HAL
open science

Caractérisation des transferts sol - nappe par analyse des fluctuations piézométriques suivant la pluviométrie

Cyril Montini

To cite this version:

Cyril Montini. Caractérisation des transferts sol - nappe par analyse des fluctuations piézométriques suivant la pluviométrie. Sciences du Vivant [q-bio]. 2006. hal-02817454

HAL Id: hal-02817454

https://hal.inrae.fr/hal-02817454v1

Submitted on 6 Jun 2020

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.

Université Montpellier 2
Département Enseignement des Sciences de la Terre, de l'Eau
et de l'Environnement de Montpellier (DESTEEM)
Mention Biologie Géosciences Agroressources Environnement

Mémoire de fin d'études

Master Gestion et Evaluation des Ressources en Eau

Spécialité : HYDROGEOLOGIE

CARACTERISATION DES TRANSFERTS SOL - NAPPE PAR ANALYSE DES FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES SUIVANT LA PLUVIOMETRIE

Par : *Cyril MONTINI*

Edité le 5 septembre 2006

Adresses :

Université Montpellier 2
Laboratoire Hydrosciences
Maison des Sciences de l'eau
CC MSE – N.PERES
Place Eugène Bataillon
34095 MONTPELLIER cedex 5

INRA Domaine Saint Paul
Bât Climat Sol Environnement (Sol)
Pôle technologique AGROPARC
Avenue de l'aérodrome
84914 AVIGNON Cedex 9

Remerciements

Je tiens d'abord à exprimer mes remerciements aux personnes et aux institutions qui ont contribué à la réalisation de cette étude.

D'abord, mes remerciements s'adressent au Dr Liliana DI PIETRO, directrice de recherche et animatrice de l'équipe Transferts de masse en Sols Hétérogènes, qui m'a offert la possibilité de réaliser cette étude. Je la remercie de sa confiance et de son appui pour la bonne réussite de mon travail.

Un grand merci au Dr Maminirina JOELSON pour avoir contribué à cette étude. Je le remercie aussi pour sa générosité et pour le temps consacré depuis l'élaboration jusqu'à la finalisation du mémoire. Je tiens également à lui exprimer ma reconnaissance pour m'avoir fait partager ses connaissances scientifiques dans le domaine du traitement du signal.

Un grand merci à Frank TISON, responsable de l'acquisition des données piézométriques pendant la réalisation de cette étude. Ces données sont à la base de ce travail.

J'exprime ma gratitude à Daniel ROUX, responsable de l'acquisition des données de la station agrométéorologique de Montfavet, pour m'avoir permis de visiter cette station et pour avoir répondu à mes interrogations.

Un grand merci à Bernard BACULAT, responsable du réseau météorologique de l'unité expérimentale AGROCLIM et de la banque de données, pour m'avoir fourni les données pluviométriques nécessaires.

Enfin, un merci à toutes les personnes qui m'ont accordé leur amitié et sympathie pendant mon stage à l'INRA - Domaine Saint Paul d'Avignon : Raphaël, Alodie, Ghislain, Yves, Claude, Stéphane, Éric, Mickaël, Jean-Yves, Georges, Iiad.

Avant-propos

Ce stage de fin d'études a été effectué à l'INRA d'Avignon de mars à juillet 2006 au sein de l'équipe Transferts de masse en Sols Hétérogènes (TSH). Le sujet est la caractérisation des transferts sol – nappe par analyse des fluctuations piézométriques suivant la pluviométrie. Les données ont été relevées à la fois sur un site expérimental et par une station météorologique situés sur le domaine de l'INRA. L'exploitation des données s'est faite dans les locaux de l'unité Climat Sol Environnement (CSE).

Les techniques utilisées dans ce mémoire sont essentiellement des méthodes de traitement du signal, qui rendent des résultats sous forme graphique et demandent donc une interprétation visuelle. Compte tenu du caractère limité du volume autorisé pour ce rapport, privilégiant l'interprétation devant les aspects techniques, certains détails concernant les méthodes utilisées seront uniquement indiqués en référence. Ces méthodes sont exposées dans de nombreux ouvrages de physique (DEBNATH, 1995 ; GASQUET, 2000 ; ADDISON, 2002) et pour diverses applications (SADOWSKY, 1996 ; TORRENCE, 1998 ; JOELSON, 2004 ; GRINSTED, 2004 ; CROSBIE, 2005). Leurs applications en hydrogéologie concernent actuellement essentiellement le karst avec quelques ouvrages de référence : analyses spectrales (MANGIN, 1984 ; MATHEVET, 2002), analyses en ondelettes (LABAT, 2000). Au final, les résultats de cette étude nous permettront de mettre en évidence un mode de diffusion "anormale" de l'eau de pluie du sol vers la nappe.

SOMMAIRE

Préambule 4

Présentation de l'INRA 6

1 Présentation générale 7

1.1 Contextes géographique et géologique 7

1.2 Nappe alluviale de la basse Durance 9

1.3 Climatologie 10

1.4 Présentation du site d'études et instrumentation 11

1.4.1 Lysimètre à drainage 13

1.4.2 Piézomètres 14

1.4.3 Sondes piézométriques 15

1.4.4 Prélèvements d'eau et mesures de l'état hydrique du sol 17

1.4.5 Station agrométéorologique 18

2 Outils d'analyse des données 20

2.1 Outils statistiques d'analyse des données 20

2.1.1 Notion de variable aléatoire 20

2.1.2 Loi de probabilité d'une variable aléatoire 21

2.1.3 Histogramme des valeurs issues d'une expérience 23

2.2 Outils d'analyse spectrale 23

2.2.1 Analyse de Fourier 24

2.2.2 Analyse en ondelettes 27

3 ÉTUDE DES TRANSFERTS SOL-NAPPE 32

3.1 Caractéristiques des données 32

3.1.1 Relevés piézométriques 32

3.1.2 Données pluviométriques 34

3.2 Collecte des données 35

3.3 Prétraitement des données **36**

3.3.1 Interpolation des données manquantes 36

3.3.2 Filtrage par transformée de Fourier 37

3.4 Histogramme **42**

3.5 Analyse par transformée en ondelettes **43**

Conclusions et perspectives **46**

Annexes **i**

Références bibliographiques **xiii**

FIGURES

Figure 1 : Situation géographique et géologique du site expérimental 7

Figure 2 : Fentes de dessiccation (observées sur le site le 12/07/2006) 8

Figure 3 : Modèle Numérique de Terrain (MNT) du site atelier "Fontanille" 12

Figure 4 : Schéma de l'instrumentation du site atelier "Fontanille" 12

Figure 5 : Photographie du lysimètre en cours de réalisation et actuel 13

Figure 6 : Coupe géologique en travers du site atelier "Fontanille" 14

Figure 7 : Courbes de Gauss 22

Figure 8 : Signal périodique et sa décomposition en séries de Fourier 24

Figure 9 : Signaux exemples 27

Figure 10 : Exemple 1 – Analyse en ondelettes d'un signal sinusoïdal 28

Figure 11 : Exemple 2 – Analyse en ondelettes d'un évènement non stationnaire 28

Figure 12 : Exemple 3 – Analyse en ondelettes d'un signal sinusoïdal comportant un évènement non stationnaire 29

