats des autres sont présentés dans l'annexe) :

I. Résultats de traitement des données piézométriques :

A partir du code de décomposition piézométrique, on a eu les résultats suivants :

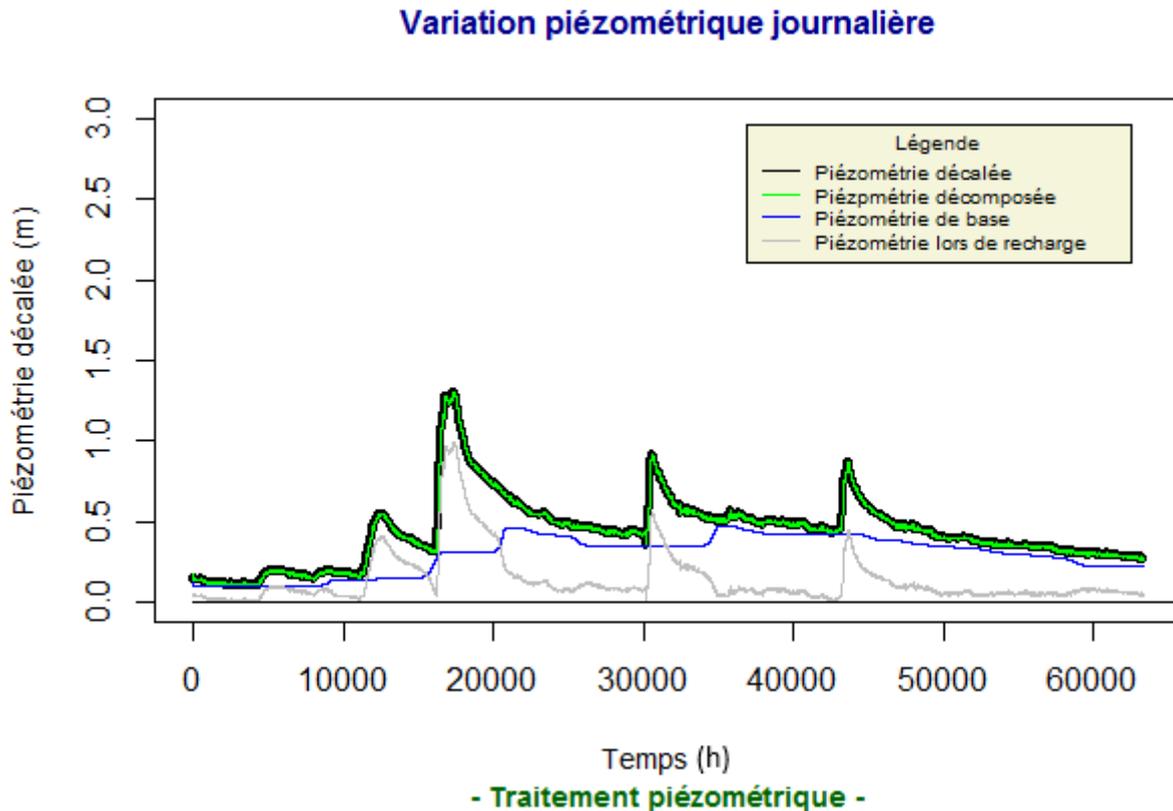


FIGURE 27: CHRONOGRAMME DE LA VARIATION PIEZOMETRIQUE JOURNALIERE

On a eu alors :

- Les chronogrammes de la variation piézométrique après la décomposition, qui permet de séparer la série en un signal de base à basse fréquence (ligne bleue sur la figure 27) et un signal haute fréquence (ligne grise sur la même figure). C'est ce signal haute fréquence que nous assimilons aux événements de recharge, et que nous cherchons ensuite à affiner.
- Fichier Excel donnant :
 - Date.Heure (horodatage des mesures piézométriques) ;
 - Date (date des mesures) ;
 - Valeur (valeurs piézométriques initiales)
 - b.pz (piézométrie de base : de basse fréquence) ;
 - r.pz (piézométrie lors de recharge : à haute fréquence).

II. Résultats de traitement des données pluviométriques :

A partir du code de traitement pluviométrique, on a eu les résultats suivants :

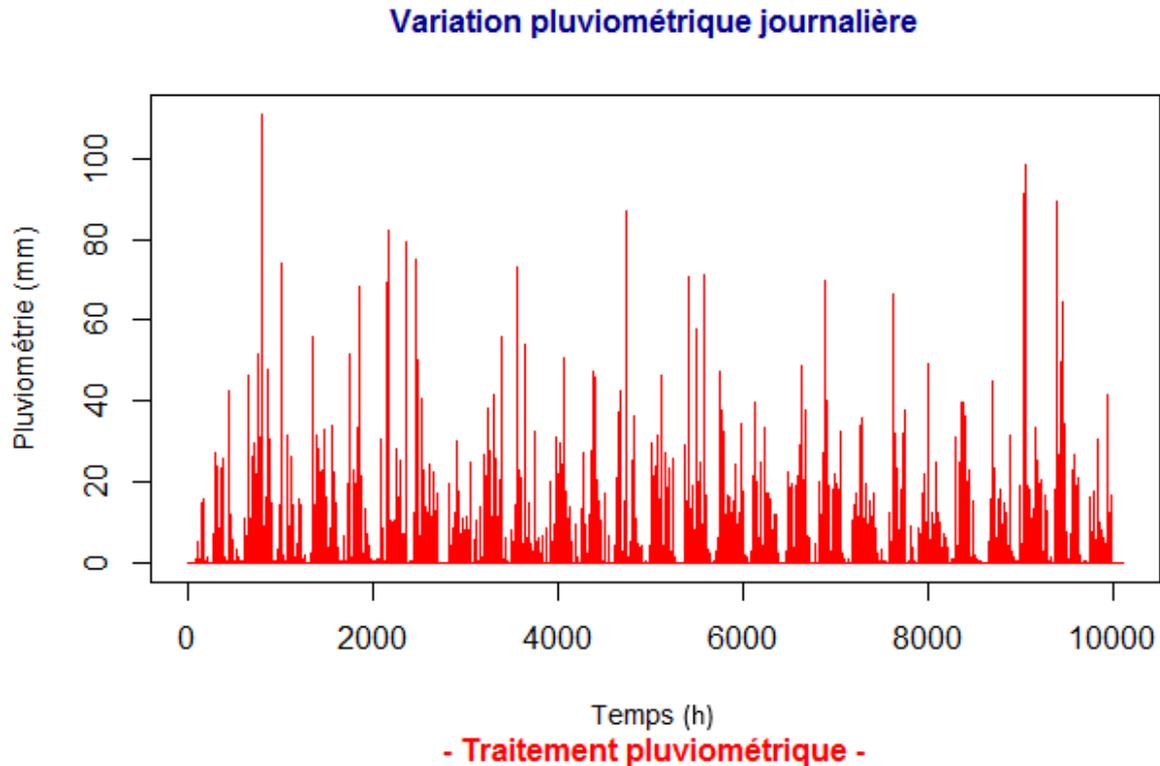


FIGURE 28: CHRONOGRAMME DE LA VARIATION PLUVIOMETRIQUE JOURNALIERE

On obtient :

- Les chronogrammes de la variation pluviométrique journalière de la série de mesure après un traitement (ligne rouge sur la figure 28), et qui fournit à partir d'une variation pluviométrique journalière initiale mesurée en mm, une variation journalière affinée selon les conditions prédéfinies auparavant (dans le deuxième chapitre, paragraphe « Méthodologie de traitement des données pluviométriques »).
- Fichier Excel donnant :
 - Date (date de mesure) ;
 - Valeur (valeur pluviométrique initiale en mm) ;
 - Indice (0 ou 1 selon les conditions déjà définies).

III. Résultats de raffinement des données :

A partir du code de raffinement piézométrique, on obtient les résultats suivants :

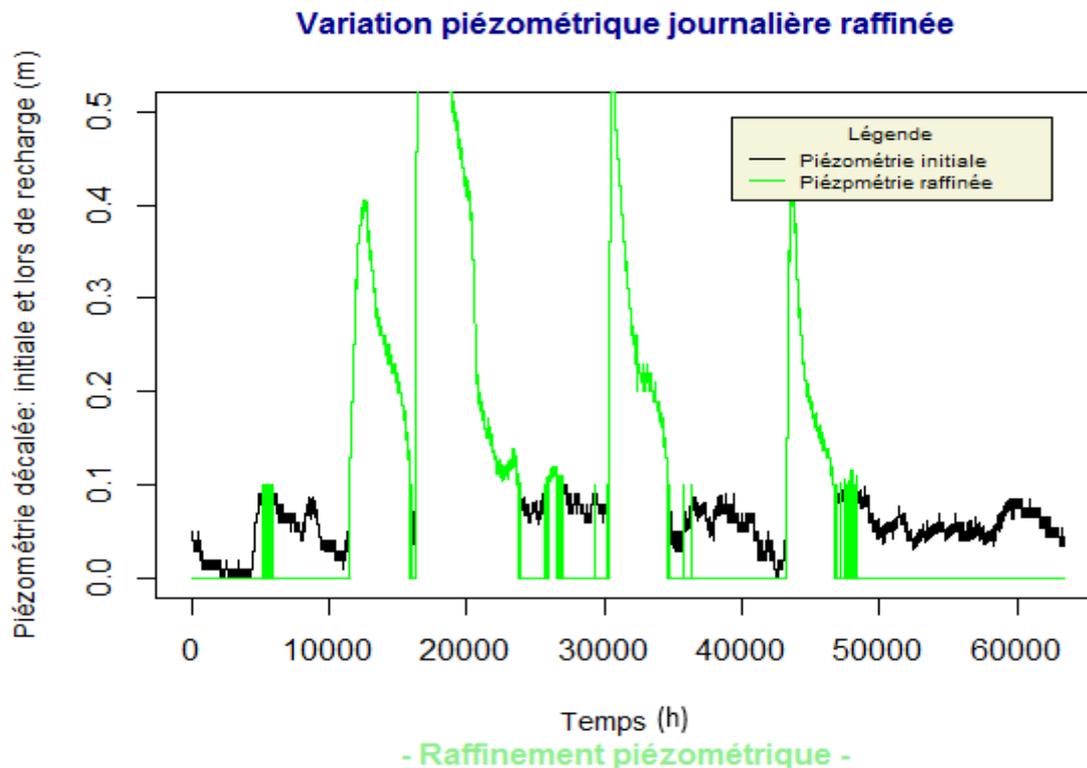


FIGURE 29: CHRONOGRAMME DE LA VARIATION PIEZOMETRIQUE RAFFINEE

On obtient :

- Les chronogrammes de la variation piézométrique après traitement selon les conditions prédéfinies auparavant (dans le deuxième chapitre paragraphe « Méthodologie de raffinement des données »). En fait, en se référant au traitement pluviométrique et à une condition sur l'amplitude piézométrique, ce traitement permet de traiter les mesures piézométriques et de fournir un chronogramme de variation des mesures piézométriques initiales (ligne noire sur la figure 29) et de celles raffinées (ligne vert clair sur la même figure)
- Fichier Excel donnant :
 - Date ;
 - Valeur ;
 - b.pz (piézométrie de base : à basse fréquences) ;
 - r.pz initiale (piézométrie lors de recharge (à haute fréquences) avant raffinement) ;
 - r.pz (piézométrie lors de recharge (à haute fréquences) après raffinement).

IV. Détection des évènements et des caractéristiques de recharge :

A partir du code de détection des évènements, on obtient les résultats suivants :

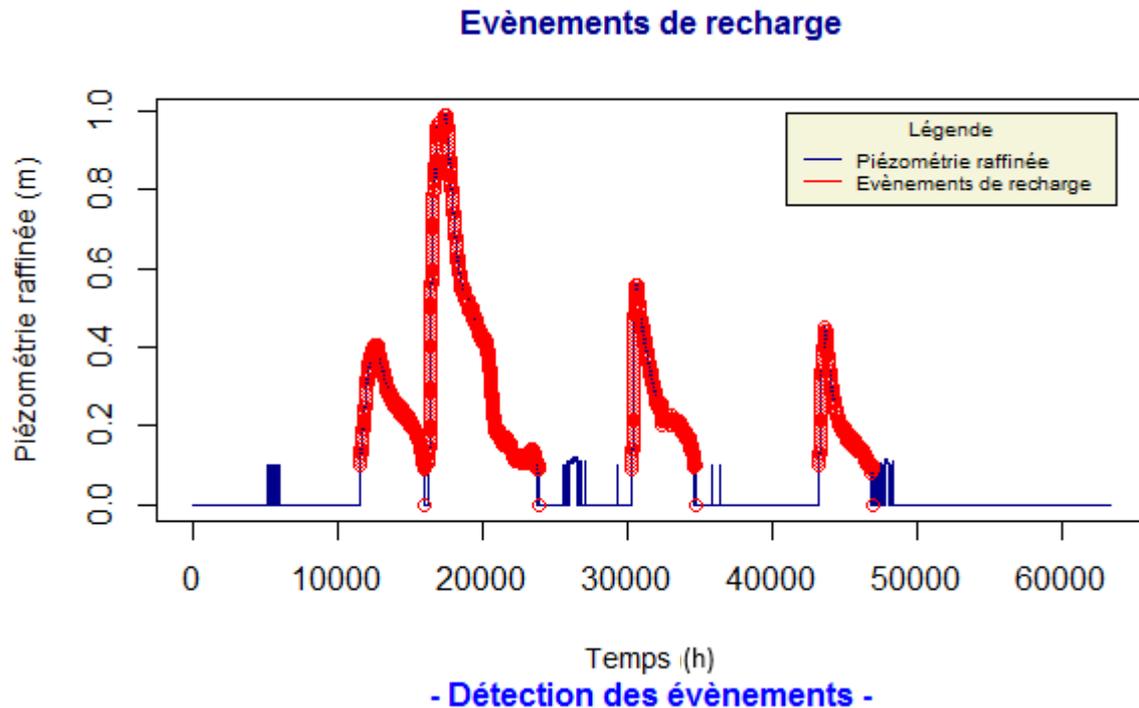


FIGURE 30: CHRONOGRAMME DE LA VARIATION PIEZOMETRIQUE RAFFINEE ET DETECTION DES EVENEMENTS DE

On obtient aussi :

- Les chronogrammes de la variation piézométrique après tout traitement selon les conditions prédéfinies auparavant. Cette étape repose essentiellement sur les données piézométriques raffinées (ligne bleue sur figure 30), à partir desquels on détecte les évènements hydrologiques (ligne rouge sur la même figure) ainsi que les caractéristiques hydrologiques.
- Fichier Excel donnant :
 - Nombre des évènements ;
 - Date de début de l'évènement et date de fin de l'évènement (horodatage);
 - Date de pic ;
 - Pz.initial : piézométrie initiale ;
 - Pz.peak : piézométrie de pic ;
 - Amplitude piézométrique (m).

TABEAU 6 : CARACTERISTIQUES DES EVENEMENTS DE RECHARGE

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	12/12/2007 14:45	28/12/2007 01:40	16/12/2007 03:00	-1.87	-1.57	0.2956849	5055
2	29/12/2007 05:15	24/01/2008 14:00	02/01/2008 00:15	-1.73	-0.82	0.8815983	5460
3	15/02/2008 16:55	02/03/2008 02:30	16/02/2008 19:40	-1.67	-1.21	0.46	1605
4	01/04/2008 01:25	13/04/2008 16:45	02/04/2008 09:15	-1.6	-1.25	0.35	1910

B. Analyse de la dynamique hydrologique de la nappe

Nous rappelons que l'objectif de cette étude est de mieux comprendre quand et comment se fait la recharge d'une nappe. Il s'est donc agi d'un côté de définir les principales caractéristiques temporelles des variations de la recharge piézométrique et les principaux événements pluvieux sur les années hydrologiques, et d'autre côté d'analyser la réponse des charges piézométriques à ces événements et ces divers facteurs de recharge à travers une analyse statistique des corrélations entre un certain nombre de facteurs explicatifs (cumul de pluie, humidité initiale, profondeur initiale, ...) et les caractéristiques des événements de recharge de nappe (amplitude de fluctuation, temps de montée, ...).

I. Analyse des variations piézométriques et des facteurs de recharge :

Après les traitements et les raffinements nécessaires des mesures piézométriques des différents piézomètres, on a pu détecter les événements obtenus pour chaque piézomètre ainsi que certaines caractéristiques influençant la recharge telles que le cumul de pluie, l'intensité de pluie, la profondeur initiale pour chaque événement. Ils sont représentés dans les tableaux récapitulatifs ci-dessous :

TABLEAU 7: TABLEAU RECAPITULATIF DE NOMBRE DES EVENEMENTS DETECTES POUR CHAQUE EVENEMENT DURANT LES 12 ANS DE LA PERIODE L'ANALYSE

Piézomètre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	20
Nombre des événements détectés	4	6	***	44	45	3	4	2	32	4	2	3	2	15	4

On constate une différence importante de nombre des événements pour certains piézomètres : des piézomètres représentant un nombre limité d'événements (pz 1,2,6,7,2,10,12,14,20), sachant que d'autres aient un nombre quasi-important (pz 15) à important (pz 4,5,9). Ceci peut être le résultat de certains facteurs et caractéristiques de recharge (représentés dans le tableau ci-dessous et analysés ci-après).

Les caractéristiques de recharge, ci-joint celles des événements du premier piézomètre (Pour le reste des événements des autres piézomètres sont représentés dans les annexes).

TABLEAU 8: TABLE DES CARACTERISTIQUES DE RECHARGE POUR LE PREMIER PZ 1

Caractéristiques Evènement	Profondeur initiale (m)	Cumul pluviométrique (mm)	Intensité maximale de pluie (mm)	Amplitude piézométrique (m)	Temps de réaction (min)
1	-1.87	16.5	7.5	0.3	5055
2	-1.73	34	16	0.88	5460
3	-1.67	27.5	27.5	0.46	1605
4	-1.6	3.5	3.5	0.35	1910

II. Analyse statistique :

Il s'agira de conduire une analyse de corrélation statistique entre d'un côté, les caractéristiques de la réaction de la surface piézométrique aux pluies (temps de réaction, amplitude de fluctuation...), et de l'autre des caractéristiques hydroclimatiques (cumul de pluie, humidité initiale du sol, profondeur initiale de la nappe).

➤ Diagrammes de dispersion :

Avant de calculer le coefficient de corrélation pour les paires de variables, on a tout d'abord vérifié si l'association entre les variables est approximativement linéaire en regardant un nuage de points à travers un diagramme de dispersion entre les paramètres. Ce qui nous permet également d'évaluer visuellement l'écart dans les données.

- ❖ Cas de vérification de la linéarisation des caractéristiques de la réaction de la surface piézométrique aux pluies pour le piézomètre 1 est présentée par les diagrammes de dispersion ci-dessous (Figure 31) :

Diagrammes de dispersion

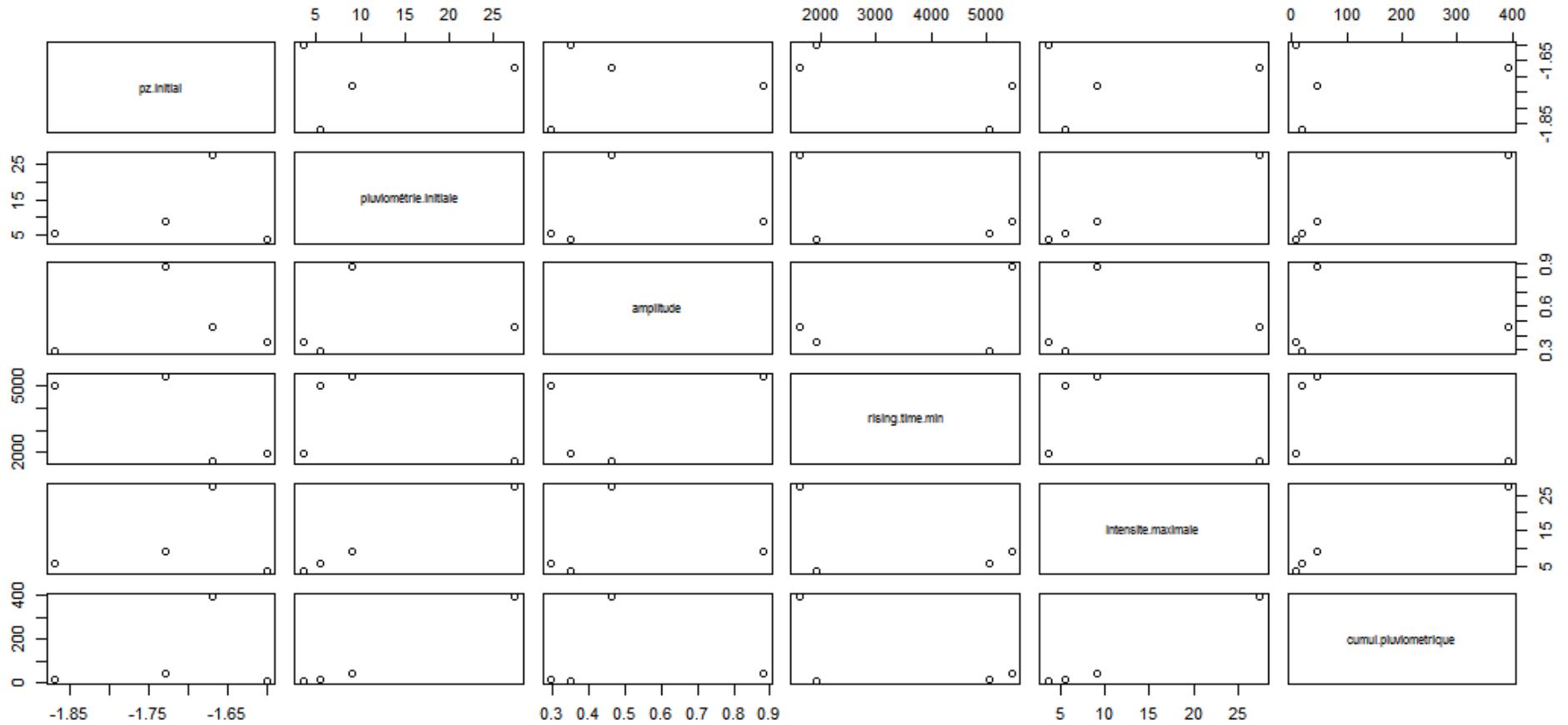


FIGURE 31: DIAGRAMMES DE DISPERSION POUR LE PIEZOMETRE - PZ 1 -

↪ Les diagrammes ci-dessus (figure 31) montrent des graphiques qui sont trop disposés dans un format tabulaire connu sous le nom de matrice de nuages de points entres :

- Les facteurs explicatifs suivants :

Profondeur initiale (m) : pz.initial

Précipitation initiale (mm) : pluviométrie.initial

Intensité maximale de pluie (mm) : intensite.maximale

Cumul pluviométrique (mm) : cumul.pluviometrique

Indice de Pluviométrie Antérieure (mm) : API

- Les caractéristiques des événements de recharge de nappe suivantes :

Amplitude de fluctuation (m) : amplitude

Temps de montée (min) : rising.time.min

↪ L'indice des pluies antérieures est utilisé faute de données disponibles concernant l'humidité du sol. En effet, une des hypothèses que nous souhaitons tester est que l'humidité du sol est un des facteurs de la recharge des nappes. Cependant, nous ne disposons pas de mesure d'humidité du sol. Nous avons donc choisi de retenir l'IPA comme un indicateur d'humidité du sol, en considérant que plus l'IPA est important, plus l'humidité du sol est élevée. L'indice des pluies antérieures a été calculé selon l'équation 2.

ÉQUATION 2: INDICE DES PRECIPITATIONS ANTERIEURES

$$IPA = \sum_{i=1}^t \frac{Pi}{i}$$

Avec :

IPA : l'Indice des pluies antérieures (mm)

i : le ième jour précédant le jour où l'on calcule l'indice

t : le nombre de jours limite du calcul

Pi : Pluviométrie de ième jour (mm)

↪ Les graphiques sont répartis selon leur arrangement dans le fichier. À titre d'exemple, le graphique de la première ligne et de la quatrième colonne montre un nuage de points de la variable dans la première colonne du dossier des données des résultats obtenus (pz.initial) en fonction de la variable dans la quatrième colonne (rising.time.min) c.-à-d. entre la profondeur initiale et le temps de montée.

↳ Les diagrammes de dispersion obtenus du premier piézomètre (Figure 31) révèlent que les caractéristiques piézométriques et les facteurs influant ne sont pas linéaires.

En fait, les nuages des points sont très dispersés entre les paires :

- Profondeur initiale et amplitude de fluctuation
- Profondeur initiale et temps de montée
- Précipitation initiale et amplitude de fluctuation
- Précipitation initiale et temps de montée

De surcroit, on ne constate aucune courbure discernable. Il convient donc de résumer l'association en termes de coefficient de corrélation.

↳ En interprétant ces graphiques, on peut extraire certaines informations concernant les corrélations entre les différents paramètres :

- Le temps de montée semble être plus corrélé avec la précipitation initiale, l'intensité maximale de pluie et le cumul pluviométrique plus que la profondeur initiale.
- De même pour l'amplitude de fluctuation, cette caractéristique semble être plus corrélée avec la précipitation initiale, l'intensité maximale de pluie et le cumul pluviométrique plus que la profondeur initiale.

➤ Coefficient de corrélation :

En interprétant les diagrammes de dispersion, on peut avoir une idée approchée sur les relations linéaires existantes entre les variables, cependant, pour plus de précision, on recourt au calcul de coefficient de corrélation entre les paires des paramètres via le langage R. On obtient les résultats suivants :

```
[1] "Diagrammes de dispersion"
[1] "Coefficients de corrélation"
pz.initial      pluviométrie.initiale  amplitude rising.time.min intensite.maximale cumul.pluviometrique
pz.initial      1.000000000           0.20264817  0.07512475  -0.7703180    0.20264817    0.25552270
pluviométrie.initiale 0.202648171           1.00000000  0.09488477  -0.4753180    1.00000000    0.99226322
amplitude        0.075124751           0.09488477  1.00000000  0.4602826    0.09488477    -0.01300132
rising.time.min  -0.770317965          -0.47531803  0.46028259  1.00000000  -0.47531803   -0.57074289
intensite.maximale 0.202648171           1.00000000  0.09488477  -0.4753180    1.00000000    0.99226322
cumul.pluviometrique 0.255522697           0.99226322  -0.01300132  -0.5707429    0.99226322    1.00000000
API              -0.004139811          -0.34821139  0.90004098  0.6312193    -0.34821139   -0.44553416
API
pz.initial      -0.004139811
pluviométrie.initiale -0.348211394
amplitude       0.900040982
rising.time.min 0.631219344
intensite.maximale -0.348211394
cumul.pluviometrique -0.445534160
API             1.000000000
```

FIGURE 32: COEFFICIENTS DE CORRELATIONS –PZ 1- PAR R

Du coup, les corrélations du premier piézomètre sont résumées dans le tableau suivant :

TABLEAU 9: COEFFICIENTS DE CORRELATIONS PAR R

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	0.075	0.095	0.095	-0.013	0.9
Temps de montée	-0.770	-0.475	-0.475	-0.571	0.631

III. Etude de la dynamique des nappes en se référant aux résultats :

L'analyse de l'hydrodynamique des nappes nécessite la mise en évidence de la confrontation de différents facteurs géologiques et hydroclimatiques. En fait, la détermination de ces différents facteurs et l'analyse des corrélations existantes entre eux font objet des parties précédentes du présent chapitre (parties A et B). Les résultats

1. Résultats des traitements et des corrélations obtenues :

TABEAU 10: TABLEAU RECAPITULATIF DES CORRELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES

	Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Pz1	Amplitude de fluctuation	0.075	0.095	0.095	-0.013	0.9
	Temps de montée	-0.770	-0.475	-0.475	-0.571	0.631
Pz2	Amplitude de fluctuation	-0.061	0.4619	0.236	0.29	0.989
	Temps de montée	0.035	0.217	0.197	0.277	0.163
Pz 4	Amplitude de fluctuation	-0.531	0.105	-0.971	-0.202	-0.08
	Temps de montée	0.087	-0.245	-0.0434	-0.497	- 0.091
Pz 5	Amplitude de fluctuation	-0.061	0.462	0.482	0.633	0.057
	Temps de montée	0.035	0.217	0.231	0.296	0.233
Pz 6	Amplitude de fluctuation	0.95	-0.689	-0.689	-0.857	0.657
	Temps de montée	-0.514	0.048	0.048	0.312	- -0.99
Pz 7	Amplitude de fluctuation	-0.531	0.105	-0.971	-0.202	0.154
	Temps de montée	0.087	-0.245	-0.0434	-0.497	- 0.084
Pz 10	Amplitude de fluctuation	0.614	0.645	0.645	0.625	0.516
	Temps de montée	-0.849	-0.829	-0.829	-0.796	- 0.353
Pz 12	Amplitude de fluctuation	0.614	0.645	0.645	0.625	0.516
	Temps de montée	-0.849	-0.829	-0.829	-0.796	- 0.353
Pz 14	Amplitude de fluctuation	-----	-----	-----	-----	-----
	Temps de montée	-----	-----	-----	-----	-----
Pz 15	Amplitude de fluctuation	0.549	0.156	0.156	0.267	0.772
	Temps de montée	0.037	-0.414	-0.414	-0.264	0.388
Pz 20	Amplitude de fluctuation	0.936	0.988	0.988	0.96	0.276
	Temps de montée	-0.653	-0.823	-0.823	0.982	- 0.438

En se basant sur les résultats des corrélations obtenues, on constate une certaine corrélation entre les différentes caractéristiques hydroclimatiques et celles piézométriques. En fait, pour le piézomètre 1, on remarque une forte corrélation entre l'API et l'amplitude (0.9) ainsi que le temps de montée (0.631), alors que les autres caractéristiques présentent un très faible coefficient de corrélation avec les deux paramètres piézométriques tels que la profondeur initiale qui a pratiquement une très faible relation avec l'amplitude de fluctuation avec un coefficient de 0.075 alors qu'il possède une corrélation négative quasi-importante avec l'amplitude de fluctuation avec un coefficient égale à -0.77.

L'analyse des résultats montre une différence entre les valeurs des coefficients de corrélations entre les différents paramètres d'un piézomètre à l'autre :

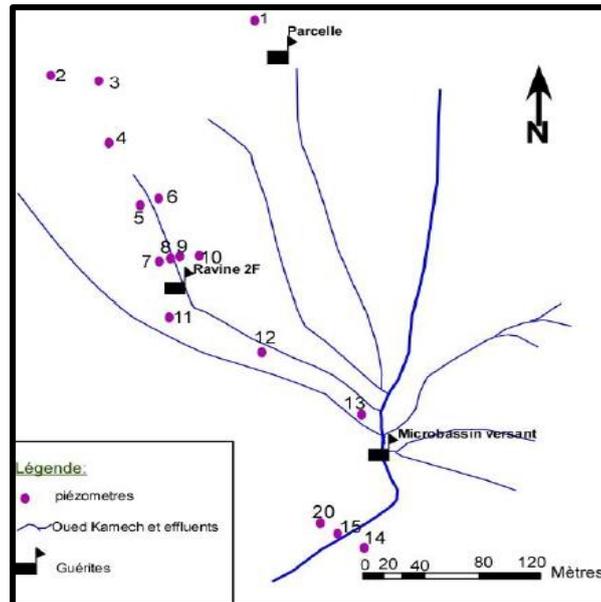
- D'une part entre la profondeur initiale et le cumul pluviométrique avec l'amplitude de fluctuation pour le piézomètre 1 montre des faibles coefficients respectivement (0.075 et -0.013) alors que pour le piézomètre 6 la corrélation est assez importante avec des coefficients respectivement (0.95 et -0.857).
- D'autre part entre la profondeur initiale et le cumul pluviométrique avec le temps de réaction pour le piézomètre 1 montre des coefficients assez importants respectivement (-0.77 et -0.571) alors que pour le piézomètre 6 la corrélation est moins importante avec des coefficients respectivement (-0.514 et 0.312).

Notons bien qu'il y a peu d'événements, du coup, les corrélations ne sont donc pas dans la plupart du temps significatives

Pour bien analyser alors ces résultats obtenus, on est revenu à la répartition des piézomètres dans le bassin versant (Figure 19) tout en focalisant sur les facteurs hydrogéologiques et topographiques existants aux alentours des piézomètres.

2. Analyse des résultats des traitements et des corrélations obtenues :

Revenant à la localisation des piézomètres et par rapport au réseau hydrographique du BV (Figure 19),



Plusieurs facteurs interviennent dans la recharge et décharge des nappes tels que les facteurs hydroclimatiques, l'occupation du sol et le réseau hydrographique existant.

A ce propos, dans le BV de Kamech les piézomètres sont bien répartis (Figure 19). Un piézomètre (pz1) est proche d'une parcelle mais un peu loin du réseau hydrographique. D'autres piézomètres sont de part et d'autre des affluents d'Oued Kamech. Des piézomètres sont proches d'une ravine (pz6, pz7, pz8, pz10 et pz11). Des piézomètres sont de part et d'autre du cours d'eau principal de l'Oued (pz14, pz15, pz20).

En confrontant les résultats de corrélation de ces piézomètres avec leurs caractéristiques de leurs répartitions, on remarque que plus on s'approche des affluents de l'Oued, de son cours d'eau principal et de la ravine, plus les corrélations sont fortes.

De même, plus on s'approche de l'exutoire, plus la corrélation entre ces paramètres est importante.

Cette analyse corrélatrice n'est pas toujours significative à cause du nombre limité des évènements pour certains piézomètres (Par exemple pz 1,2 et 6 qui possèdent respectivement 4, 6 et 3 évènements ...), vu la contrainte du traitement qui n'a permis l'exécution qu'un nombre quasi-limité de mesures.

Conclusion générale

Pour raisonner et optimiser l'eau, et les ressources en eau, notamment dans les zones arides et semi-arides, il est fondamental de bien caractériser la dynamique hydrologique des nappes phréatiques et comprendre leurs processus de recharge.

Cela passe notamment par la connaissance des flux de recharge des nappes phréatiques par l'analyse de l'évolution hydrodynamique de la nappe suite à un suivi de la variation piézométrique sur le domaine étudié.

L'Object alors de ce travail est l'étude de la recharge de la nappe à partir de suivi des variations piézométriques tout en dégagant les facteurs y influant. Pour atteindre alors cet objectif, on a mis en place une approche automatisée, afin d'estimer ces flux de recharge.

Nous avons tout d'abord défini les caractéristiques hydrologiques des milieux sub-humides et semi-arides et les procédés de recharge des nappes superficielle.

Une présentation de site d'étude, une description du dispositif et jeux de données disponibles et présentation des méthodes et outils de traitement des données ont été bien développer afin de mieux présenter la méthodologie du travail.

Ensuite, on a bien développé une approche automatisée bien détaillée, permettant d'extraire les évènements piézométriques, les caractéristiques de recharge et le paramètres hydroclimatiques.

L'analyse des évènements de recharge étudiés, présente le résultat des traitements des données, une analyse statistique des caractéristiques hydroclimatiques et piézométriques, et une analyse de la dynamique hydrologique de la nappe en se référant aux résultats obtenus.

Ce travail pourrait être prolongé en améliorant l'automatisation de la détection des événements et en approfondissant l'analyse de corrélation statistique entre les différentes caractéristiques.

Liste des références

BOUTEFFEHA M., 2010. Etude et modélisation des écoulements souterrains dans le bassin versant de Kamech (Cap Bon, Tunisie). Diplôme de Mastère de Modélisation en Hydraulique et Environnement.

BRUNO A., 1998. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus-Facteurs-Modèles. Tempus, Gestion et Protection de la Ressource en Eau. Ecole Polytechnique Fédérale LAUSANNE, Office fédérale de l'éducation et de la science/Suisse. Edition *H*G*A, Bucarest.

Catalogue de l'ORE OMERE, IRD - Olivier Grûnberger, ORE OMERE. Mesure météo et micro-météo (Kamech). ID : [3eaaff0a-2a01-47e9-a78a-9d749a112bff](#).