Figure 13 : Ondelette de Morlet 30

Figure 14 : Interpolation du signal piézométrique 36

Figure 15 : Signal piézométrique brut avec la chronique de pluie 37

Figure 16 : Histogramme des fluctuations de hauteur d'eau (en bleu) et sa loi normale (en rouge) 42

Figure 17 : Log distribution de probabilité des points expérimentaux (en bleu) et log loi normale (en rouge) 43

Figure 18 : (a) scalogramme des fluctuations piézométriques et (b) scalogramme du signal de pluie 44

Figure 19 : Corrélation croisée entre le signal des fluctuations et le signal de pluie 45

PLANCHES

Planche 1: Irrigation "à la raie", schéma de principe d'alimentation de la nappe phréatique par l'irrigation gravitaire, bilan des flux d'eau de l'irrigation gravitaire 10

Planche 2 : Sonde DIVER®, sonde BARO-DIVER®, dimensions d'une DIVER®, programmation des sondes et interface optique, suspension des sondes par un câble en acier 16

Planche 3 : Station météorologique de Montfavet, photographie du pluviomètre à auget, schéma de principe du pluviomètre à auget 19

Planche 4 : (a) signal piézométrique hebdomadaire, (b) signal piézométrique continu (au pas de temps 15 mn) et (c) chronique de pluie horaire 33

Planche 5 : (a) signal piézométrique, (b) spectre de Fourier et (c) filtrage par transformée de Fourier 39

Planche 6 : (d) inversion de la transformée de Fourier, (e) test de phase et (f) test de cohérence du filtrage 41

ANNEXES

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des observations lithologiques et des équipements de forage ii

Annexe 2 : Coupe lithologique du piézomètre PZ1L iii

Annexe 3 : Caractéristiques techniques des mesures de pression par sonde DIVER® iv

Annexe 4 : Présentation de Matlab v

Annexe 5 : Interpolation des signaux PZ1C et PZ2L vi

Annexe 6 : Filtrage par transformée de Fourier – spectres bruts et spectres filtrés de PZ1C et PZ2L vii

Annexe 7 : Filtrage par transformée de Fourier - Séries temporelles de PZ1C, PZ2L et PZ3C viii

Annexe 8 : Histogramme de PZ1C et représentation logarithmique de sa distribution de probabilité ix

Annexe 9 : Histogramme de PZ2L et représentation logarithmique de sa distribution de probabilité x

Annexe 10 : Scalogramme de PZ1C et corrélation croisée avec le signal pluviométrique xi

Annexe 11 : Scalogramme de PZ2L et corrélation croisée avec le signal pluviométrique xii

Préambule

Le climat méditerranéen se rencontre sur les façades occidentales des continents, entre 30 et 45 degrés de latitude. Les précipitations sont très irrégulières, avec un automne plutôt humide et doux. Les étés sont chauds et arides. Dans le Sud-est de la France, une grande partie des zones alluviales est soumise à des pluies orageuses. Ces précipitations intenses combinées à la présence de sols qui fissurent et de nappes souterraines peu profondes entraînent un risque de pollution des nappes par écoulements convectifs rapides. Afin de mieux comprendre ces phénomènes de transfert, un site expérimental a été mis en place en 2002 par l'INRA avec l'aide de la région Provence Alpes Côte d'Azur. Ce site, uniquement dédié à cette problématique, est une parcelle agricole quadrillée par un réseau de piézomètres, équipée de trois postes de mesure de l'état hydrique du sol et munie d'un lysimètre à drainage.

Un projet à long terme intitulé "Flux d'infiltration, de recharge et hétérogénéité : une approche multi-échelles" s'appuie initialement sur ce site expérimental, nommé site atelier "Fontanille". La problématique scientifique soulevée est la compréhension des processus de transfert d'eau et de solutés pour une meilleure prédiction des transferts rapides sol – nappe. Plus généralement, l'enjeu de cette compréhension concerne le rôle des mécanismes physiques dans la maîtrise des impacts environnementaux des activités agricoles. Ce projet est géré par l'équipe TSH dont les objectifs consistent à caractériser les flux de la surface du sol vers la nappe, de les modéliser et de tester différentes méthodes d'estimation et de caractérisation de ces flux (méthodes directes ; traçage coloré, chimique et isotopique). Ces méthodes vont être appliquées à différentes échelles : de la colonne (200 cm² x 30 cm) à la région (plusieurs dizaines de km²) en passant par la parcelle (6400 m²).

Mon intervention au sein de cette équipe concerne une thématique qui démarre (01/03/2006) : Transferts sol – nappe à l'échelle de la parcelle (M. JOELSON, P. NEVEUX, L. DI PIETRO). Précédemment, sur la parcelle, une caractérisation hydrodynamique fine de la nappe a été menée (BOGNER, 2004) et une étude des caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux du sol et de la nappe est en cours. En parallèle, d'autres thématiques sont lancées à l'échelle de la région, de la placette (1 m²), de la colonne et bientôt sur le lysimètre (5 m² x 2 m).

L'objectif de ce stage est de caractériser les transferts d'eau dans la zone non saturée (ZNS) par l'étude de l'évolution piézométrique suivant l'intensité des évènements pluvieux. Le travail proposé consiste en une analyse des données de niveau de nappe et de hauteur de pluie à l'aide de techniques de traitement du signal : en particulier, l'utilisation de la transformation en ondelettes. Un des objectifs principal de ce travail sera de répondre à la question sur le mode de diffusion "anormale" de l'eau de pluie vers la nappe. Les données proviennent d'une expérimentation menée sur le site atelier "Fontanille". Nous disposons de plus d'une année d'enregistrement du niveau piézométrique. L'exploitation numérique des données est réalisée grâce à MATLAB®, un logiciel de calcul et de représentation graphique. L'approche utilisée dans cette étude revêt un caractère nouveau pour l'équipe à l'échelle d'une parcelle. En effet, l'analyse combinée du niveau piézométrique et de la pluviométrie n'a pas encore été étudiée par de telles techniques. En outre, la démarche présentée ici se veut adaptable à des contextes pédoclimatiques différents.

Ce projet fait appel à des compétences en Hydrogéologie, en Traitement du signal et en Programmation numérique. Cependant, de part mon cursus tourné vers l'Hydrogéologie, j'ai principalement développé des aptitudes dans les deux derniers domaines cités au cours de ce stage.

Tout d'abord, ce mémoire présente le contexte géographique, géologique, hydrogéologique et climatique du secteur d'étude. Ensuite, après une présentation du site atelier "Fontanille" et de son instrumentation, les outils d'analyse des données sont abordés. Puis ces outils sont transposés à l'étude des transferts sol – nappe. En conclusion, je rappelle les principales observations retenues et introduit les perspectives que nous laissent entrevoir ces premiers résultats.