DAMIER R., Coordinateur, 2013. UMR LISAH / IRD Tunis. Le dispositif d'observation sur le bassin versant de Kamech (Cap Bon, Tunisie).

FAVREAV G., 2000. Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du kori de Dantiandou (sud-ouest du Niger). Institut de Recherche pour le Développement de Montpellier et l'université de Paris XI – Orsay.

FLINT, L.E. AND FLINT, A.L., 2002. Porosity. In: Methods of Soil Analysis, John Wiley & Sons Ltd., Hoboken.

GUSTAVE M., Septembre 2004. Cours hydrogéologie. Université Paris 6.

HAMMOUDA A., 2011. Mémoire de Mastère.

HASSEN I., GIBSON H., HAMZAOUI-AZAZA F., NEGRO F., KHANFIR R., BOUHLILA R., 2016. Modélisation géologique 3D du système aquifère de Kasserine, Tunisie centrale : nouvelles connaissances sur la géométrie des aquifères et leurs interconnexions pour une meilleure évaluation des ressources en eaux souterraines, Journal of Hydrology, 2016.

INOUBLI N., 2016. Ruissellement et érosion hydrique en milieu méditerranéen verticale : approche expérimentale et modélisation. Sciences agricoles. Montpellier SupAgro; Institut national agronomique de Tunisie. Version 1.

MEKKI I., 2003. Analyse et modélisation de la variabilité des flux hydriques à l'échelle d'un bassin versant cultivé alimentant un lac collinaire du domaine semi-aride méditerranéen (Oued Kamech, Cap Bon, Tunisie). Sciences de l'eau dans l'environnement continental. Montpellier.

Méthodes d'auscultation de la structure auscultation des fondations. C6-10. Octobre 2015. Mesure de niveau d'eau par piézométrie en forage. Les collections de l'Ifsttar.

NATHAN R.J., McMAHON T.A, Juillet 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26, 1465-1473.

PARAN F., ARTHAUD F., NOVEL M., GRILLOT D., BORNETTE G., PISCART C., MARMONIER P., LAVASTRE V., TRAVI Y., CADILHAC L, Septembre 2015. Caractérisation des échanges nappes/ rivières en milieu alluvionnaire guide méthodologique. Bassins Rhône-Méditerranée et Corse.

PONCHANT L. et MASSUEL S.,2015. La piézométrie ou mesure de la profondeur de la surface des nappes. Techniques d'observation et méthodes d'analyse pour la gestion de l'eau dans les bassins versants agricoles méditerranéens.

RCI 155, Rhone Chimie Industrie. Évaluation de la conductivité hydraulique des sols : ouvrage d'infiltration. Méthode abrégée afin de déterminer la conductivité hydraulique des sols dans le but d'aménager un ouvrage d'infiltration pour une habitation de 3 logements et moins. Article p.1.

Simmers, I.,1997. Recharge of phreatic aquifers in semi-arid areas, chapter 1, ISBN 90 5410 694 8 Balkema, Rotterdam.

Tao Wang , Wei-min Bao , Hai-li Xu , Zhen Zhu , Si-min Qu , Peng Shi , Hai-ying Hu , Rui-qi Fan , Qian Li, 2010. Experimental study of relationship between average isotopic fractionation factor and evaporation rate, *Water Science and Engineering*, December 2010, Pages 394-404.

Todd, D.K. ,1959. *Groundwater hydrology*. Inc., New York.

VERNOUX J.F., LIONS J., PETLET-GIRAUD E., SEGUIN JJ., STOLLSTEILER P., avec la participation de LATOT E.. Février 2010. Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec DCE. BRGM/RP-57044-FR.

ZITOUNA CHEBBI R., 2009. Observations et caractérisation des échanges d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante-atmosphère en condition de relief collinaire : cas du bassin versant Kamech, Cap Bon, Tunisie. PhD, Université de Montpellier,292p.

Webographie

- Agence de l'Eau Artois-Picardie. République Française. Les nappes phréatiques : <https://eau-artois-picardie.fr/education-leau-dossiers-thematiques/les-nappes-phreatiques>
- Agence de l'Eau. République Française. Les nappes Phréatiques : <https://www.eau-artois-picardie.fr/education-leau-dossiers-thematiques/les-nappes-phreatiques>
- Aqua portail : aquariophilie et biologie. Hydrologie : définition, applications : <https://www.aquaportail.com/definition-2412-hydrologie.html>
- COBALI, Centre d'Information. Eaux Souterraines : <https://www.cobali.org/centre-dinformation/eaux-souterraines/>
- JOINT RESEARCH CENTRE, EUROPEAN SOIL DATA CENTRE (ESDAC): <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/national-soil-maps-eudasm?type=All&field data continent tid selective=1270&field data country country selective=TN&field data cont coverage value=0>
- Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau (OMERE) : <https://www.obs-omere.org/fr/sites/kamech>
- SCID : Système de Circulation de l'Information sur la Désertification en Tunisie, Ministère de l'Environnement Tunisie. Le Climat : <http://scid.tn/index.php/fr/component/content/article/37-problematique/le-milieu-biophysique/85-le-climat>
- SIGES_1 : La recharge artificielle des nappes. <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article103>
- SIGES_2 : Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines en Seine-Normandie. Notions de réservoir aquifère et de recharge des nappes. <https://sigescen.brgm.fr/Notions-de-reservoir-aquifere-et-de-recharge-des-nappes.html#header>
- SIGES_3 : Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines en Seine-Normandie. L'alimentation et l'écoulement des nappes : <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article221>
- SIGES_4 : Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines en Seine-Normandie. La recharge artificielle des nappes : <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article103>
- SIGES : Caractéristiques principales des nappes : les paramètres hydrodynamiques : <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article313>
- USGS Groundwater Information: <https://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/wtf/>

- Web & Tech, Dictionnaire du webmastering, rédaction : Le Journal du Net (JND) :site web français d'informations économiques, Mis à jour le 08/10/19 16:26. R langage de programmation : définition, utilisation et dernière version :
<https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1445192-r-definition-utilisation-et-derniere-version-en-cours/>
- Wikydro, développement-durable. République Française. Transmissivité (HU) :
[http://wikydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Transmissivit%C3%A9_\(HU\)](http://wikydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Transmissivit%C3%A9_(HU))

Annexes

ANNEXE 1: DIFFERENTS PARAMETRES DU RESEAU PIEZOMETRIQUE INSTALLE A KAMECH MESURES A TRAVERS DES ALTIMETRES ET DES PIEZOMETRES

Dénomination	Localisation	X	Y	Altitude du galva.	Profondeur (m)
		(Carthage, LNT, Lambert)			
piezo_1	Micro BV	586931,026	397911,76	139,09	3,85
piezo_2	Ravine 2F	586790,8786	397869,82	144,23	7,3
piezo_3	Ravine 2F	586823,6209	397865,02	143,24	6,08
piezo_4	Ravine 2F	586830,7201	397815,82	138,57	3,36
piezo_5	Ravine 2F	586851,9451	397766,72	130,08	2,1
piezo_6	Ravine 2F	586864,6206	397772,82	134,32	4,16
piezo_7	Ravine 2F	586864,8172	397722,35	126,87	5,01
piezo_8	Ravine 2F	586872,6659	397724,36	128,17	5,97
piezo_9	Ravine 2F	586878,8924	397725,87	128,27	4,78
piezo_10	Ravine 2F	586891,0867	397728,86	128,85	5,54
piezo_11	Micro BV	586872,0477	397678,43	124,27	5,88
piezo_12	Micro BV	586932,164	397650,90	119,51	4,83
piezo_13	Micro BV	587003,697	397602,62	110,10	5,53
piezo_14	Rive G	587006,4928	397500,99	106,98	5,76
piezo_15	Rive D	586984,6211	397510,09	106,74	4,08
piezo_17	Barrage, RD	586451,3183	397051,74	98,07	4,89
piezo_18	Barrage, RD	586459,2353	397046,90	96,49	4,13
piezo_19	Barrage, RG	586535,1863	396999,68	97,10	6,65
piezo_20	Rive D	586980,7925	397514,84	107,48	6,17
piezo-21	Aval Barrage	586287,6241	396900,54	89,53	4,14
piezo_22	Aval Barrage	586263,1306	396896,22	89,30	4,97

Technique de séparation de Nathan and McMahon (1990) :

En 1990, Nathan and McMahon ont développé plusieurs techniques automatisées concernant la séparation des flux de base. Deux techniques d'écoulement de base ont été envisagées, l'une basée sur un filtre numérique et l'autre sur des règles de lissage et de séparation simples. En fait ces techniques ont été entreprises dans le cadre général de la définition des caractéristiques de faible débit des petits bassins versants ruraux.

En fait, ils ont développé une fonction qui lit un jeu de données de flux et produit un jeu de données de flux de base en se basant sur le concept de la séparation suivant :

- Séparation de flux de base
- Séparation à débit rapide

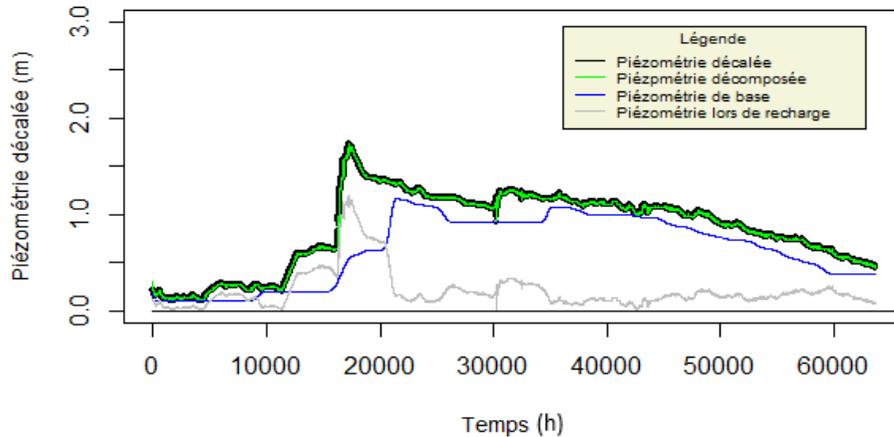
Par ailleurs, la technique de séparation s'effectue à partir d'un filtrage tout en définissant deux arguments de filtrage :

- Paramètre de filtrage : c'est la valeur recommandée par Nathan et McMahon (Etude de l'évolution débitométriques des nappes, 1990), il est de l'ordre de 0.925 avec une marge de ± 0.25 .
- Passes : c'est un paramètre qui sert à préciser le nombre de fois qu'on exige veut que le filtre passe sur les données étudiées, il est de 1 à 3 selon la technique recommandée.

R.J.Nathan, T.A.McMahon, Juillet 1990,
Evaluation of automated techniques
for base flow and recession analyses

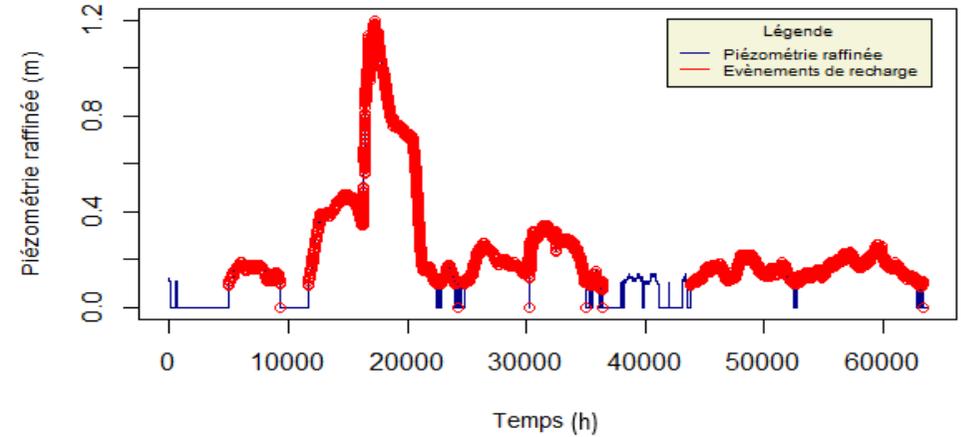
ANNEXE 3: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.2

Variation piézométrique journalière



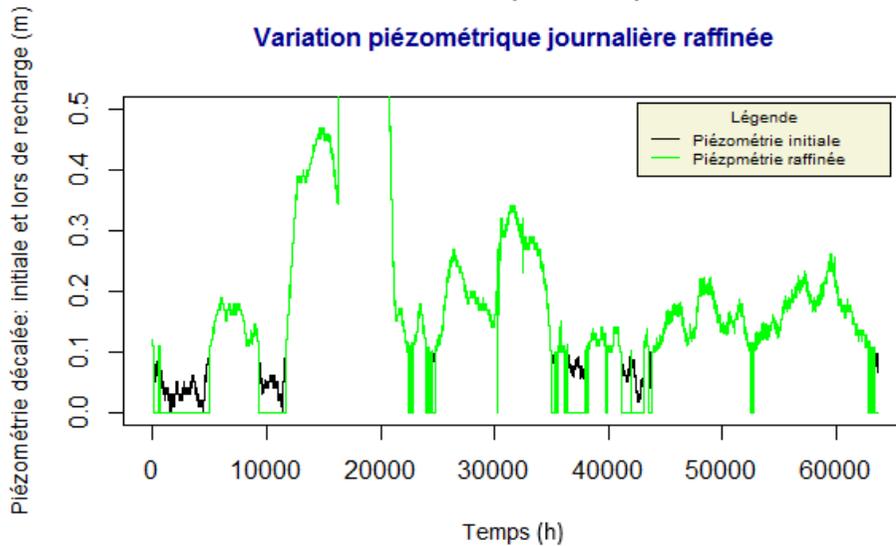
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des événements -

Variation piézométrique journalière raffinée



- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	19/11/2007 15:15	04/12/2007 20:55	23/11/2007 07:55	-3.31	-3.22	0.09	5320
2	12/12/2007 22:25	25/01/2008 14:20	01/01/2008 09:10	-3.21	-1.78	1.097136	28005
3	27/01/2008 15:45	15/02/2008 11:50	02/02/2008 18:10	-2.32	-2.32	0.1606608	8785
4	15/02/2008 12:40	02/03/2008 23:55	19/02/2008 12:10	-2.47	-2.25	0.22	5730
5	04/03/2008 08:35	08/03/2008 02:55	05/03/2008 23:25	-2.33	-2.28	0.0499274	2330
6	02/04/2008 23:50	09/06/2008 16:35	27/05/2008 12:25	-2.44	-2.86	0.1608828	78515