Présentation de l'INRA

Créé en 1946, l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) figure aujourd'hui parmi les trois premiers organismes de recherche agronomique au niveau mondial et il est le premier en Europe, par ses productions scientifiques en sciences de la vie et de l'environnement tout particulièrement. Organisme public, il est placé sous la tutelle des ministères en charge de l'Agriculture et de la Recherche. Le champ d'investigation de l'INRA s'articule autour de trois domaines en forte interaction que sont l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. En perspective des recherches agronomiques : le développement durable. Cette approche nécessite de considérer à la fois le présent et le futur, le développement local et celui de la planète. Les recherches menées à l'INRA intègrent désormais les préoccupations complexes qui sont au fondement d'un développement durable : l'écologie, la gestion et la préservation des ressources naturelles et de la biodiversité, la viabilité et le bien-être social,...

Quelques chiffres :

- 21 centres régionaux et plus de 150 sites en France métropolitaine et Outre-mer;
- l'INRA participe à 129 projets financés dans le 6ème programme cadre européen de recherche et de développement, dont 21 projets coordonnés par l'INRA (2005).

L'INRA est structuré en départements de recherche, construits sur la base des disciplines scientifiques nécessaires pour couvrir tous les besoins de recherche de l'agriculture. Cette structure se retrouve sur le centre d'Avignon par l'existence des "unités", qui sont sous la tutelle d'un ou plusieurs de ces départements. Elles sont organisées ou non en équipes.

L'unité Climat, Sol et Environnement (CSE) dépend du département Environnement et Agronomie, oeuvrant pour la connaissance et la maîtrise des impacts environnementaux des activités agricoles. L'équipe Transferts de masse en Sol Hétérogènes appartient à l'unité CSE et mène des travaux qui ont pour but la compréhension et la modélisation des processus de transfert d'eau et de solutés dans les sols afin de mieux prévoir la recharge de la nappe (quantité, qualité).

1
Présentation générale

La géologie du site est caractéristique d'une plaine alluviale, d'une dizaine de mètres d'épaisseur avec un substratum marneux. En surface, on trouve un sol argilo-limoneux qui fissure facilement sous les effets de la sécheresse, de façon à former des fentes de dessiccation. La nappe sous-jacente est appelée nappe alluviale de la basse Durance. Cette nappe phréatique, peu épaisse et très transmissive, est fortement influencée par la pratique de l'irrigation gravitaire. Quant au climat, de type méditerranéen, il entraîne une pluviométrie très irrégulière. Dans ce contexte favorable à l'étude des transferts rapides sol – nappe, l'équipe TSH a doté le site atelier "Fontanille" de nombreux instruments de mesures hydriques.

1.1 Contextes géographique et géologique

Le secteur d'étude se situe dans le Sud-Est de la France, en rive droite de la Durance (figure 1). Il correspond à la zone de confluence des nappes d'accompagnement du Rhône et de la basse Durance. Le terrain est plat dans son ensemble. Les altitudes extrêmes du secteur varient entre 16 m au confluent et 40 m au Nord au site expérimental (colline de calcaires blancs).

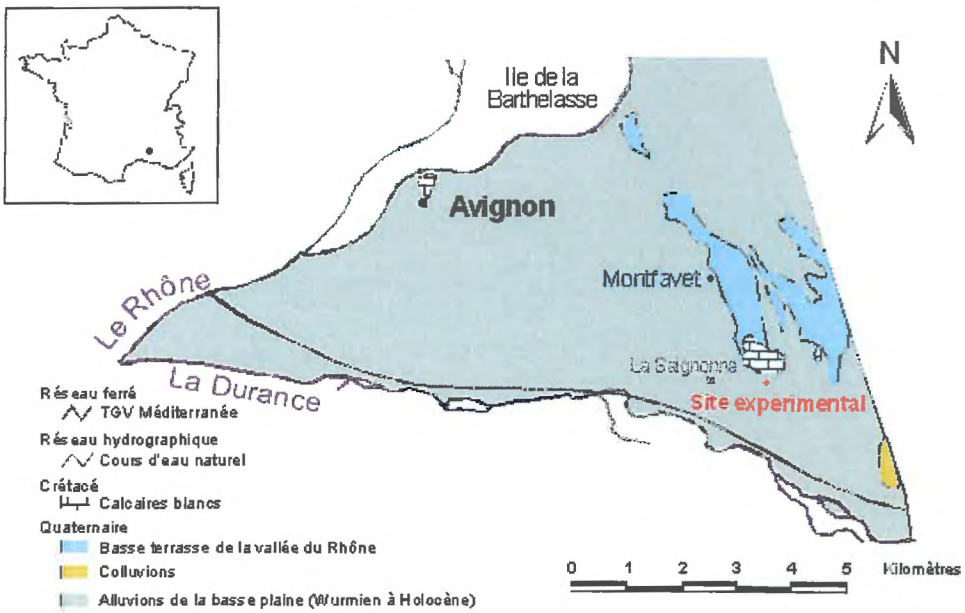


Figure 1 : Situation géographique et géologique du site expérimental

Il s'agit d'une plaine alluviale quaternaire sur laquelle on trouve quelques collines du Crétacé ainsi que des résidus de la basse terrasse de la vallée du Rhône.

L'épaisseur des alluvions de la Durance a une puissance de 8 à 12 m ; elles reposent sur un substratum imperméable constitué par des marnes. La coupe type représente de bas en haut :

- un substratum étanche constitué par des marnes bleues,
- 6 à 8 m de graves sableuses grise beige,
- 2 à 4 m de couverture argilo-limoneuse à cailloutis.

Source : MONJUVENT, 1991 ; CIRON, 1992 ; DI PIETRO, 2004.

On retrouve globalement cette coupe type sur le site atelier "Fontanille". En surface, le sol est un calcosol d'origine alluvial sur alluvions grossières, argilo-limoneux en surface (teneur en argile estimée supérieure à 32 – 34 %). En période sèche, il a tendance à se fissurer jusqu'à former des fentes de dessiccation (figure 2). Celles-ci modifient considérablement la perméabilité du sol.

Figure 2 : Fentes de dessiccation (observées sur le site le 12/07/2006)

La parcelle expérimentale, située à 7 kms au sud d'Avignon sur la commune de Montfavet (département du Vaucluse), surplombe la nappe alluviale de la basse Durance.

1.2 Nappe alluviale de la basse Durance

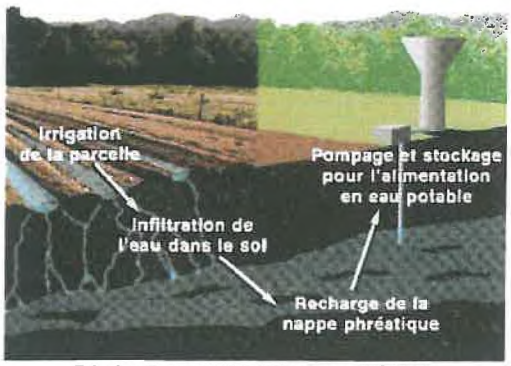
L'aquifère est constitué par les alluvions récentes de la plaine quaternaire, principalement des graves sableuses. On est en présence d'une nappe libre, alimentée par la Durance, qui oscille entre 4 et 6 m de hauteur. Ces quatre dernières années, on a observé une zone de battement moyenne de la nappe d'environ 2 m, entre 3,5 et 5,5 m de profondeur. Son eau appartient au faciès bicarbonaté calcique plus ou moins magnésien. Au niveau du site expérimental, l'écoulement local suit l'écoulement général de la nappe, du SE vers le NO, avec un gradient hydraulique qui varie entre 1,4 ‰ et 3 ‰. Cette dernière présente un caractère fortement transmissif ; les valeurs de transmissivité varient entre 1.10^{-2} m²/s et 2.10^{-2} m²/s et le coefficient d'emmagasinement entre 0,001 et 0,24. Ces valeurs ont été obtenues à partir de 14 essais d'injection réalisés sur le site en avril 2004 (BOGNER, 2004).