ANNEXE 4: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.4

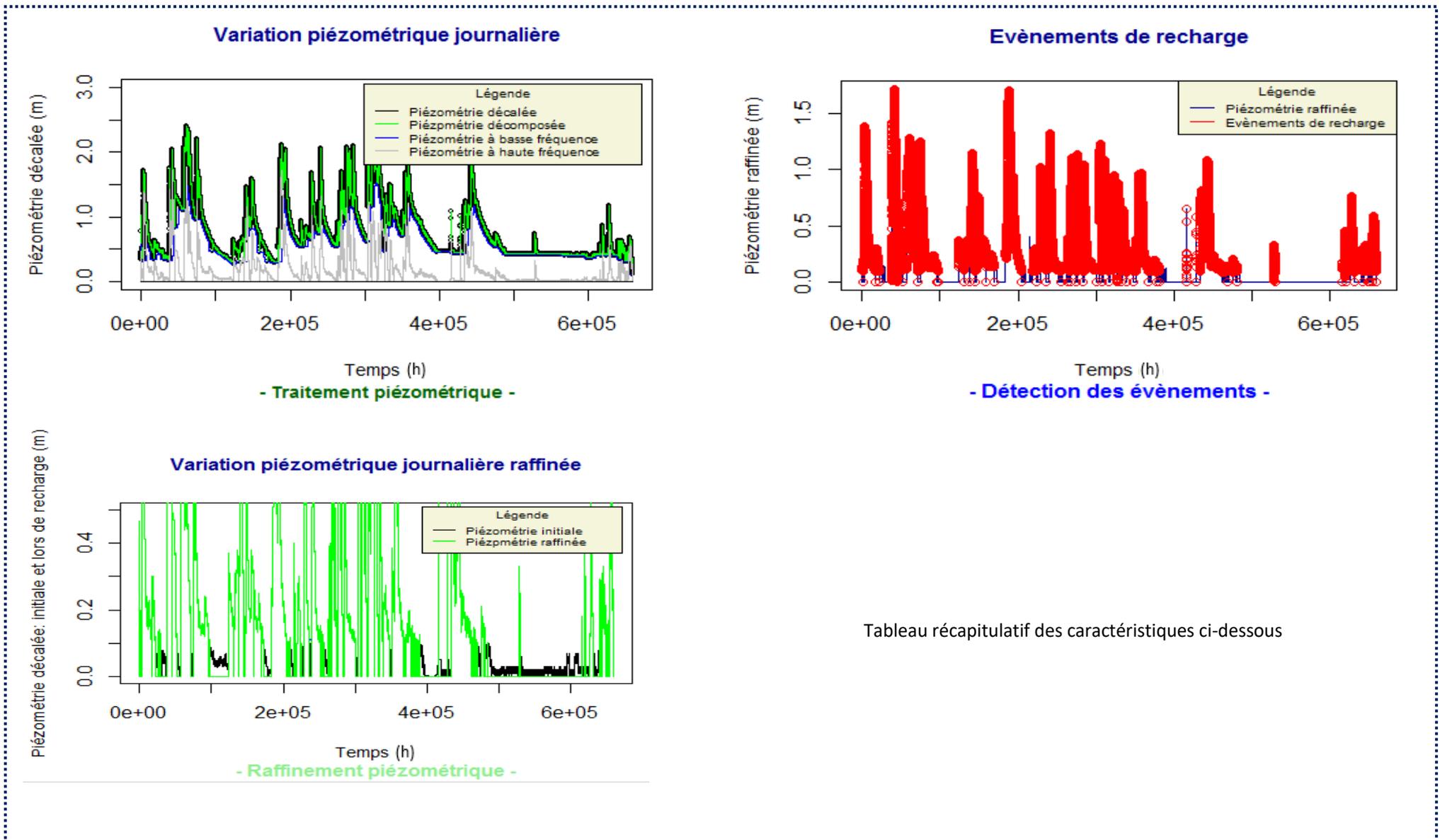


Tableau récapitulatif des caractéristiques ci-dessous

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	14/12/2007 21:25	19/12/2007 14:05	16/12/2007 13:50	-2.1	-2.01	0.090	2425
2	29/12/2007 02:25	15/02/2008 12:00	30/12/2007 21:25	-2.08	-0.82	1.26	2580
3	15/02/2008 14:55	02/03/2008 16:55	18/02/2008 14:30	-2.09	-1.89	0.2	4295
4	22/10/2008 21:55	08/02/2009 16:03	23/01/2009 19:25	-2.04	-0.48	1.56	133830
5	12/02/2009 09:15	01/04/2009 21:50	25/02/2009 16:20	-1.32	-0.13	1.177	19145
6	12/04/2009 17:05	23/06/2009 11:05	13/04/2009 05:55	-1.48	-0.33	1.15	18480
7	23/06/2009 11:45	29/06/2009 18:25	23/06/2009 14:25	-1.96	-1.91	0.05	3840
8	01/10/2009 13:40	11/01/2010 13:20	01/10/2009 16:45	-2.12	-1.88	0.24	4440
9	11/01/2010 14:40	05/02/2010 13:25	30/01/2010 03:35	-2.12	-1.84	0.28	26695
10	05/02/2010 13:30	01/03/2010 03:55	16/02/2010 12:20	-2.05	-1.07	0.98	15770
11	07/03/2010 21:30	20/04/2010 14:15	14/03/2010 02:50	-1.61	-0.94	0.67	8960
12	20/04/2010 14:30	25/05/2010 15:05	23/04/2010 02:50	-1.94	-1.81	0.13	3620
13	11/01/2013 15:00	12/04/2013 18:30	15/02/2013 01:35	-2	-0.42	1.475	49595
14	28/12/2013 18:35	13/01/2014 09:10	05/01/2014 03:35	-1.88	-1.68	0.199	10620
15	31/01/2014 17:00	25/02/2014 04:20	02/02/2014 02:10	-1.75	-0.85	0.9	1990
16	10/03/2014 19:50	05/05/2014 06:55	15/03/2014 12:05	-1.68	-0.47	1.21	6735
17	11/11/2014 20:45	17/11/2014 11:20	14/11/2014 19:20	-1.88	-1.76	0.12	4235
18	10/12/2014 10:15	17/12/2014 08:25	11/12/2014 07:20	-1.88	-1.59	0.289	30360
19	18/12/2014 09:30	17/02/2015 18:30	31/01/2015 07:30	-1.87	-0.826	0.99	63240
20	22/02/2015 12:05	19/03/2015 17:35	26/02/2015 02:55	-1.494	-0.454	1.04	5210
21	24/03/2015 15:45	18/05/2015 06:10	27/03/2015 13:30	-1.336	-0.441	0.95	4185
22	16/12/2016 23:30	03/01/2017 16:05	23/12/2016 12:05	-1.376	-0.683	0.693	9395
23	09/01/2017 01:40	02/02/2017 21:25	17/01/2017 12:15	-1.272	-0.292	0.979	12155
24	06/02/2017 22:40	17/10/2018 23:30	25/02/2017 03:35	-0.958	-1.088	0.85	26215
25	17/10/2018 23:50	03/11/2018 19:55	24/10/2018 13:30	-1.951	-1.189	0.762	9460
26	10/11/2018 15:55	28/11/2018 01:10	14/11/2018 03:30	-1.564	-1.023	0.541	5015
27	02/12/2018 09:25	31/12/2018 05:05	14/12/2018 13:40	-1.493	-1.457	0.173	17535
28	12/01/2019 11:30	08/03/2019 11:40	06/02/2019 04:45	-1.722	-0.682	0.873	35595
29	21/03/2019 23:10	16/04/2019 07:40	04/04/2019 14:15	-1.549	-1.585	0.097	19565
30	20/04/2019 11:35	24/04/2019 10:30	22/04/2019 10:55	-1.76	-1.726	0.051	2840
31	10/09/2019 12:00	10/09/2019 13:35	10/09/2019 12:05	-1.95	-1.45	0.5	7200
32	24/10/2019 10:55	24/10/2019 11:30	24/10/2019 11:00	-1.66	-1.52	0.14	7200
33	07/11/2019 20:45	07/03/2020 17:50	11/12/2019 07:45	-2	-0.58	0.99	48180
34	03/04/2020 10:25	22/04/2020 18:45	04/04/2020 12:55	-1.89	-1.78	0.11	1590
35	27/12/2020 10:05	05/01/2021 07:00	29/12/2020 07:15	-2.01	-1.79	0.22	2710
36	27/10/2021 03:20	27/10/2021 04:10	27/10/2021 03:50	-2.01	-1.95	0.06	43200
37	09/11/2021 18:10	17/11/2021 02:05	11/11/2021 15:20	-1.99	-1.67	0.32	2710
38	07/12/2021 21:30	25/12/2021 11:25	11/12/2021 04:30	-2.03	-1.36	0.67	4740
39	20/01/2022 14:00	28/01/2022 11:05	25/01/2022 23:45	-2.041	-1.897	0.144	7785
40	29/01/2022 06:30	31/01/2022 14:55	30/01/2022 20:25	-2.084	-1.987	0.097	2275
41	02/02/2022 18:15	21/02/2022 02:00	10/02/2022 16:20	-2.089	-1.89	0.232	11405
42	27/02/2022 17:30	03/03/2022 02:10	02/03/2022 07:15	-2.125	-2.071	0.054	3705
43	05/03/2022 20:05	11/03/2022 02:40	09/03/2022 22:00	-2.124	-2.023	0.101	5875
44	13/03/2022 12:35	29/03/2022 20:45	21/03/2022 10:30	-2.195	-1.843	0.482	11395

ANNEXE 5: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.5

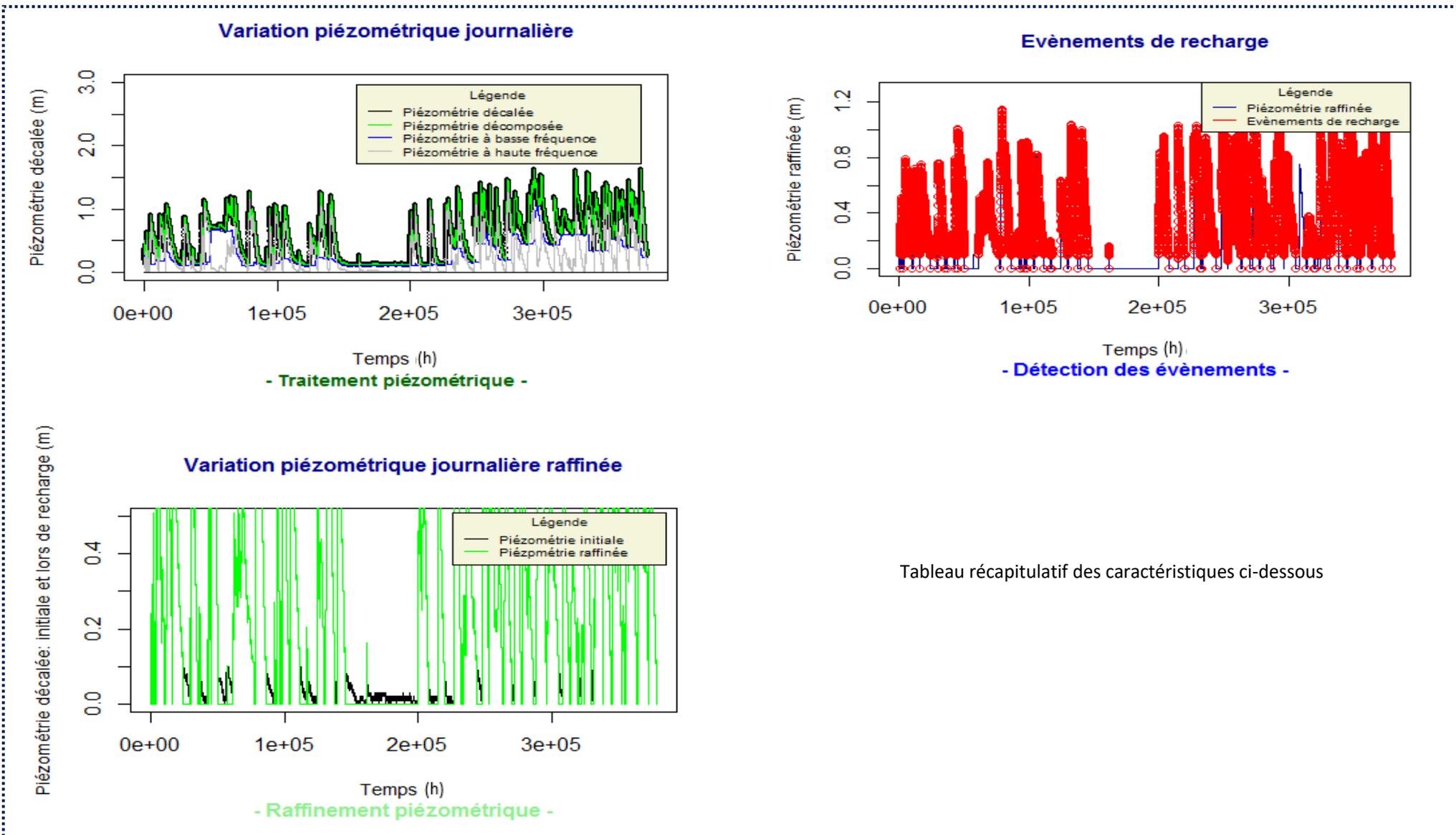
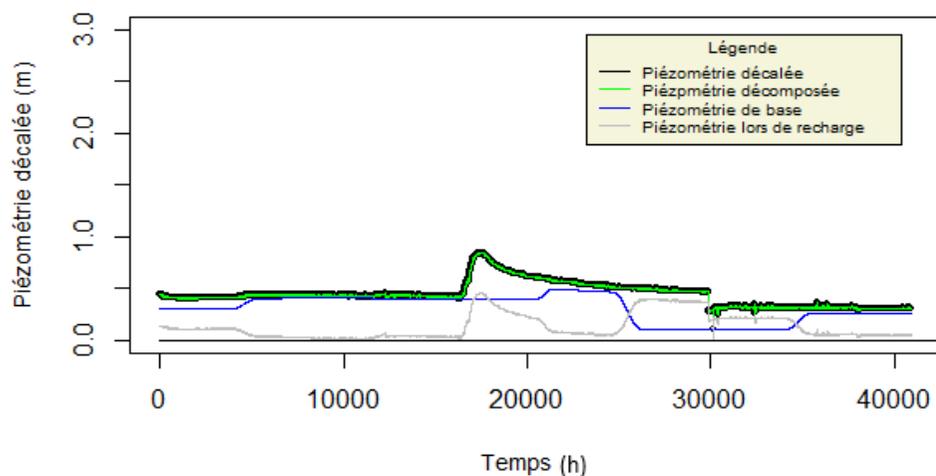


Tableau récapitulatif des caractéristiques ci-dessous

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	30/10/2007 15:40	02/11/2007 11:10	30/10/2007 17:50	-0.73	-0.51	0.22	3120
2	05/11/2007 04:20	11/11/2007 16:25	05/11/2007 10:10	-0.73	-0.32	0.41	8400
3	16/11/2007 01:00	06/12/2007 23:35	18/11/2007 04:35	-0.73	-0.04	0.69	3095
4	11/12/2007 03:20	27/12/2007 04:10	12/12/2007 16:05	-0.67	-0.05	0.62	2205
5	29/12/2007 01:30	25/01/2008 15:40	31/12/2007 01:20	-0.53	0.12	0.6497539	2870
6	11/02/2008 05:50	13/02/2008 12:00	11/02/2008 15:05	-0.73	-0.61	0.12	13320
7	15/02/2008 13:10	01/03/2008 18:05	15/02/2008 22:20	-0.73	-0.08	0.65	13200
8	05/03/2008 17:25	09/03/2008 11:00	07/03/2008 22:00	-0.72	-0.57	0.1533246	3155
9	28/03/2008 11:40	29/03/2008 17:35	28/03/2008 23:00	-0.73	-0.66	0.07	16320
10	31/03/2008 18:10	05/04/2008 16:30	31/03/2008 22:20	-0.73	-0.04	0.69	6000
11	22/01/2009 17:00	06/02/2009 15:48	24/01/2009 01:40	0.14	0.18	0.04	1960
12	12/02/2009 01:50	08/04/2009 17:00	07/03/2009 22:00	-0.2	0.21	0.6704786	34330
13	10/04/2009 01:05	08/05/2009 09:20	13/04/2009 10:05	-0.74	0.31	1.05	4860
14	25/09/2009 06:55	27/09/2009 08:45	25/09/2009 09:20	-0.731	-0.578	0.153	3480
15	01/10/2009 13:25	09/10/2009 07:10	01/10/2009 17:00	-0.64	0.055	0.695	5160
16	12/10/2009 00:20	15/10/2009 08:05	13/10/2009 04:00	-0.728	-0.554	0.1737982	1660
17	16/10/2009 02:15	02/11/2009 16:25	16/10/2009 21:05	-0.71	0.11	0.8113893	27120
18	05/11/2009 23:00	01/12/2009 02:05	11/11/2009 03:05	-0.64	0.08	0.72	7445
19	16/12/2009 12:00	19/12/2009 05:05	17/12/2009 07:45	-0.72	-0.62	0.1027567	28440
20	20/12/2009 14:15	22/12/2009 01:55	21/12/2009 07:50	-0.73	-0.69	0.0423533	25320
21	15/01/2010 15:40	02/02/2010 16:30	15/01/2010 23:05	-0.73	-0.2	0.53	10680
22	07/02/2010 06:30	02/03/2010 13:30	14/02/2010 08:20	-0.62	0.32	0.94	10190
23	07/03/2010 17:45	30/03/2010 13:05	13/03/2010 12:30	-0.64	0.26	0.9	8325
24	24/05/2010 11:15	25/05/2010 11:35	24/05/2010 14:40	-0.74	-0.68	0.0604013	4920
25	24/10/2010 22:45	21/11/2010 09:30	08/11/2010 00:50	-0.74	0.12	0.8518809	20345
26	15/12/2010 22:15	03/01/2011 06:45	17/12/2010 03:20	-0.7	0.19	0.89	1745
27	27/01/2011 05:10	16/02/2011 07:15	03/02/2011 15:20	-0.73	0.2	0.93	10690
28	18/02/2011 11:45	20/02/2011 05:05	18/02/2011 23:20	-0.46	-0.41	0.05	16680
29	23/02/2011 01:20	29/03/2011 10:25	28/02/2011 19:40	-0.47	0.38	0.85	8300
30	12/01/2012 16:00	05/03/2012 08:35	17/01/2012 18:05	-0.09	0.28	0.37	7325
31	10/03/2012 00:25	28/03/2012 16:50	11/03/2012 14:55	-0.48	0.36	0.8866563	2310
32	14/11/2012 21:30	02/12/2012 07:40	21/11/2012 06:10	-0.65	0.51	1.16	9160
33	06/12/2012 11:45	03/01/2013 18:50	09/12/2012 00:40	-0.23	0.32	0.55	3655
34	25/01/2013 21:00	24/03/2013 13:50	10/02/2013 16:00	-0.4	0.68	0.909724	22740
35	22/12/2013 13:00	23/12/2013 23:25	22/12/2013 14:30	-0.27	-0.22	0.0475104	2160
36	27/12/2013 07:10	12/01/2014 04:15	01/01/2014 00:25	-0.25	0.03	0.28	6795
37	13/01/2014 04:25	17/01/2014 09:40	13/01/2014 16:40	-0.25	-0.13	0.12	17640
38	25/01/2014 06:00	19/02/2014 04:25	01/02/2014 03:00	-0.26	0.65	0.91	9900
39	05/03/2014 04:30	07/11/2014 09:25	15/03/2014 04:35	-0.25	0.62	0.8740972	14405
40	07/11/2014 10:20	26/11/2014 02:40	08/11/2014 09:50	-0.5	0.3	0.8	33840
41	09/12/2014 18:05	28/11/2016 04:55	18/12/2014 19:25	-0.51	0.46	0.97	13040
42	29/11/2016 12:45	05/12/2016 03:55	01/12/2016 01:45	-0.316	-0.164	0.152	2220
43	07/12/2016 17:40	06/01/2017 06:20	22/12/2016 10:50	-0.324	0.338	0.7376205	21190
44	08/01/2017 21:50	04/02/2017 08:05	09/01/2017 14:20	-0.445	0.491	0.936	23760
45	06/02/2017 16:45	25/02/2017 13:40	09/02/2017 01:30	-0.425	0.682	1.1843535	3405

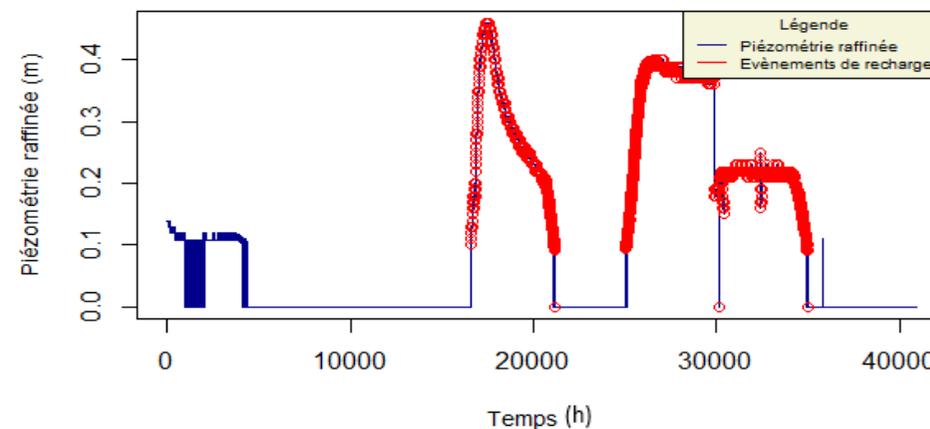
ANNEXE 6: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.6