Le niveau d'étiage de la nappe est largement amélioré par l'utilisation d'un réseau d'irrigation assez dense. Le Vaucluse est sillonné d'un important maillage de canaux alimentés en grande partie par la Durance. Ils couvrent près du tiers de la superficie agricole du département, soit 40 000 ha irrigables. Les canaux influent considérablement sur l'évolution piézométrique générale de la nappe d'accompagnement de la Durance. Nous verrons plus tard qu'ils provoquent même, au moins au niveau de notre site, une inversion de son cycle hydrogéologique naturel (cf. § 3.1.1 Relevés piézométriques).

Une méthode d'irrigation particulière en Provence : l'irrigation gravitaire (**planche 1**)

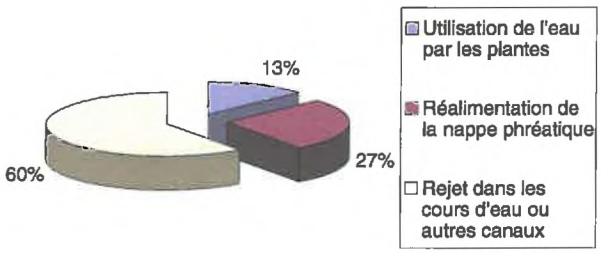
L'irrigation gravitaire consiste à amener l'eau à la parcelle par un réseau de canaux. L'agriculteur irrigue par submersion totale de la parcelle ou "à la raie", c'est-à-dire en faisant s'écouler l'eau dans des rigoles tracées à cet effet. Les irrigations gravitaires permettent de réalimenter la nappe alluviale. Sur les 15 millions de mètres cube pénétrant dans le sol, près de 5 millions ne sont pas utilisés par les plantes et contribuent donc à l'alimentation de la nappe. En outre, les eaux d'irrigation agissent également de façon qualitative sur la nappe alluviale en diluant les pollutions éventuelles (faibles taux de nitrates).

Source : Chambre d'Agriculture du Vaucluse.



Principe d'alimentation de la nappe phréatique par l'irrigation gravitaire

Les surplus d'eau de l'irrigation gravitaire



Source : Etude de flux - Canal de Saint Julien - 2000

Planche 1: Irrigation "à la raie", schéma de principe d'alimentation de la nappe phréatique par l'irrigation gravitaire, bilan des flux d'eau de l'irrigation gravitaire

L'INRA d'Avignon est traversé par un canal alimenté de début mars à début septembre. Il n'existe pas de date précise pour la mise en eau des canaux. La prise d'eau se fait sur la Durance au niveau du barrage EDF de Bonpas, à vocation uniquement agricole. Cette année, la mise en eau a été effectuée autour du 7 mars 2006.

Outre les apports de l'irrigation gravitaire, le climat joue un rôle prépondérant pour la recharge de la nappe en intervenant sur la structure et la capacité de transfert des sols mais aussi sur l'intensité, la durée et la fréquence des apports. L'impact des pluies est d'autant plus important pour la recharge de la nappe en automne, car l'hiver est généralement une saison sèche en Méditerranée et les canaux sont alors en période dite de "chômage".

1.3 Climatologie

Le climat vauclusien est de type méditerranéen, caractérisé par une sécheresse estivale, une forte luminosité et une pluviométrie très irrégulière.

La plaine alluviale d'Avignon dispose d'un fort ensoleillement avec 2800 heures par an, juillet comptant à lui seul plus de 350 heures. La pluviométrie est comprise entre 650 et 700 mm répartie sur 80 à 100 jours de pluie, principalement en avril – mai et septembre – octobre.

Les jours de pluie sont rares, mais lorsqu'il pleut, les précipitations sont souvent intenses et sous forme d'orages violents. Les températures moyennes sont comprises entre 5°C en janvier et 25°C en juillet ; les étés sont très chauds avec des pointes atteignant souvent 35°C en juillet et août alors que les hivers sont relativement froids, avec 35 à 70 jours de gelée, le plus souvent de novembre à avril. La rose des vents est fortement influencée par les vents de Nord (Mistral et Tramontane), qui soufflent près de 120 jours par an. Ils contribuent à accroître l'évapotranspiration déjà importante.

Source : Unité expérimentale AGROCLIM (INRA).

Dans notre cas, les données d'évapotranspiration ne seront pas exploitées car on souhaite mettre en évidence les transferts d'eau rapides. Ces transferts correspondent à une infiltration préférentielle, donc hétérogène, alors que le calcul de l'évapotranspiration fait l'hypothèse d'une surface au sol homogène. Sur le site atelier "Fontanille", cette forme d'infiltration est favorisée par la présence de fentes de dessiccation combinées à des précipitations intenses. La proximité de la nappe et la faiblesse du recouvrement végétal limitent également l'influence de l'évapotranspiration. La parcelle est restée couverte de petites plantes fourragères (*Veisce*) pendant toute la phase de collecte des données, sans irrigation. Puis à partir de juin, des graines de Sorgho ont été semées.

L'addition de sols argileux qui fissurent et d'évènements pluvieux souvent intenses, tout ceci en surplomb d'une nappe libre peu profonde, créent un contexte favorable pour la réalisation d'un site d'études sur les transferts rapides sol – nappe.

1.4 Présentation du site d'études et instrumentation

Le site atelier "Fontanille" est un site expérimental visant à une meilleure prédiction de la pollution des nappes souterraines à l'échelle de la parcelle.

Ce site dit atelier, car destiné à la communauté scientifique, a une superficie de 0,64 ha. Avec une altitude moyenne aux environs de 31 m NGF, la parcelle présente une très légère pente, constante, avec un point haut au SE et un point bas au NO (figure 3). Cependant, à l'heure actuelle, aucun ruissellement n'a été constaté depuis la création du site.