Variation piézométrique journalière



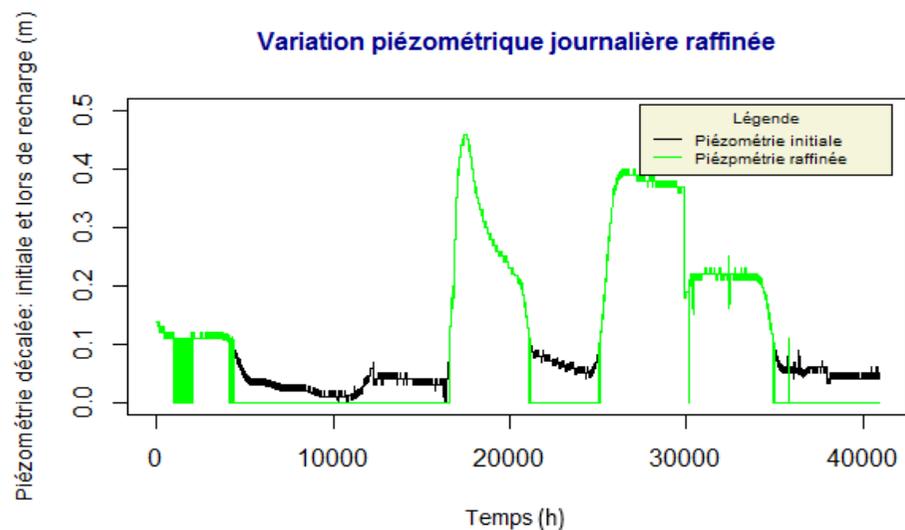
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée

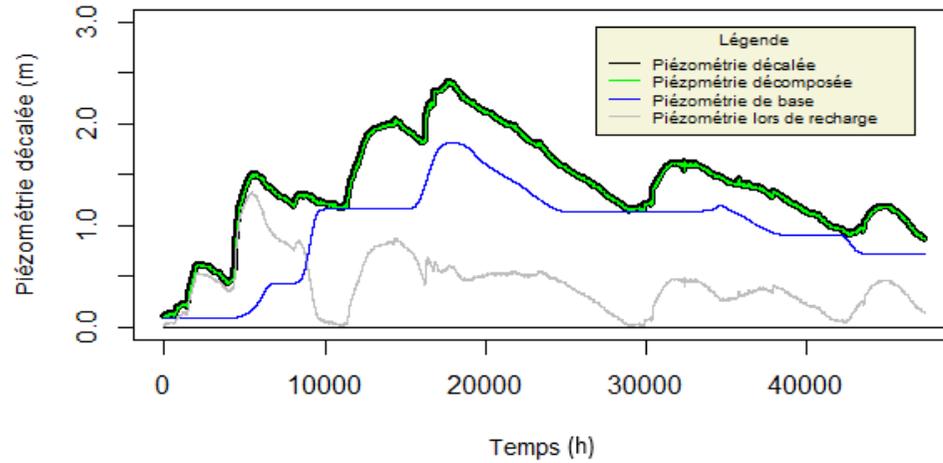


- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	30/12/2007 05:30	15/01/2008 04:40	02/01/2008 00:50	-2.21	-1.85	0.36	4040
2	28/01/2008 14:05	15/02/2008 11:25	04/02/2008 14:05	-2.18	-2.2	0.29715	10080
3	15/02/2008 11:35	03/03/2008 01:40	23/02/2008 05:45	-2.4	-2.35	0.05	11170

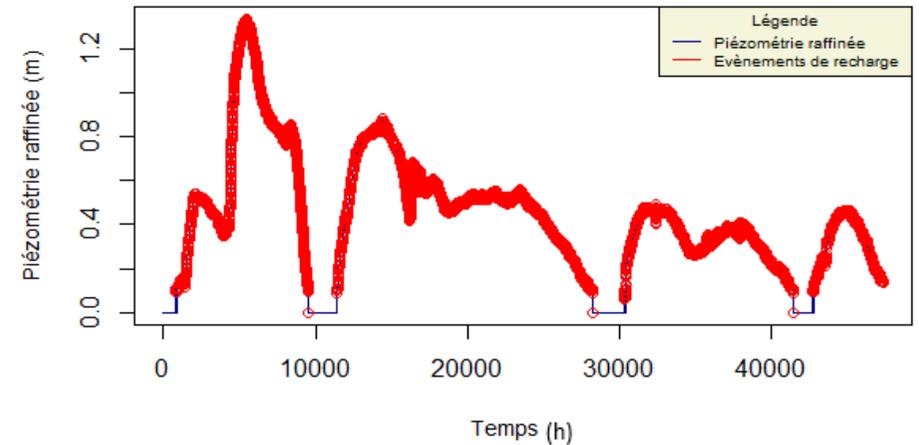
ANNEXE 7: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.7

Variation piézométrique journalière



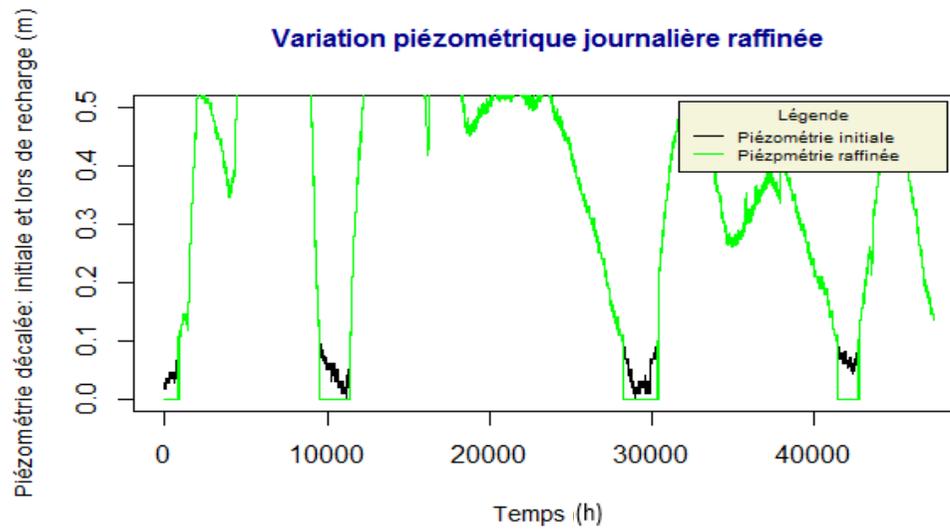
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des événements -

Variation piézométrique journalière raffinée

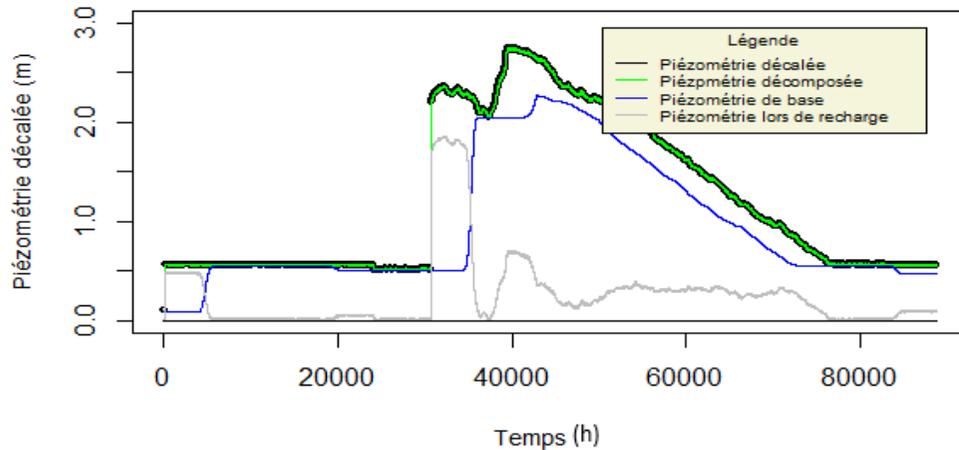


- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	01/11/2007 13:10	05/12/2007 19:30	21/11/2007 11:20	-2.75	-1.44	1.2271543	28690
2	12/12/2007 07:10	08/02/2008 16:25	22/12/2007 15:40	-1.68	-0.9	0.7799999	14910
3	15/02/2008 22:50	25/03/2008 18:05	23/02/2008 05:50	-1.7	-1.31	0.3899995	10500
4	30/03/2008 05:00	15/04/2008 08:35	06/04/2008 07:55	-2.02	-1.75	0.3648543	10255

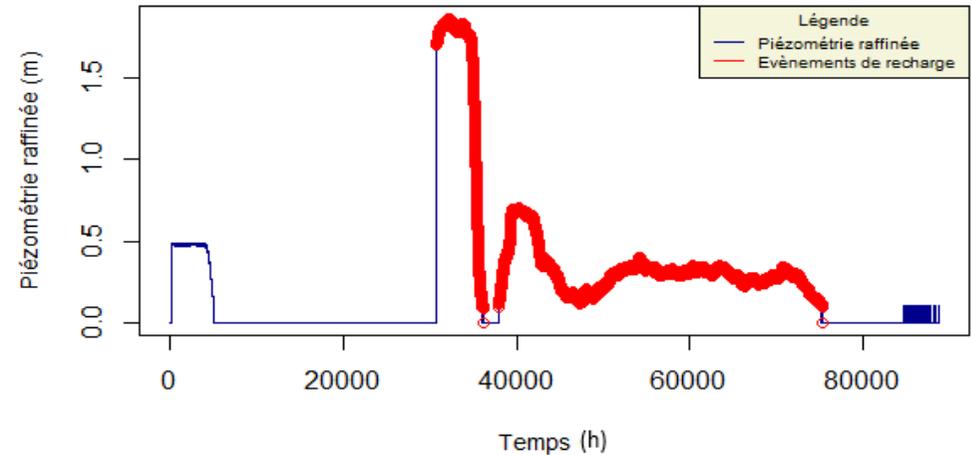
ANNEXE 8: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.8

Variation piézométrique journalière



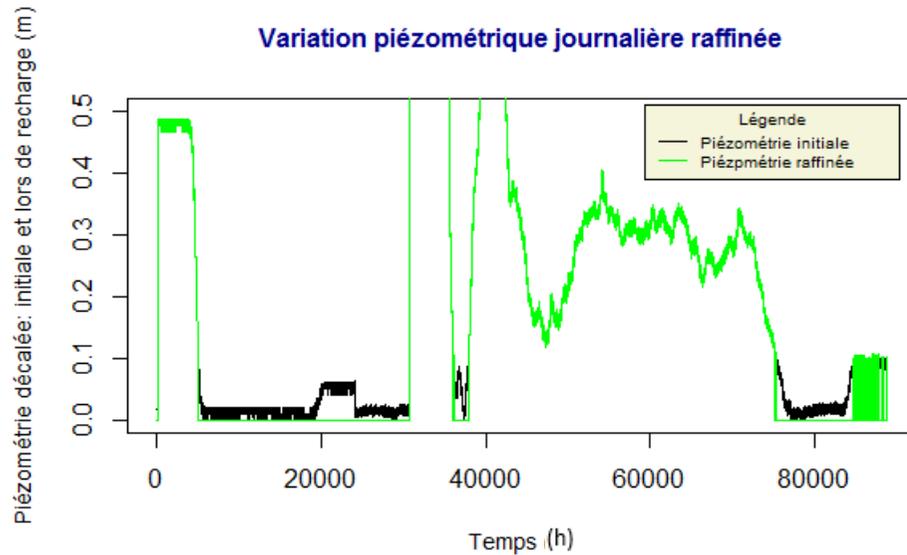
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée

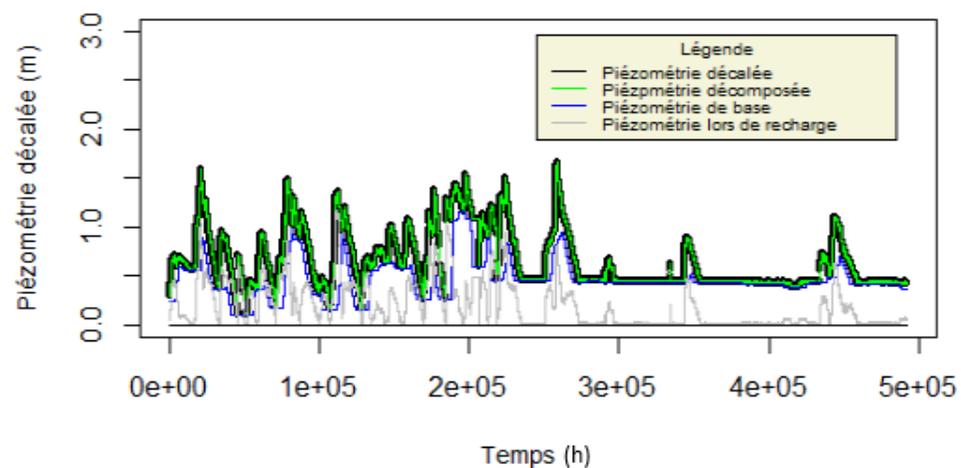


- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	11/11/2021 14:00	30/11/2021 03:40	16/11/2021 04:20	-2.827	-2.662	0.165	6620
2	06/12/2021 12:10	15/04/2022 16:45	14/12/2021 13:10	-2.87	-2.27	0.6	11580

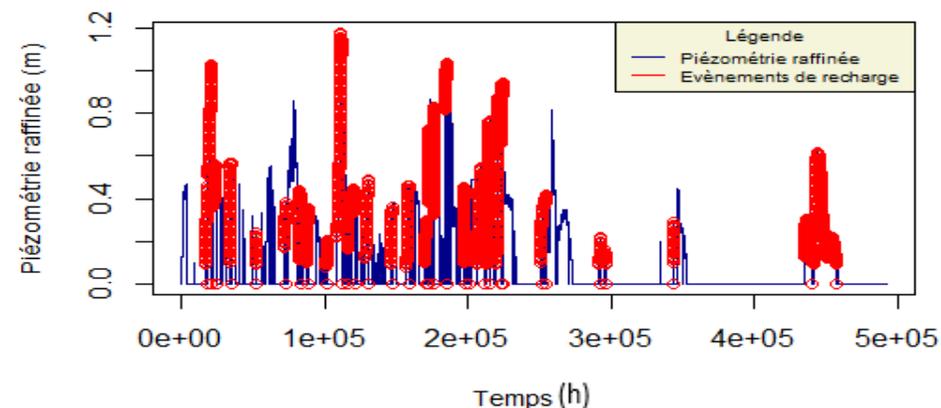
ANNEXE 9: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.9

Variation piézométrique journalière



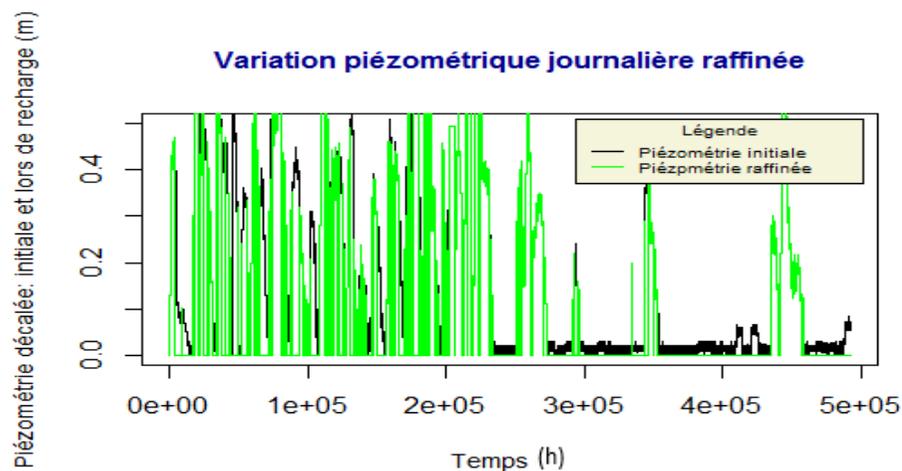
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée



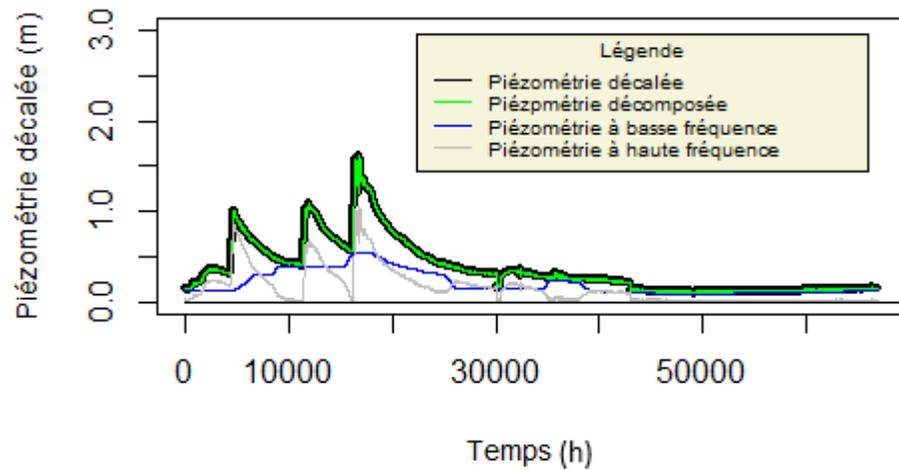
- Raffinement piézométrique -

Tableau récapitulatif des caractéristiques ci-dessous

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	13/02/2009 12:00	17/02/2009 00:00	16/02/2009 23:40	-3.1	-2.74	0.36	1576800
2	18/02/2009 00:00	28/02/2009 00:00	26/02/2009 20:00	-2.68	-2.16	0.509838	4207680
3	04/03/2009 00:00	10/03/2009 00:00	09/03/2009 18:25	-2.5	-2.47	0.1983862	2629440
4	13/04/2009 06:55	16/04/2009 00:00	15/04/2009 13:05	-3.28	-2.81	0.47	1051200
5	04/02/2011 03:40	06/02/2011 00:00	05/02/2011 20:35	-3.55	-3.41	0.14	527040
6	15/01/2012 00:00	20/01/2012 00:00	19/01/2012 21:00	-3.39	-3.2	0.19	2103840
7	21/02/2012 00:00	24/02/2012 00:00	23/02/2012 07:00	-2.72	-2.43	0.3170182	1051200
8	10/03/2012 21:00	14/03/2012 00:00	13/03/2012 22:00	-2.78	-2.6	0.2437608	1578240
9	21/12/2012 01:00	24/12/2012 00:00	23/12/2012 23:55	-3.34	-3.32	0.1074859	1051200
10	03/02/2013 00:00	17/02/2013 00:00	12/02/2013 05:00	-3.35	-2.42	0.929916	4733280
11	01/03/2013 00:00	04/03/2013 00:00	03/03/2013 23:40	-2.73	-2.57	0.1970991	1051200
12	13/03/2013 00:00	19/03/2013 00:00	14/03/2013 05:30	-2.77	-2.74	0.0624994	525600
13	01/12/2013 18:05	09/12/2013 00:00	07/12/2013 05:25	-3.47	-3.1	0.37	3155040
14	01/02/2014 03:50	05/02/2014 00:00	04/02/2014 15:00	-3.03	-2.77	0.26	1576800
15	11/03/2014 05:40	17/03/2014 00:00	16/03/2014 21:10	-3.07	-2.71	0.36	2630880
16	10/12/2014 18:55	13/12/2014 00:00	12/12/2014 23:55	-3.389	-3.189	0.2	1052640
17	17/12/2014 00:00	14/03/2015 15:25	19/12/2014 10:10	-3.077	-2.767	0.31	1051200
18	24/03/2015 00:00	29/03/2015 00:00	28/03/2015 15:15	-2.817	-2.368	0.43736	2103840
19	23/12/2016 02:50	29/12/2016 00:00	25/12/2016 16:25	-2.68	-2.457	0.223	1052640
20	09/02/2017 00:15	13/02/2017 00:00	11/02/2017 23:50	-2.493	-2.206	0.3531733	1051200
21	21/02/2017 00:00	25/02/2017 00:00	24/02/2017 23:15	-2.502	-2.562	0.0582784	1576800
22	19/10/2018 16:10	06/11/2018 00:00	29/10/2018 05:45	-3.06	-2.61	0.45	5260320
23	12/11/2018 01:15	20/11/2018 00:00	19/11/2018 04:20	-2.77	-2.52	0.6691932	3680640
24	20/01/2019 12:40	02/02/2019 00:00	28/01/2019 22:15	-3.19	-2.41	0.7799998	4207680
25	03/02/2019 00:00	08/02/2019 00:00	06/02/2019 13:10	-2.51	-2.25	0.1970972	1578240
26	14/11/2019 16:55	22/11/2019 00:00	21/11/2019 06:10	-3.19	-2.94	0.25	3682080
27	23/11/2019 00:00	29/11/2019 00:00	27/11/2019 17:15	-2.94	-2.88	0.0589905	2103840
28	06/04/2020 14:25	11/04/2020 00:00	10/04/2020 17:05	-3.21	-3.09	0.12	2103840
29	19/04/2020 00:00	21/04/2020 16:30	20/04/2020 03:30	-3.19	-3.15	0.04	527040
30	28/12/2020 12:15	30/12/2020 00:00	29/12/2020 21:15	-3.21	-3.03	0.18	525600
31	11/11/2021 14:00	29/11/2021 19:50	17/11/2021 04:25	-3.188	-3.018	0.17	3156480
32	06/12/2021 14:10	29/01/2022 06:35	14/12/2021 04:35	-3.17	-2.65	0.52	4207680

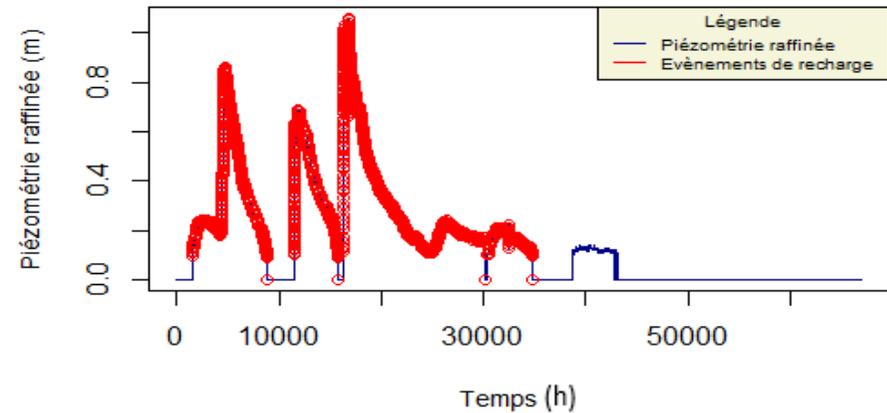
ANNEXE 10: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.10

Variation piézométrique journalière



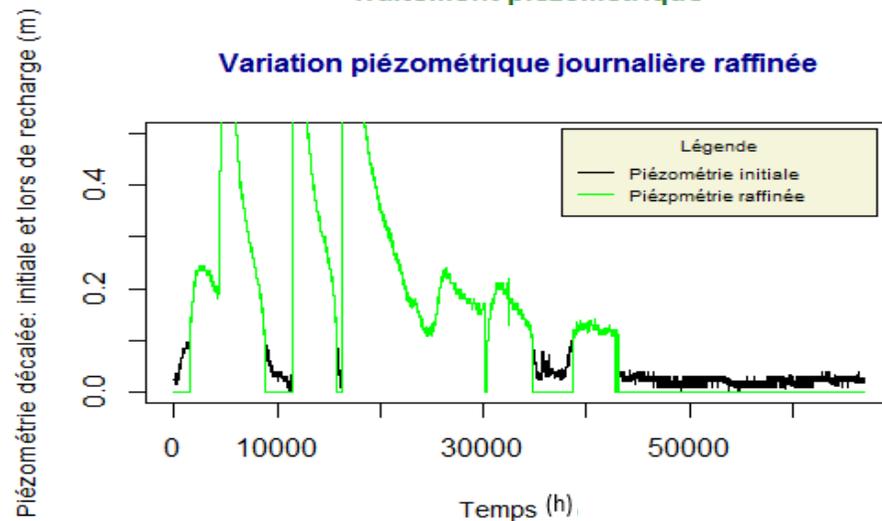
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée

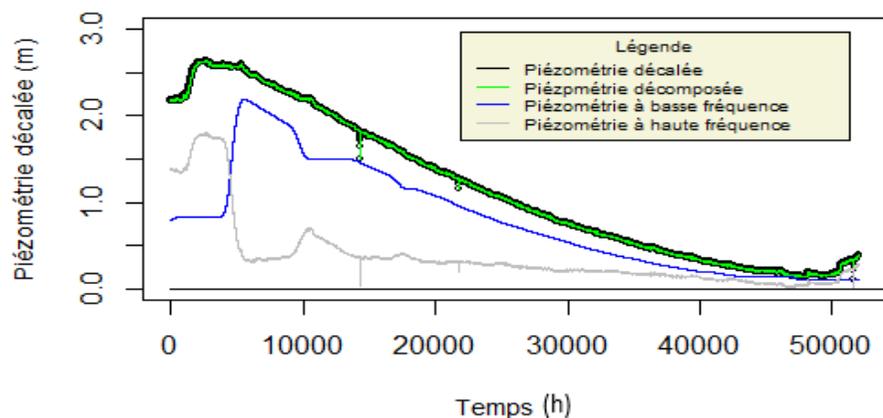


- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	05/11/2007 22:00	03/12/2007 13:00	18/11/2007 21:35	-3.92	-3.15	0.75429	18695
2	12/12/2007 07:50	27/12/2007 16:10	14/12/2007 01:10	-3.65	-3.06	0.59	2480
3	29/12/2007 04:20	15/02/2008 11:05	31/12/2007 02:50	-3.49	-2.54	0.94561	2790
4	16/02/2008 09:30	02/03/2008 12:45	23/02/2008 06:05	-3.9	-3.78	0.12	9875

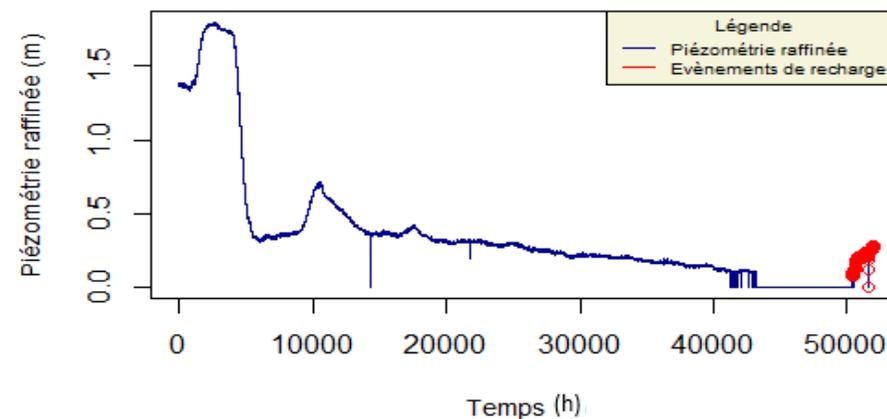
ANNEXE 11: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ.11

Variation piézométrique journalière



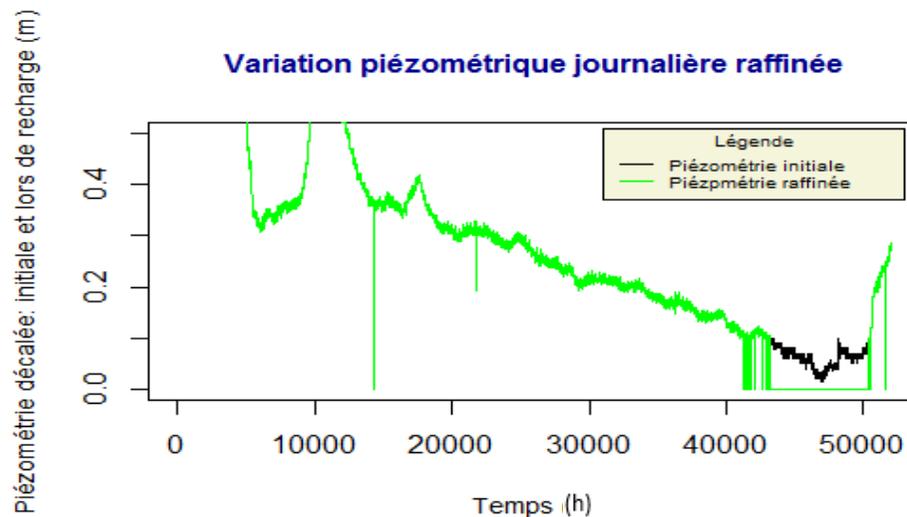
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée

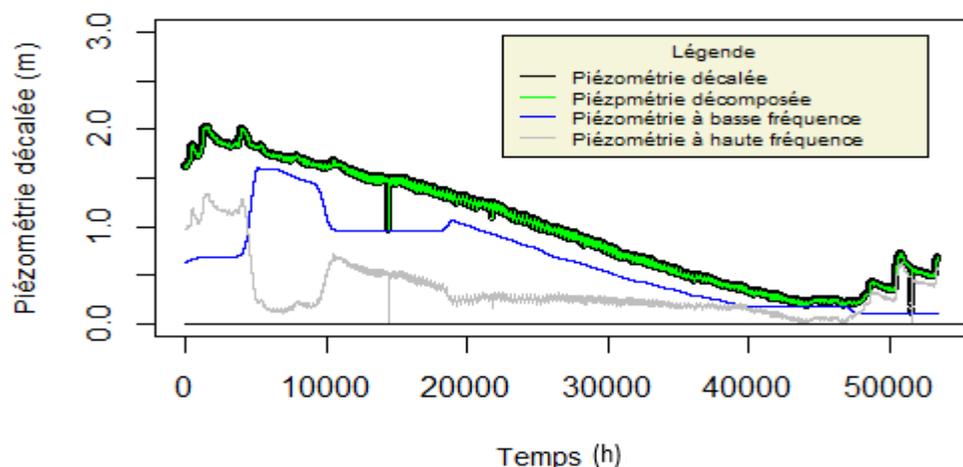


- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	01/10/2009 05:45	05/10/2009 12:25	05/10/2009 11:10	-2.07	-1.92	0.15	6085
2	05/10/2009 12:30	06/10/2009 23:10	06/10/2009 23:10	-2.05	-1.88	0.1655	2080

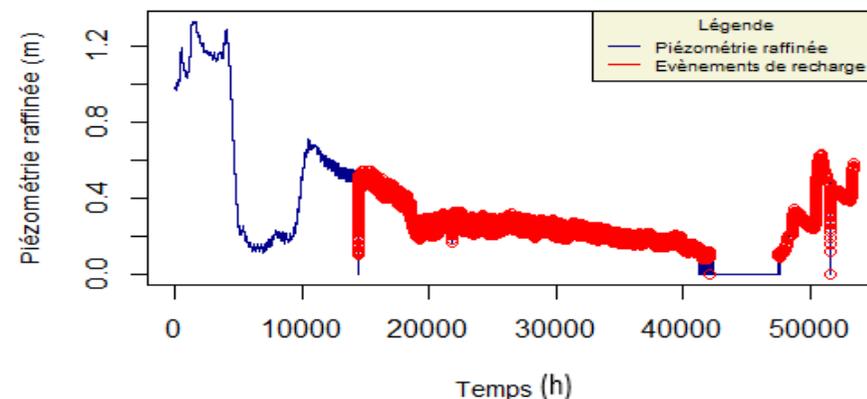
ANNEXE 12: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ12

Variation piézométrique journalière



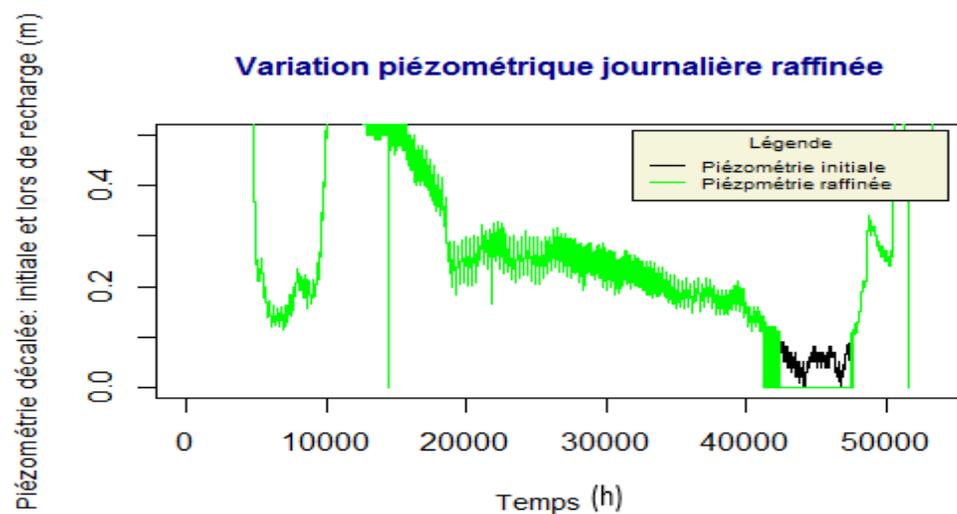
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée

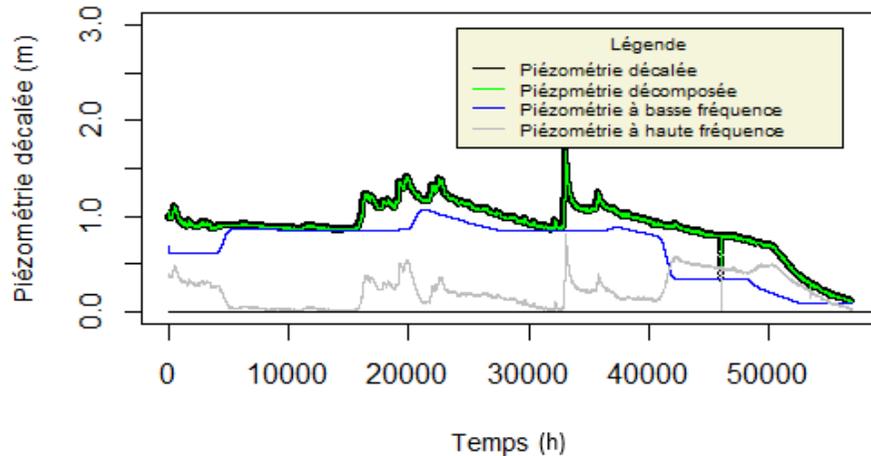


- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	28/05/2009 20:10	02/09/2009 10:50	30/05/2009 04:10	-0.96	-0.52	0.44	1920
2	21/09/2009 04:55	05/10/2009 12:40	02/10/2009 23:45	-1.79	-1.29	0.5252844	16970
3	05/10/2009 12:55	12/10/2009 00:30	11/10/2009 23:35	-1.8	-1.34	0.46	9280

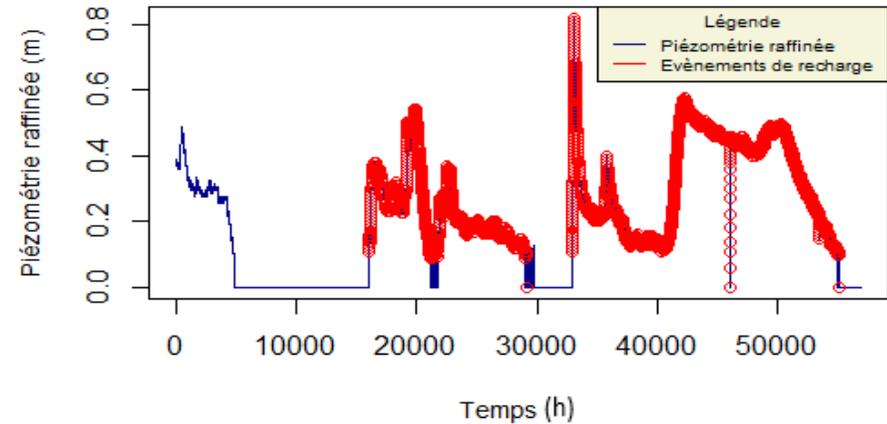
ANNEXE 13: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ14