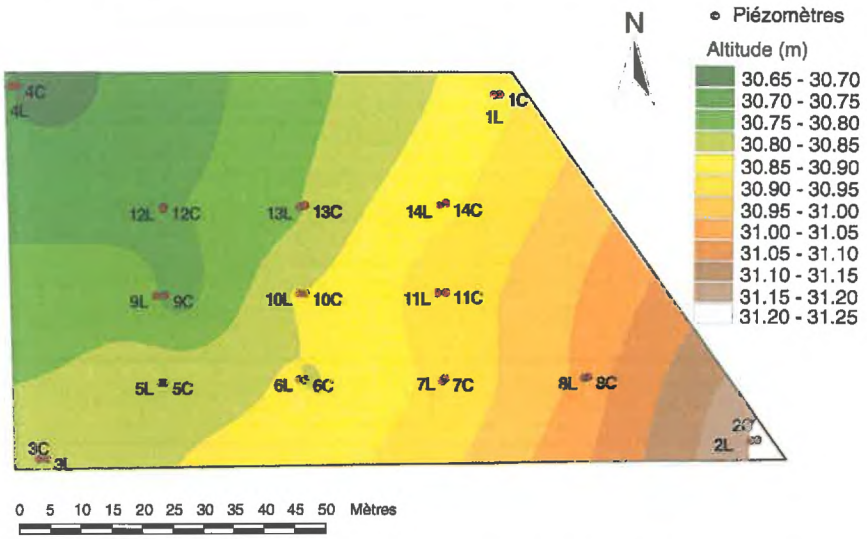


Figure 3 : Modèle Numérique de Terrain (MNT) du site atelier "Fontanille"

En bordure Est, un canal d'irrigation nommé "Canal de l'hôpital" ou "La Durançole" est présent. Pour limiter les apports latéraux venant de l'extérieur de la parcelle, une géomembrane entoure le site, et ce, jusqu'à 2 m de profondeur.

Du point de vue instrumental, la parcelle est bien pourvue en divers équipements de mesures hydriques (figure 4). Les membres de l'équipe TSH sont régulièrement amenés à réaliser des expérimentations sur ce site. Pour cela, le site atelier est équipé de 28 piézomètres et 3 sites de mesure – A, B et C – regroupant chacun 6 capteurs tensiométriques à mercure et un tube d'accès de sonde à neutrons. Sur les sites A et C, une série de 5 bougies poreuses est également installée à différentes profondeurs (0,15 m; 0,25 m; 0,5 m; 1 m et 2 m).

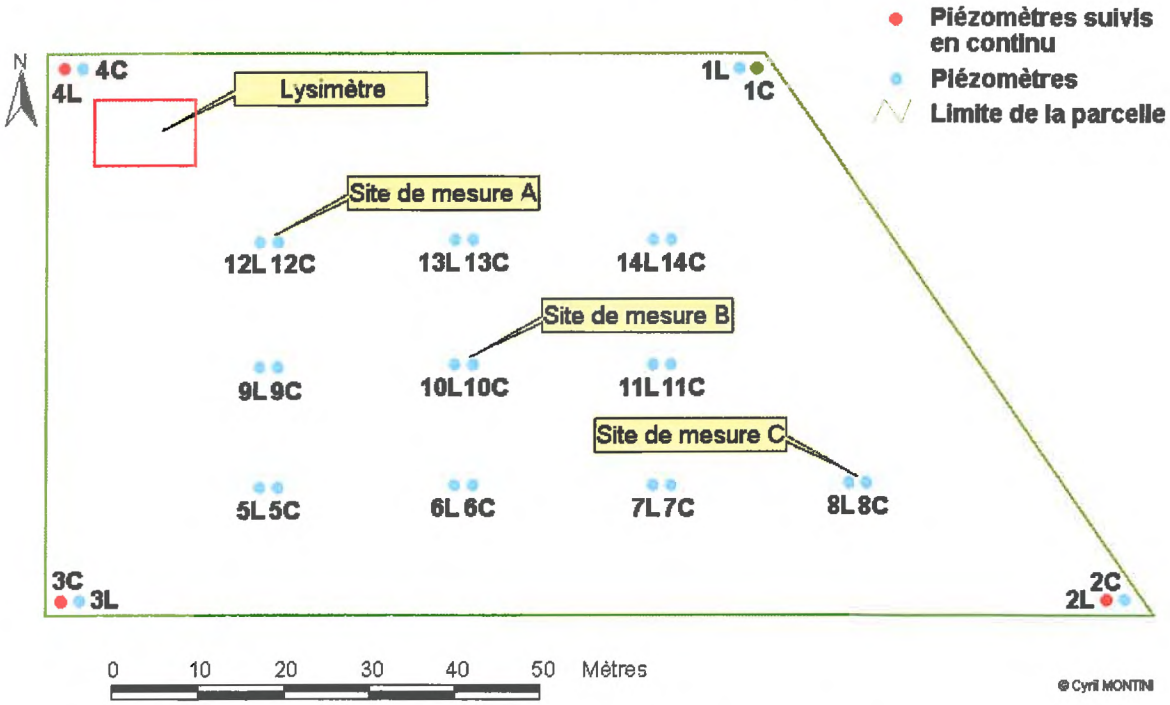


Figure 4 : Schéma de l'instrumentation du site atelier "Fontanille"

Le lysimètre à drainage est installé en limite Nord-Ouest de la parcelle. Il constitue l'outil de caractérisation des transferts à l'échelle immédiatement inférieure à celle du site atelier.

1.4.1 Lysimètre à drainage

Ce lysimètre, mis en place en juin 2002, permet la caractérisation hydrodynamique des transferts sol – nappe par simulation de pluie et analyse des hydrogrammes de drainage. Il a pour but de reproduire, à échelle réduite, le comportement hydrodynamique de la parcelle. Pour cela, son exploitation est calquée sur le modèle de la parcelle.

Son mode de construction est original. Il a été réalisé in situ par excavation des terrains pour délimiter un monolithe de sol. A la base du bloc, une palplanche de PVC a été introduite et assure l'étanchéité du système (figure 5).

Figure 5 : Photographie du lysimètre en cours de réalisation et actuel

Ce lysimètre a donc été réalisé sans modifier la structure du sol, il est immédiatement opérationnel alors qu'un lysimètre traditionnel demande habituellement une dizaine d'années pour se restructurer. Une première étude (BOGNER, 2003) a conclu à la nécessité de mettre en place un simulateur de pluie pour obtenir une pluie homogène sur le lysimètre. Actuellement (juillet 2006), l'optimisation du lysimètre est en cours de validation (simulateur de pluie, débimètre à auger).

Le présent travail constitue l'étape suivante de l'étude menée en 2003, qui concluait à l'apparition d'écoulements préférentiels dans le lysimètre d'après l'observation de flux hétérogènes en ZNS.

A l'échelle de la parcelle, ce sont les piézomètres qui vont nous permettre d'atteindre la nappe afin de suivre l'évolution de son niveau.

1.4.2 Piézomètres

Les piézomètres ont été mis en place par le bureau d'études "Hydro-géotechnique Sud-Est" en décembre 2001 (PZ1C à PZ4L) et octobre 2002 (PZ5C à PZ14L). Ces forages, réalisés par la méthode du "marteau fond de trou", sont équipés en piézomètres PVC Ø 64/75 mm avec au droit :

- de la partie crépinée, la mise en place de gravette 2/4 mm;
- de la partie pleine, la réalisation d'un bouchon étanche de sobranite, fermeture du forage par un coulis de ciment et un tube de protection métallique.

Après réalisation, les piézomètres ont été nettoyés par AIR-LIFT.

Des coupes lithologiques ont été réalisées pour l'ensemble des piézomètres à partir de cuttings (HYDRO-GEOTECHNIQUE SUD-EST, 2002a et 2002b), elles ne donnent donc qu'une représentation indicative de la lithologie. Le tableau récapitulatif des observations lithologiques et des équipements des forages ainsi qu'un exemple de coupe pour le sondage PZ1 long sont présentés en **annexe 1 et 2**. Ces observations permettent d'obtenir la coupe géologique en travers suivante :

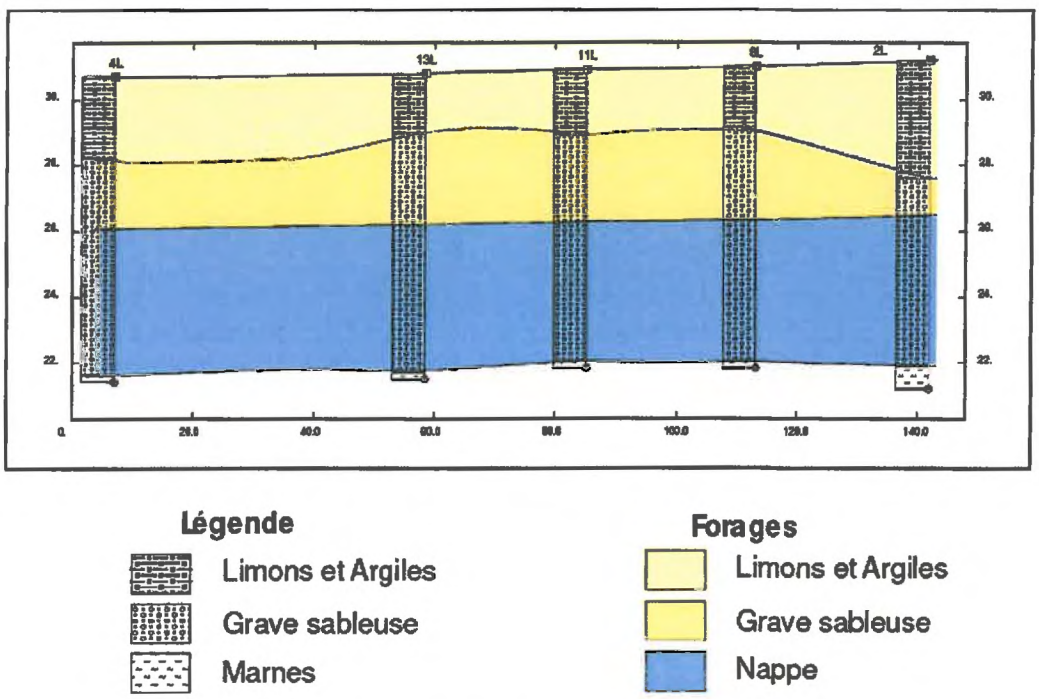


Figure 6 : Coupe géologique en travers du site atelier "Fontanille"

Les piézomètres sont regroupés deux à deux. Ceux portant l'indice "L" pour "long" sont des piézomètres complets, qui atteignent les marnes bleues autour de 9 à 10 m de profondeur. Chacun de ces piézomètres est couplé à un autre portant l'indice "C" pour "court" d'une profondeur de 6 à 7 m, donc incomplet, mais qui pénètre tout de même dans la nappe.

Ces derniers ont pour fonction de permettre le prélèvement de solution en surface de nappe, sans mélange avec des eaux plus profondes, souvent peu représentatives des transferts en ZNS.

Dans notre étude, seules les données issues des piézomètres implantés aux coins de la parcelle seront exploitées car ce sont les plus renseignés, notamment grâce à un suivi en continu assuré par des sondes piézométriques autonomes.

1.4.3 Sondes piézométriques

Des sondes piézométriques de type DIVER®, de marque Schlumberger Water Services, mesurent et enregistrent de manière autonome et continue le niveau et la température de la nappe phréatique (**planche 2**).

Ces sondes sont des capteurs de pression compensés en température (entre – 20 °C et + 80 °C). Trois sondes de ce type sont installées sur notre site atelier aux coins de la parcelle (cf. figure 4) et réglées au pas de temps 15 mn. La mémoire interne de 24000 mesures par paramètre offre une capacité suffisante pour effectuer une mesure toutes les 15 mn durant 8 mois. La date et l'heure, le niveau et la température sont déterminés à chaque mesure. La pile intégrée présente une durée de vie d'environ dix ans. Mais le choix s'est surtout porté sur leurs dimensions, compactes (diamètre de 22 mm et longueur de 125 mm), grâce auxquelles la sonde DIVER® peut être utilisée aisément dans nos piézomètres.

La sonde DIVER® mesure le niveau de la nappe grâce à un capteur de grande précision. Le poids de la colonne d'eau au-dessus de la sonde est le facteur déterminant cette pression. Cependant, les variations de la pression atmosphérique influent aussi sur la mesure. Ainsi, on utilisera une sonde BARO-DIVER® pour prendre en compte et enregistrer ces variations dans un des piézomètres suivi en continu. Ici, une seule sonde barométrique suffit pour toutes les DIVER® car on suppose les variations de pression atmosphérique stables à l'échelle locale, qui plus est sans variation d'altitude.

En complément de la mesure de niveau et de température de la nappe, une sonde CTD-DIVER® permet le suivi de la conductivité électrique de celle-ci. Cette sonde est installée dans le quatrième coin de la parcelle. Nous n'exploiterons pas ces relevés car ils présentent des "trous" trop importants (dus à un oubli de récupération des données).

Chaque sonde est installée dans un piézomètre, suspendue par un câble en acier. Une fois extraite du piézomètre, la programmation et la récupération des données sont réalisées au moyen d'une interface optique de communication et d'un ordinateur portable via le logiciel de communication fourni : "Logger Data Manager".

Planche 2 : Sonde DIVER®, sonde BARO-DIVER®, dimensions d'une DIVER®, programmation des sondes et interface optique, suspension des sondes par un câble en acier

Précision de la mesure :

La précision de la mesure est un facteur déterminant pour l'exploitation des résultats futurs. Un manuel d'utilisation a été livré avec le matériel dans lequel des informations techniques sont mentionnées pour chaque type de DIVER®. Il existe 5 genres de DIVER® correspondant à 5 gammes de hauteur d'eau ; celles de l'INRA sont les plus précises, valables pour des mesures de faible profondeur et jusqu'à 4 mètres (référence des sondes : DI240).

Les données du constructeur sont présentées en **annexe 3**.

Outre les outils de caractérisation des transferts en ZNS, de nombreux matériels présents sur le site sont essentiellement destinés à l'étude du sol. L'équipe TSH étudie l'état hydrique et effectue des prélèvements de solution du sol sur le site atelier "Fontanille". Les mesures de teneur en eau et les analyses chimiques ou isotopiques sont des approches complémentaires à nos observations.