Variation piézométrique journalière



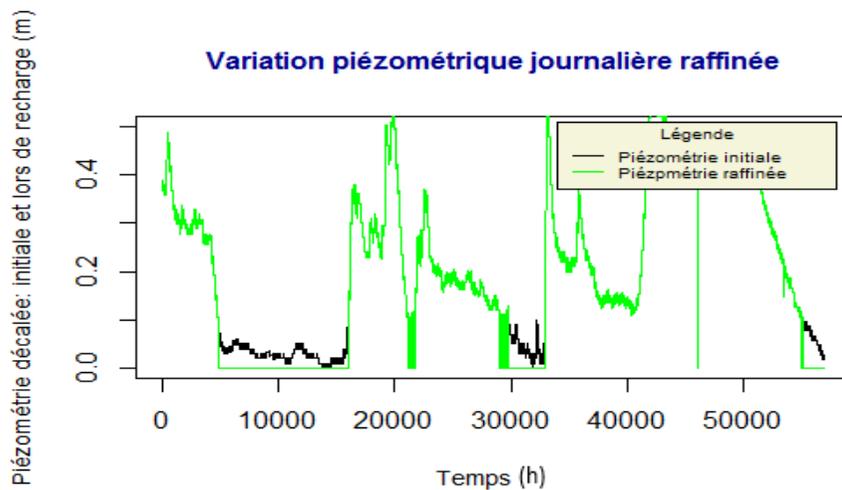
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée

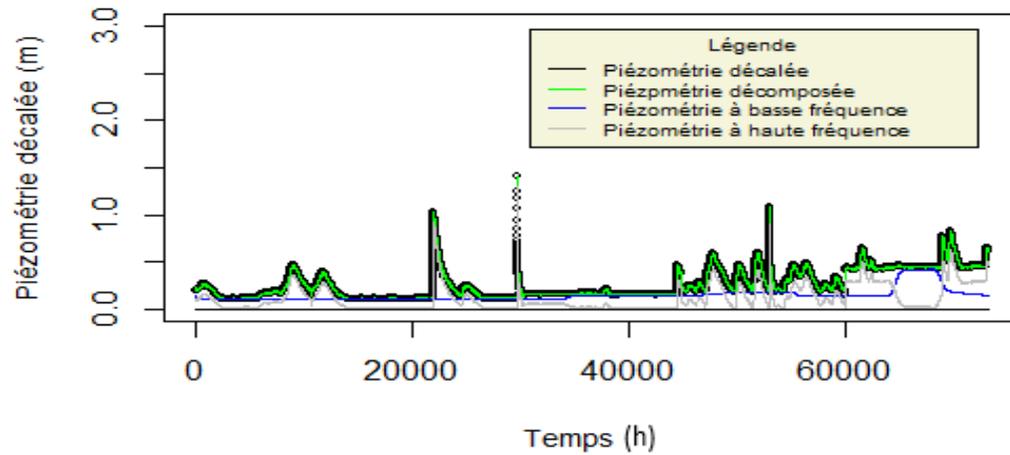


- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	12/02/2009 03:15	30/03/2009 06:10	25/02/2009 17:20	-2.92	-2.47	0.4352	19565
2	12/04/2009 18:05	29/06/2009 08:35	13/04/2009 06:20	-2.92	-2.21	0.71	17640

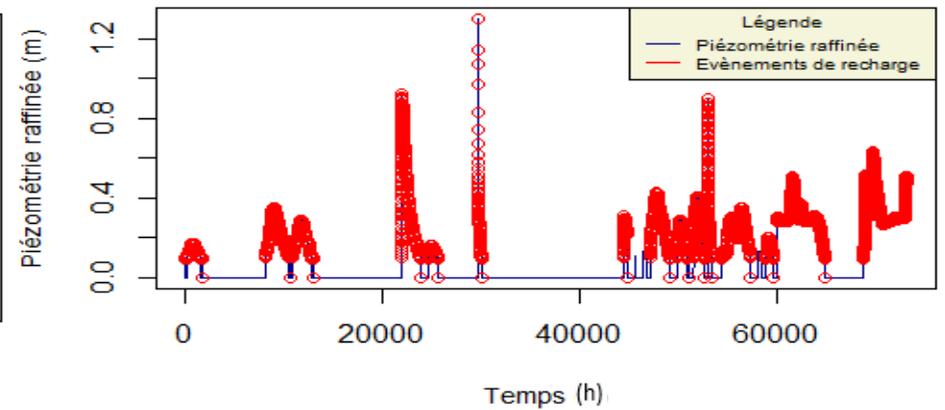
ANNEXE 14: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ15

Variation piézométrique journalière



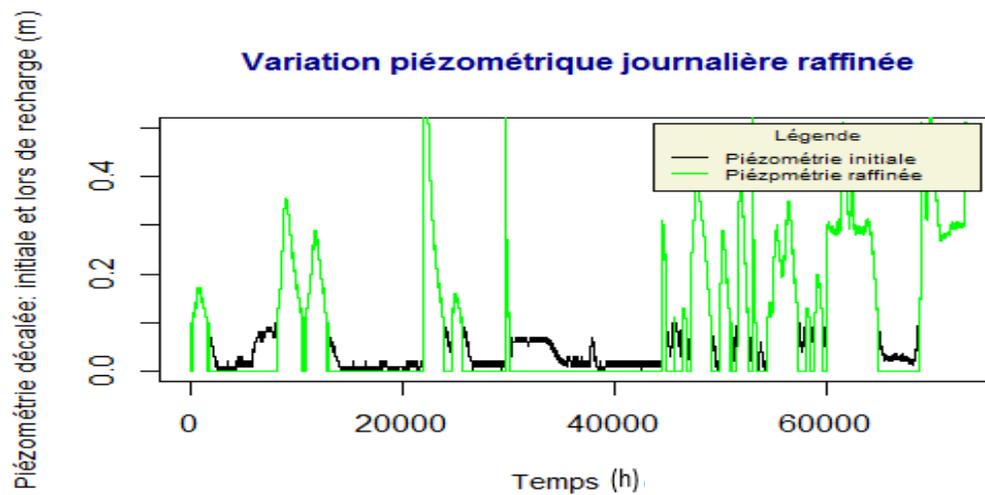
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée



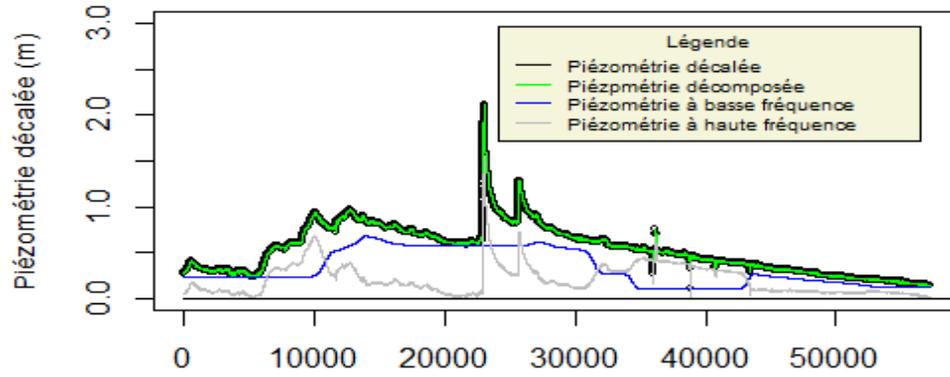
- Raffinement piézométrique -

Tableau récapitulatif des caractéristiques ci-dessous

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	22/01/2009 17:20	28/01/2009 07:55	24/01/2009 13:30	-2.89	-2.82	0.07	2650
2	23/02/2009 21:50	04/03/2009 13:00	26/02/2009 16:30	-2.88	-2.63	0.2442951	4000
3	05/03/2009 07:50	12/03/2009 20:15	08/03/2009 09:15	-2.88	-2.7	0.1800002	4405
4	13/04/2009 04:50	20/04/2009 11:30	13/04/2009 11:45	-2.89	-2.07	0.82	9960
5	22/04/2009 21:10	26/04/2009 08:50	23/04/2009 15:10	-2.89	-2.83	0.06	25920
6	25/09/2009 06:30	26/09/2009 06:50	25/09/2009 06:35	-1.92	-1.69	0.23	7200
7	10/03/2010 03:45	11/03/2010 12:20	10/03/2010 12:50	-2.84	-2.63	0.21	13080
8	06/02/2012 03:20	13/02/2012 02:35	08/02/2012 07:25	-2.83	-2.5	0.325685	3125
9	22/02/2012 14:15	26/02/2012 05:00	23/02/2012 10:40	-2.81	-2.62	0.1899897	29400
10	11/03/2012 03:30	15/03/2012 03:35	12/03/2012 01:50	-2.81	-2.5	0.31	32160
11	15/11/2012 05:10	16/11/2012 06:40	15/11/2012 05:55	-2.67	-2.01	0.66	64800
12	08/02/2013 20:35	19/02/2013 01:45	15/02/2013 19:55	-2.81	-2.6	0.2499538	10040
13	02/03/2013 02:10	04/03/2013 20:05	02/03/2013 18:05	-2.85	-2.75	0.1	22920
14	19/12/2014 07:20	09/02/2015 07:35	28/01/2015 17:05	-2.67	-2.438	0.232	58185
15	22/02/2015 12:00	10/03/2015 14:00	26/02/2015 03:30	-2.643	-2.267	0.5316284	5250

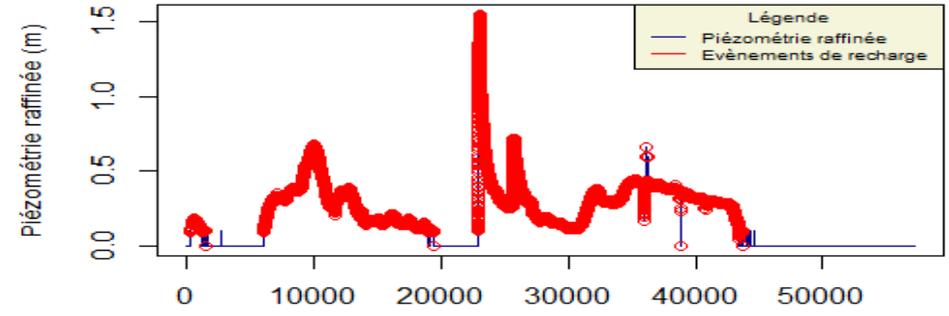
ANNEXE 15: TRAITEMENT DES DONNEES POUR PZ20

Variation piézométrique journalière



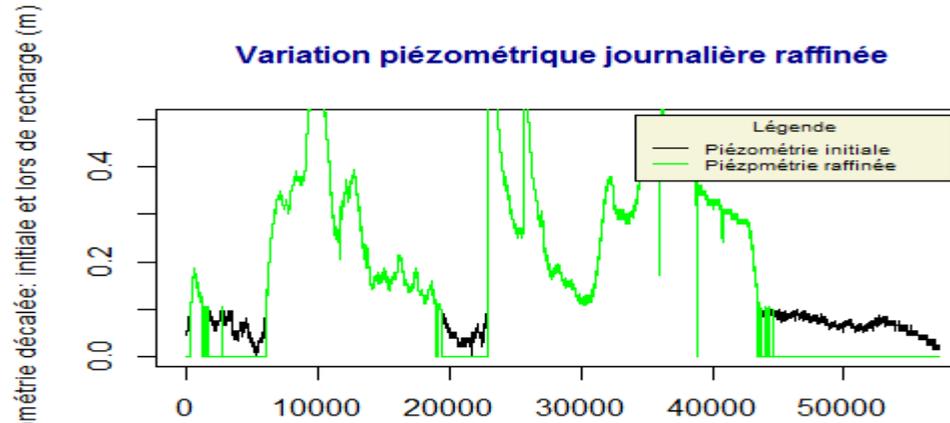
- Traitement piézométrique -

Evènements de recharge



- Détection des évènements -

Variation piézométrique journalière raffinée



- Raffinement piézométrique -

n	date.debut	date.fin	date.peak	pz.initial	pz.peak	amplitude	rising.time.min
1	23/01/2009 17:20	27/01/2009 14:50	24/01/2009 13:00	-3.39	-3.31	0.08	28320
2	12/02/2009 21:10	31/03/2009 13:45	26/02/2009 17:50	-3.39	-2.79	0.577	19960
3	12/04/2009 19:25	07/06/2009 06:25	13/04/2009 07:05	-3.05	-1.6	1.45	16800
4	07/06/2009 06:35	24/06/2009 07:25	07/06/2009 07:00	-3.39	-3.26	0.13	36000

ANNEXE 16: TABLEAU RECAPITULATIF DE TOUS LES PARAMETRES PIEZOMETRIQUES ET HYDROCLIMATIQUES

Pz	Ev	Prof ini	Amp	Tm	Précip initiale	Intensité max	Cumul pluvio	API
Pz 1	1	-1.87	0.3	5055	5.5	5.5	18	136
	2	-1.73	0.88	5460	9	9	45	1104.5
	3	-1.67	0.46	1605	27.5	27.5	392	0
	4	-1.6	0.35	1910	3.5	3.5	8	288
Pz 2	5	-2.1	0.1	2425	0	0	0	0
	6	-2.08	1.26	2580	5.5	5.5	10	136
	7	-2.09	0.2	4295	0	0	0	0
	8	-2.04	1.56	133830	27.5	27.5	392	0
	9	-1.32	1.18	19145	0	18.5	171	0
	10	-1.48	1.15	18480	0	0	0	7.5
Pz 4	11	-1.96	0.05	3840	11	0	0	0
	12	-2.12	0.24	4440	76,5	9	9	9
	13	-2.12	0.28	26695	27,5	27.5	27.5	27.5
	14	-2.05	0.98	15770	319,5	70.5	70.5	70.5
	15	-1.61	0.67	8960	92,5	20	20	20
	16	-1.94	0.13	3620	75	71	71	71
	17	-2	1.48	49595	0	0	0	0
	18	-1.88	0.2	10620	0	47.5	47.5	47.5
	19	-1.75	0.9	1990	68	8	8	8
	20	-1.68	1.21	6735	51,5	3	3	3
	21	-1.88	0.12	4235	74,5	24.5	24.5	24.5
	22	-1.88	0.29	30360	8	0	0	0
	23	-1.87	0.99	63240	150	0	0	0
	24	-1.49	1.04	5210	13,5	0	0	0
	25	-1.34	0.95	4185	32,3	19.7	19.7	19.7

26	-1.38	0.7	9395	31,8	6.6	6.6	6.6
27	-1.27	0.98	12155	24,1	16.5	16.5	16.5
28	-0.96	0.85	26215	32,8	0.7	0.7	0.7
29	-1.95	0.76	9460	79,2	20.7	20.7	20.7
30	-1.56	0.54	5015	61,8	31.9	31.9	31.9
31	-1.49	0.17	17535	67,8	22.7	22.7	22.7
32	-1.72	0.87	35595	72,5	5	5	5
33	-1.55	0.1	19565	74,5	3	3	3
34	-1.76	0.05	2840	47,5	16.5	16.5	16.5
35	-1.95	0.5	7200	134	98.6	98.6	98.6
36	-1.66	0.14	7200	39,8	13	13	13
37	-2	0.99	48180	40,2	2.1	2.1	2.1
38	-1.89	0.11	1590	154,7	1.8	1.8	1.8
39	-2.01	0.22	2710	61	20.5	20.5	20.5
40	-2.01	0.06	43200	0,2	0	0	0
41	-1.99	0.32	2710	91	89.5	89.5	89.5
42	-2.03	0.67	4740	0,1	20.2	20.2	20.2
43	-2.04	0.14	7785	276,8	4.3	4.3	4.3
44	-2.08	0.1	2275	39,6	12.7	12.7	12.7
45	-2.09	0.23	11405	12,4	2.04	2.04	2.04
46	-2.13	0.05	3705	11	0	0	0
47	-2.12	0.10	5875	76,5	9	9	9
48	-2.2	0.48	11395	27,5	27.5	27.5	27.5
49	-2.1	0.09	2425	319,5	70.5	70.5	70.5
50	-2.08	1.26	2580	92,5	20	20	20
51	-2.09	0.2	4295	75	71	71	71
52	-2.04	1.56	133830	0	0	0	0
53	-1.32	1.18	19145	0	47.5	47.5	47.5
54	-1.48	1.15	18480	68	8	8	8

Pz 5	55	-0.73	0.22	3120	16.5	16.5	16.5	1
	56	-0.73	0.41	8400	0	0	0	300
	57	-0.73	0.69	3095	0	0	0	153
	58	-0.67	0.62	2205	16	16	121	28
	59	-0.53	0.65	2870	9	9	35	1104.5
	60	-0.73	0.12	13320	0.5	0.5	0.5	300
	61	-0.73	0.65	13200	27.5	27.5	27.5	0
	62	-0.72	0.15	3155	18.5	18.5	180.5	0
	63	-0.73	0.07	16320	0	0	0	91
	64	-0.73	0.69	6000	23.5	23.5	23.5	0
	65	0.14	0.04	1960	4	4	10	160
	67	-0.2	0.67	34330	20	20	207	136
	68	-0.74	1.05	4860	0	1	1	300
	69	-0.73	0.15	3480	0	0	0	253
	70	-0.64	0.7	5160	47.5	47.5	47.5	0
	71	-0.73	0.17	1660	0	1	1	12.5
	72	-0.71	0.81	27120	11.5	11.5	11.5	741
	73	-0.64	0.72	7445	32.5	32.5	544.5	0
	74	-0.72	0.10	28440	0	3.5	6	153
	75	-0.73	0.04	25320	0	0	0	28
	76	-0.73	0.53	10680	16.5	16.5	16.5	36
	77	-0.62	0.94	10190	3	3	6	84.5
	78	-0.64	0.9	8325	24.5	24.5	312	105
	79	-0.74	0.06	4920	1.5	1.5	1.5	612.5
80	-0.74	0.85	20345	20	20	210	0	
81	-0.7	0.89	1745	17	17	153	24.5	
82	-0.73	0.93	10690	2.5	2.5	4	578	
83	-0.46	0.05	16680	0.5	0.5	0.5	162	
84	-0.47	0.85	8300	0	13	91	40.5	