1.4.4 Prélèvements d'eau et mesures de l'état hydrique du sol

Les principaux outils de prélèvement d'eau et de mesure de l'état hydrique du sol, regroupés sur les 3 sites de mesures du site atelier "Fontanille", sont :

- les bougies poreuses : elles servent au prélèvement de la solution du sol à différentes profondeurs pour analyses en laboratoire;
- les tensiomètres : ils servent à mesurer le potentiel hydrique du sol. Dans la pratique, l'équipe utilise la lecture directe sur des tubes de mercure gradués en mbar;
- la sonde à neutrons : elle sert à mesurer l'humidité volumique d'un sol. Les mesures sont faites tous les 10 à 20 cm en descendant la source à l'intérieur d'un tube.

Les résultats obtenus par les tensiomètres servent au suivi à long terme de l'état hydrique du sol mais ne sont pas exploités à l'heure actuelle. Quant à la sonde à neutrons, elle n'est utilisée que ponctuellement.

Seules les bougies poreuses nous intéressent ici car elles servent à la réalisation d'une étude dans le cadre d'un stage de Master 2, effectuée par Emilie GAREL, avec pour sujet : "Caractérisation chimique et isotopique des eaux du sol et de la nappe de la Durance à Avignon". Les prélèvements (piézomètres et bougies poreuses) ont lieu sur les sites A et C de la parcelle expérimentale depuis le 19 janvier 2004. La fréquence d'échantillonnage est bimensuelle et les échantillons sont ensuite envoyés pour analyse au Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (LHA). Le but est de caractériser des variations chimiques selon la profondeur et suite à un évènement pluvieux ou une irrigation. In fine, l'objectif est de mettre en évidence des écoulements préférentiels du sol vers la nappe et de quantifier des flux verticaux / latéraux. Par la suite, les résultats obtenus pourraient être mis en relation avec ceux de la présente étude.

A proximité du site, en appui aux expériences menées in situ, les données climatiques sont recueillies par une station agrométéorologique. Cette station a comme particularité de mesurer à la fois les paramètres climatiques extérieurs mais également certains paramètres pédoclimatiques.

1.4.5 Station agrométéorologique

Les données pluviométriques nécessaires à notre étude ont été acquises par la station agrométéorologique de Montfavet (n°87007004), gérée par l'unité expérimentale AGROCLIM.

1.4.5.1 Présentation d'AGROCLIM :

Objectifs généraux :

La mission d'AGROCLIM, de portée nationale, concerne principalement la gestion du réseau agrométéorologique de l'INRA. Elle comprend une activité d'acquisition des mesures, puis de mise en forme dans une base de données permettant leur mise à disposition pour le personnel de l'INRA. Cette mission amène AGROCLIM à servir d'interface avec les organismes qui acquièrent des données climatiques (en particulier Météo France) et les structures d'agrométéorologie. Elle a été récemment étendue aux études sur le changement climatique.

Les mesures climatiques :

Le réseau est composé d'environ 80 stations automatiques, pour la plupart situées dans les centres de recherche et les domaines expérimentaux de l'Institut. Les mesures réalisées concernent : la température et l'humidité relative de l'air sous abri, la température dans le sol et en indice actinothermique ; le vent (vitesse et direction) ; le rayonnement solaire et la pluviomètrie.

La base de données climatiques :

Les stations alimentent quotidiennement et de façon automatique la Base de Données Agroclimatiques dont AGROCLIM assure la gestion. Les utilisateurs ont accès aux données contrôlées, validées et éventuellement corrigées à échéance J+1. De plus, depuis 2001, AGROCLIM récupère quotidiennement les données d'une quarantaine de stations issues du réseau Météo France qui sont stockées dans une seconde Base de Données. Au total, AGROCLIM met chaque jour à disposition des scientifiques de l'INRA les données du jour précédent d'environ 130 stations météorologiques. Les durées d'observation moyennes sont de plus de 20 ans par station.

Toutes les stations météorologiques AGROCLIM mesurent la pluviométrie à l'aide d'un dispositif normalisé (également utilisé par Météo France) et régulièrement étalonné : le pluviomètre à auget.

1.4.5.2 Pluviomètre à auget

La station météorologique de Montfavet est équipée d'un pluviomètre à auget basculeur et située à une centaine de mètres du site atelier "Fontanille" (**planche 3**).

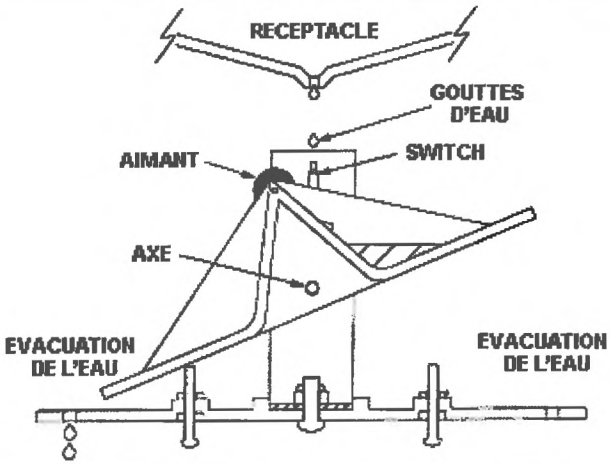


Planche 3 : Station météorologique de Montfavet, photographie du pluviomètre à auget, schéma de principe du pluviomètre à auget

Le mécanisme de ce type de pluviomètre permet d'obtenir des mesures de grande précision à la fois pour des pluies de faible intensité mais aussi pour des évènements pluvieux prononcés. La pluie tombe dans un réceptacle (Ø 23 cm) puis s'écoule dans un des deux compartiments de l'auget basculeur. Lorsque l'eau de l'un des compartiments atteint 0,5 mm (soit 20 g d'eau), l'auget bascule et le deuxième compartiment se met en place sous le réceptacle. Chaque inclinaison de l'auget est enregistrée. La résolution du pluviomètre à auget est donc de 0,5 mm. Une fois que les données sont consignées, l'eau se déverse dans la partie inférieure de l'auget et elle est évacuée.

Maintenant que le cadre général de l'étude est défini, nous allons aborder un chapitre introductif sur les outils d'analyse des données.

2

Outils d'analyse des données

La présentation des outils d'analyse fait appel à des notions élémentaires de physique statistique, rappelées dans le premier paragraphe. Puis on abordera l'analyse de Fourier, sa transposition pour le calcul numérique et ses limites. Au travers d'exemples, on parlera ensuite de l'intérêt des ondelettes pour l'analyse de nos données.

2.1 Outils statistiques d'analyse des données

La "statistique" est une science qui, à partir de l'observation de phénomènes de masse, permet d'obtenir des informations fiables. Cette science utilise principalement des méthodes mathématiques.

La "statistique" désigne également les résultats obtenus en appliquant ces méthodes scientifiques à des observations. Ces résultats sont l'information statistique. Ils peuvent porter sur tous les domaines de la vie : médecine, technique, société, économie... Ces résultats apportent des connaissances sur les comportements "moyennés" de chaque élément constituant la masse à étudier. Dans ce travail, nous allons nous servir de cette approche statistique pour mettre en avant certaines propriétés contenues dans les données d'observation.