	85	-0.09	0.37	7325	0	8.5	36	0	
	86	-0.48	0.89	2310	20.5	20.5	220	180.5	
	87	-0.65	1.16	9160	69.6	69.6	2456.4	0	
	88	-0.23	0.55	3655	8.4	8.4	32	52	
	89	-0.4	0.91	22740	14.6	22.2	144.8	118.5	
	90	-0.27	0.05	2160	11.3	11.3	11.3	1	
	91	-0.25	0.28	6795	1.5	1.5	2	50	
	92	-0.25	0.12	17640	0	0	0	95.2	
	93	-0.26	0.91	9900	0	0	0	137.7	
	94	-0.25	0.87	14405	5.6	5.6	18.6	126.4	
	95	-0.5	0.8	33840	66.4	66.4	2237.8	1132.8	
	96	-0.51	0.97	13040	32.1	32.1	319.2	73.2	
	97	-0.32	0.15	2220	15.5	15.5	128	21	
	98	-0.32	0.74	21190	39.5	39.5	798	8	
	99	-0.45	0.94	23760	34.5	34.5	608	1	
	Pz 6	100	-2.21	0.36	4040	16	16	136	45
		101	-2.18	0.3	10080	0	0	0	0
		102	-2.4	0.05	11170	27.5	27.5	392	0
	Pz 7	103	-2.75	1.23	28690	3.5	3.5	8	1
104		-1.68	0.78	14910	5.5	5.5	17.5	136	
105		-1.7	0.39	10500	27.5	27.5	392	0	
106		-2.02	0.36	10255		0	0	0	
Pz 8	107	-2.83	0.165	6620	-----	-----	-----	-----	
	108	-2.87	0.6	11580	-----	-----	-----	-----	
	---	---	---	---	-----	-----	-----	-----	
	109	-3.1	0.36	1576800	-----	-----	-----	-----	
	110	-2.68	0.51	4207680	-----	-----	-----	-----	
	111	-2.5	0.2	2629440	-----	-----	-----	-----	
	112	-3.28	0.47	1051200	-----	-----	-----	-----	
	113	-3.55	0.14	527040	-----	-----	-----	-----	

Pz 9	114	-3.39	0.19	2103840	-----	-----	-----	-----
	115	-2.72	0.32	1051200	-----	-----	-----	-----
	116	-2.78	0.24	1578240	-----	-----	-----	-----
	117	-3.34	0.11	1051200	-----	-----	-----	-----
	118	-3.35	0.92	4733280	-----	-----	-----	-----
	119	-2.73	0.2	1051200	-----	-----	-----	-----
	120	-2.77	0.06	525600	-----	-----	-----	-----
	121	-3.47	0.37	3155040	-----	-----	-----	-----
	122	-3.03	0.26	1576800	-----	-----	-----	-----
	123	-3.07	0.36	2630880	-----	-----	-----	-----
	124	-3.39	0.2	1052640	-----	-----	-----	-----
	125	-3.08	0.31	1051200	-----	-----	-----	-----
	126	-2.82	0.44	2103840	-----	-----	-----	-----
	127	-2.68	0.22	1052640	-----	-----	-----	-----
	128	-2.49	0.35	1051200	-----	-----	-----	-----
	129	-2.50	0.06	1576800	-----	-----	-----	-----
	130	-3.06	0.45	5260320	-----	-----	-----	-----
	131	-2.77	0.67	3680640	-----	-----	-----	-----
	132	-3.19	0.78	4207680	-----	-----	-----	-----
	133	-2.51	0.2	1578240	-----	-----	-----	-----
	134	-3.19	0.25	3682080	-----	-----	-----	-----
	135	-2.94	0.06	2103840	-----	-----	-----	-----
	136	-3.21	0.12	2103840	-----	-----	-----	-----
	137	-3.19	0.04	527040	-----	-----	-----	-----
	138	-3.21	0.18	525600	-----	-----	-----	-----
	139	-3.19	0.17	3156480	-----	-----	-----	-----
	140	-3.17	0.52	4207680	-----	-----	-----	-----
Pz 10	141	-3.92	0.75	18695	0	0	0	300
	142	-3.65	0.59	2480	5.5	5.5	18	136

	143	-3.49	0.95	2790	9	9	35	1104.5
	144	-3.9	0.12	9875	0	0	0	392
Pz 11	145	-2.07	0.15	6085	47.5	6085	47.5	1152
	146	-2.05	0.17	2080	0	2080	0	0
Pz 12	147	-0.96	0.44	1920	0	0	0	0
	148	-1.79	0.53	16970	2	5	14	15
	149	-1.8	0.46	9280	0	4.5	10	0
Pz 14	150	-2.92	0.44	19565	20	20	144	136
	151	-2.92	0.71	17640	71	71	2556	6
Pz 15	152	-2.89	0.07	2650	4	4	10	160
	153	-2.88	0.25	4000	12	12	78	325
	154	-2.88	0.18	4405	8.5	8.5	40.5	152
	155	-2.89	0.82	9960	1	1	1	2556
	156	-2.89	0.06	25920	7	7	28	125
	157	-1.92	0.23	7200	0	0	0	253
	158	-2.84	0.21	13080	2	2	2	84.5
	159	-2.83	0.33	3125	7	7	22	435
	160	-2.81	0.2	29400	0	0	0	1225
	161	-2.81	0.31	32160	1	1	1	220.5
	162	-2.67	0.66	64800	0	0	0	2457
	163	-2.81	0.25	10040	3.1	3.1	6.4	30.4
	164	-2.85	0.1	22920	0	0	0	206
	165	-2.67	0.23	58185	0	0	0	219.6
166	-2.64	0.53	5250	31.9	31.9	522	23.8	
Pz 20	167	-3.39	0.08	28320	6	6	21	9
	168	-3.39	0.58	19960	20	20	210	136
	169	-3.05	1.45	16800	71	71	2556	6
	170	-3.39	0.13	36000	0	0	0	0

ANNEXE 17: COEFFICIENTS DE CORRELATIONS PZ 2 - 4 - 5

Piézomètre 2

```
[1] "Coefficients de corrélation"
pz.initial          pz.initial          pluviométrie.initial  amplitude  rising.time.min  intensite.maximale  cumul.pluviometrique
1.00000000          0.11448081          0.11448081          -0.53051124  0.08721511          0.35072966          0.3762419
pluviométrie.initial 0.11448081          1.00000000          0.10548251  -0.24469292          0.78076428          0.8721597
amplitude           -0.53051124          0.10548251          1.00000000          0.14516406          -0.09714008          -0.2017423
rising.time.min     0.08721511          -0.24469292          0.14516406          1.00000000          -0.43471508          -0.3972236
intensite.maximale  0.35072966          0.78076428          -0.09714008          -0.43471508          1.00000000          0.9674449
cumul.pluviometrique 0.37624194          0.87215969          -0.20174227          -0.39722361          0.96744492          1.0000000
API                -0.56272628          -0.01363852          0.98884221          0.16306504          -0.15011308          -0.2802854
API
pz.initial          -0.56272628
pluviométrie.initial -0.01363852
amplitude           0.98884221
rising.time.min     0.16306504
intensite.maximale  -0.15011308
cumul.pluviometrique -0.28028536
API                1.00000000
```

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	-0.061	0.4619	0.236	0.29	0.989
Temps de montée	0.035	0.217	0.197	0.277	0.163

Piézomètre 4

```
[1] "Diagrammes de dispersion"
[1] "Coefficients de corrélation"
pz.initial          pz.initial          pluviométrie.initial  amplitude  rising.time.min  intensite.maximale  cumul.pluviometrique
1.00000000          0.05475903          -0.05475903          0.215465152  -0.12950037          -0.05627636          -0.05411276
pluviométrie.initial -0.05475903          1.00000000          0.237939751  0.20143665          0.99690322          0.76767941
amplitude           0.21546515          0.23793975          1.000000000          0.50985964          0.23652154          0.29025674
rising.time.min     -0.12950037          0.20143665          0.509859639          1.00000000          0.19719731          0.27684698
intensite.maximale  -0.05627636          0.99690322          0.236521536          0.19719731          1.00000000          0.76895271
cumul.pluviometrique -0.05411276          0.76767941          0.290256737          0.27684698          0.76895271          1.00000000
API                0.06065591          -0.16297455          -0.007795184          -0.09117068          -0.14114778          -0.16343007
API
pz.initial          0.060655906
pluviométrie.initial -0.162974545
amplitude           -0.007795184
rising.time.min     -0.091170677
intensite.maximale  -0.141147785
cumul.pluviometrique -0.163430067
API                1.000000000
```

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	-0.531	0.105	-0.971	-0.202	-0.08
Temps de montée	0.087	-0.245	-0.0434	-0.497	-0.091

Piézomètre 5

```
[1] "Diagrammes de dispersion"
[1] "Coefficients de corrélation"
pz.initial          pz.initial          pluviométrie.initial  amplitude  rising.time.min  intensite.maximale  cumul.pluviometrique
1.00000000          0.05484519          -0.05484519          -0.06092392  0.03453598          -0.02708873          0.002447737
pluviométrie.initial -0.05484519          1.00000000          0.46189672  0.21695335          0.98874223          0.822738251
amplitude           -0.060923916          0.46189672          1.000000000          0.08305928          0.48227880          0.362599783
rising.time.min     0.034535976          0.21695335          0.08305928          1.00000000          0.23124457          0.296408283
intensite.maximale  -0.027088733          0.98874223          0.48227880          0.23124457          1.00000000          0.826822142
cumul.pluviometrique 0.002447737          0.82273825  0.36259978          0.29640828          0.82682214          1.000000000
API                -0.119453538          0.03488873  0.05746603          0.23302090          0.01812712          0.212724193
API
pz.initial          -0.11945354
pluviométrie.initial 0.03488873
amplitude           0.05746603
rising.time.min     0.23302090
intensite.maximale  0.01812712
cumul.pluviometrique 0.21272419
API                1.00000000
```

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	-0.061	0.462	0.482	0.633	0.057
Temps de montée	0.035	0.217	0.231	0.296	0.233

Piézomètre 6

[1] "Diagrammes de dispersion"
 [1] "Coefficients de corrélation"

	pz.initial	pluviométrie.initial	amplitude	rising.time.min	intensite.maximale	cumul.pluviometrique	API
pz.initial	1.0000000	-0.88151673	0.9495437	-0.51406448	-0.88151673	-0.9753263	0.38714713
pluviométrie.initial	-0.8815167	1.00000000	-0.6889551	0.04816665	1.00000000	0.9640028	0.09405667
amplitude	0.9495437	-0.68895507	1.0000000	-0.75714744	-0.68895507	-0.8568743	0.65679006
rising.time.min	-0.5140645	0.04816665	-0.7571474	1.00000000	0.04816665	0.3120163	-0.98988091
intensite.maximale	-0.8815167	1.00000000	-0.6889551	0.04816665	1.00000000	0.9640028	0.09405667
cumul.pluviometrique	-0.9753263	0.96400279	-0.8568743	0.31201630	0.96400279	1.0000000	-0.17404250
API	0.3871471	0.09405667	0.6567901	-0.98988091	0.09405667	-0.1740425	1.00000000

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	0.95	-0.689	-0.689	-0.857	0.657
Temps de montée	-0.514	0.048	0.048	0.312	-0.99

Piézomètre 7

[1] "Diagrammes de dispersion"
 [1] "Coefficients de corrélation"

	pz.initial	pluviométrie.initial	amplitude	rising.time.min	intensite.maximale	cumul.pluviometrique	API
pz.initial	1.0000000	0.4685008	-0.7530161	-0.87597429	0.4685008	0.4616868	0.47092606
pluviométrie.initial	0.4685008	1.0000000	-0.3891996	-0.35821802	1.0000000	0.9891915	-0.19665839
amplitude	-0.7530161	-0.3891996	1.0000000	0.97157459	-0.3891996	-0.4799977	0.15414761
rising.time.min	-0.8759743	-0.3582180	0.9715746	1.00000000	-0.3582180	-0.4229477	-0.08372767
intensite.maximale	0.4685008	1.0000000	-0.3891996	-0.35821802	1.0000000	0.9891915	-0.19665839
cumul.pluviometrique	0.4616868	0.9891915	-0.4799977	-0.42294774	0.9891915	1.0000000	-0.30503498
API	0.4709261	-0.1966584	0.1541476	-0.08372767	-0.1966584	-0.3050350	1.00000000

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	-0.531	0.105	-0.971	-0.202	0.154
Temps de montée	0.087	-0.245	-0.0434	-0.497	-0.084

Piézomètre 10

[1] "Diagrammes de dispersion"
 [1] "Coefficients de corrélation"

	pz.initial	pluviométrie.initial	amplitude	rising.time.min	intensite.maximale	cumul.pluviometrique	API
pz.initial	1.0000000	0.9991923	0.6136513	-0.8491326	0.9991923	0.9937581	0.6463171
pluviométrie.initial	0.9991923	1.0000000	0.6447614	-0.8288722	1.0000000	0.9953091	0.6492112
amplitude	0.6136513	0.6447614	1.0000000	-0.1237513	0.6447614	0.6624916	0.5162186
rising.time.min	-0.8491326	-0.8288722	-0.1237513	1.0000000	-0.8288722	-0.7959145	-0.3525546
intensite.maximale	0.9991923	1.0000000	0.6447614	-0.8288722	1.0000000	0.9953091	0.6492112
cumul.pluviometrique	0.9937581	0.9953091	0.6624916	-0.7959145	0.9953091	1.0000000	0.7192594
API	0.6463171	0.6492112	0.5162186	-0.3525546	0.6492112	0.7192594	1.0000000

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	0.614	0.645	0.645	0.625	0.516
Temps de montée	-0.849	-0.829	-0.829	-0.796	-0.353

Piézomètre 12

[1] "Diagrammes de dispersion"
 [1] "Coefficients de corrélation"

	pz.initial	pluviométrie.initiale	amplitude	rising.time.min	intensite.maximale	cumul.pluviometrique	API
pz.initial	1.0000000	-0.4909916	-0.6738153	-0.8542818	-0.9948755	-0.9578409	-0.4909916
pluviométrie.initiale	-0.4909916	1.0000000	0.9745408	0.8722853	0.5765567	0.7205767	1.0000000
amplitude	-0.6738153	0.9745408	1.0000000	0.9597158	0.7450706	0.8576933	0.9745408
rising.time.min	-0.8542818	0.8722853	0.9597158	1.0000000	0.9024607	0.9676071	0.8722853
intensite.maximale	-0.9948755	0.5765567	0.7450706	0.9024607	1.0000000	0.9819805	0.5765567
cumul.pluviometrique	-0.9578409	0.7205767	0.8576933	0.9676071	0.9819805	1.0000000	0.7205767
API	-0.4909916	1.0000000	0.9745408	0.8722853	0.5765567	0.7205767	1.0000000

> |

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	-0.674	0.975	0.745	0.858	0.975
Temps de montée	-0.854	0.872	0.902	0.968	0.872

Piézomètre 14

[1] "Diagrammes de dispersion"
 [1] "Coefficients de corrélation"

	pz.initial	pluviométrie.initiale	amplitude	rising.time.min	intensite.maximale	cumul.pluviometrique	API
pz.initial	1	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pluviométrie.initiale	NA	1	1	-1	1	1	-1
amplitude	NA	1	1	-1	1	1	-1
rising.time.min	NA	-1	-1	1	-1	-1	1
intensite.maximale	NA	1	1	-1	1	1	-1
cumul.pluviometrique	NA	1	1	-1	1	1	-1
API	NA	-1	-1	1	-1	-1	1

Warning message:
 in cor(bm) : l'écart type est nul

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	-----	-----	-----	-----	-----
Temps de montée	-----	-----	-----	-----	-----

Piézomètre 15

[1] "Diagrammes de dispersion"
 [1] "Coefficients de corrélation"

	pz.initial	pluviométrie.initiale	amplitude	rising.time.min	intensite.maximale	cumul.pluviometrique	API
pz.initial	1.00000000	-0.06139395	0.05493344	0.03719211	-0.06139395	0.07482978	-0.05766083
pluviométrie.initiale	-0.06139395	1.00000000	0.15625042	-0.41360390	1.00000000	0.94969578	-0.31023961
amplitude	0.05493344	0.15625042	1.00000000	0.17197432	0.15625042	0.26662900	0.77211053
rising.time.min	0.03719211	-0.41360390	0.17197432	1.00000000	-0.41360390	-0.26390606	0.38841789
intensite.maximale	-0.06139395	1.00000000	0.15625042	-0.41360390	1.00000000	0.94969578	-0.31023961
cumul.pluviometrique	0.07482978	0.94969578	0.26662900	-0.26390606	0.94969578	1.00000000	-0.21738519
API	-0.05766083	-0.31023961	0.77211053	0.38841789	-0.31023961	-0.21738519	1.00000000

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	0.549	0.156	0.156	0.267	0.772
Temps de montée	0.037	-0.414	-0.414	-0.264	0.388

ANNEXE 20: COEFFICIENTS DE CORRELATIONS PZ 20

Piézomètre 20

[1] "Diagrammes de dispersion"

[1] "Coefficients de corrélation"

	pz.initial	pluviométrie.initiale	amplitude	rising.time.min	intensite.maximale	cumul.pluviometrique	API
pz.initial	1.0000000	0.96570248	0.93592532	-0.6529322	0.96570248	0.9971103	-0.32262924
pluviométrie.initiale	0.9657025	1.00000000	0.98847270	-0.8231842	1.00000000	0.9822211	-0.07269255
amplitude	0.9359253	0.98847270	1.00000000	-0.8326690	0.98847270	0.9595328	0.02763088
rising.time.min	-0.6529322	-0.82318419	-0.83266900	1.0000000	-0.82318419	-0.7038567	-0.43799690
intensite.maximale	0.9657025	1.00000000	0.98847270	-0.8231842	1.00000000	0.9822211	-0.07269255
cumul.pluviometrique	0.9971103	0.98222106	0.95953278	-0.7038567	0.98222106	1.0000000	-0.24982748
API	-0.3226292	-0.07269255	0.02763088	-0.4379969	-0.07269255	-0.2498275	1.00000000

Corrélation entre	Profondeur initiale	Précipitation initiale	Intensité maximale	Cumul pluviométrique	API
Amplitude de fluctuation	0.936	0.988	0.988	0.96	0.276
Temps de montée	-0.653	-0.823	-0.823	0.982	-0.438