2.1.1 Notion de variable aléatoire

La notion de variable aléatoire est à la base de notre démarche statistique. Une variable aléatoire est une grandeur mathématique désignant les résultats possibles d'une expérience aléatoire, en fonction de la probabilité d'apparition de cette dernière (DAGNELIE, 1973). D'une manière générale, on distingue deux types de variables aléatoires (discrètes et continues) mais on s'intéresse ici uniquement aux variables aléatoires continues car elles permettent de représenter les tirages aléatoires à valeurs réelles (qui correspondent à nos données d'observation).

Dans notre modèle, l'expérience aléatoire concerne la mesure de la hauteur de nappe en un point donné. Chaque donnée d'observation peut donc être assimilée au résultat d'un tirage aléatoire. Si on note *X* la variable aléatoire associée à cette expérience et *x* la valeur du résultat d'un tirage, compte tenu du caractère aléatoire de notre expérience, il devient important de pouvoir connaître la probabilité pour qu'un tirage quelconque donne la valeur *x* soit :

$\text{Proba}\,(X = x)$ ou probabilité pour que la variable *X* soit égale à la valeur *x*.

Ainsi à chaque valeur *x* que peut prendre la variable aléatoire *X* correspond une probabilité *P(x)*. L'ensemble des valeurs *x* et des probabilités *P(x)* forme une distribution de probabilité de la variable *X*. L'obtention d'une forme approchée de cette distribution de probabilité à partir de nos données constitue l'objectif de cette analyse statistique. A partir de la définition donnée plus haut, on montre que :

$$\text{Proba}\,(X = x) = P(x)$$

$$\text{Proba}\,(X \geq x) = \int_x^{+\infty} P(x)\,dx \qquad \text{et} \qquad \int_{-\infty}^{+\infty} P(x)\,dx = 1$$

où *P(x)* désigne la distribution de probabilité (ou loi de probabilité) de *X*.

La connaissance de la loi de probabilité d'une variable aléatoire permet d'accéder à l'ensemble des grandeurs statistiques associées. En particulier, l'espérance *E(X)* et l'écart type σ qui correspondent respectivement à la moyenne de l'ensemble des valeurs prises par la variable aléatoire et à la mesure de l'écart statistique de cette variable aléatoire autour de son espérance :

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\,P(x)\,dx \qquad \text{et} \qquad \sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(x))^2 . P(x)\,dx}$$

2.1.2 Loi de probabilité d'une variable aléatoire

Une loi de probabilité ou distribution, décrit les répartitions typiques des valeurs possibles du résultat d'un phénomène aléatoire. On associe ainsi une loi de probabilité à une variable aléatoire pour décrire la probabilité des valeurs qu'elle peut prendre. Il existe diverses formules de probabilité pour représenter un phénomène aléatoire quelconque. Dans le domaine de la Géophysique, la loi de probabilité dite normale possède une importance particulière.

On appelle loi normale centrée réduite (ou gaussienne), la loi définie par la densité de probabilité *P(x)* :

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

La représentation graphique de cette densité (figure 7) est une courbe en cloche, aussi appelée courbe de Gauss. Cette courbe traduit le fait que les résultats moyens (valeurs proches de la moyenne) sont les plus probables et qu'au-delà des 3σ la probabilité est presque nulle.

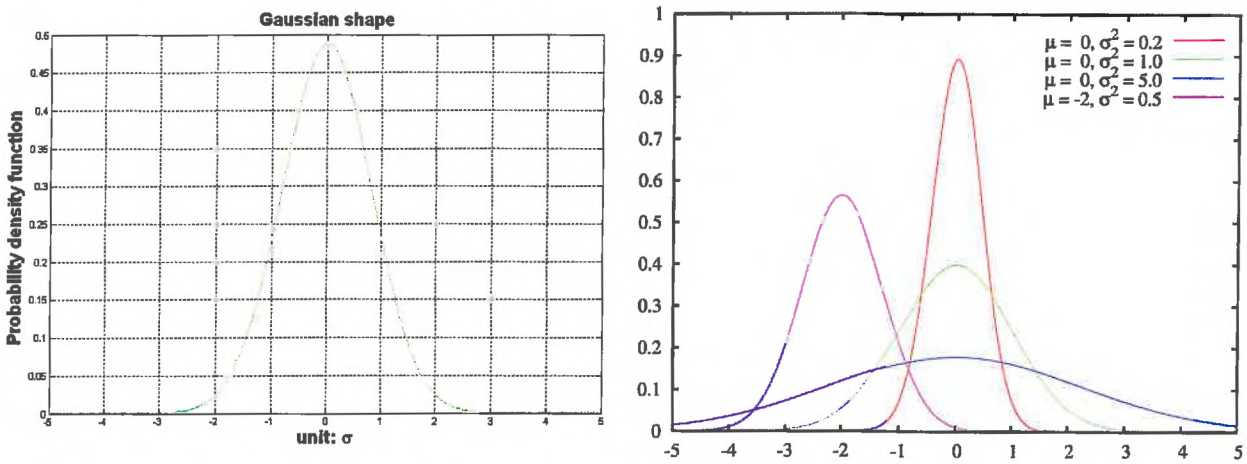


Figure 7 : Courbes de Gauss

La loi normale est paramétrée par son espérance et son écart type. Pour une loi normale de moyenne μ et d'écart type σ, sa densité de probabilité s'écrit :

$$P_{(\mu,\sigma)}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Le graphique de gauche montre la courbe de Gauss initiale en unité "σ" ; celle de droite illustre d'autres courbes de Gauss avec des écarts type σ variables (courbe bleue et courbe rouge) ou une moyenne μ non nulle (courbe rose).

Une des raisons principale de l'importance de la loi normale dans le phénomène de diffusion réside dans le fait que la concentration d'un soluté à travers un milieu donné obéit à la deuxième loi de Fick (ou équation de la diffusion), soit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

où *C* désigne la concentration du soluté en un point *x* à l'instant *t* dans le milieu considéré et *D* représente la propriété de diffusion du milieu (coefficient de diffusivité).

Il est intéressant de noter ici que si le milieu considéré est de nature aléatoire, on assimile souvent cette concentration à une loi de probabilité.

D'autre part, quelles que soient les conditions initiales associées à la loi de Fick, on peut montrer que la loi normale constitue une solution de cette équation :

$$C_{(x,t)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

Dans la nature, à l'intérieur d'un milieu poreux (comme dans le cas présent), certaines observations (BURNS, 1996 ; LEVY, 2003) rapportent l'existence d'un mode de diffusion qui ne suit pas la loi de Fick. Ce type de diffusion dite "anormale" se caractérise par une loi de probabilité "alpha-stable" dont la formulation mathématique, plus difficile, ne sera pas reprise ici.

Ainsi, dans cette partie du travail, nous allons essayer de représenter une approximation de la loi de probabilité de la variable aléatoire "hauteur de nappe" à partir de l'histogramme construit avec les données expérimentales. Une comparaison avec un modèle de loi normale sera effectuée afin de caractériser l'écart de notre loi de probabilité à la loi normale. Un tel écart constituera un indice éventuel de l'existence d'une diffusion "anormale" dans notre expérience.

2.1.3 Histogramme des valeurs issues d'une expérience

Afin de construire une loi de probabilité associée à nos données expérimentales, nous allons construire l'histogramme de ces données.

Un histogramme consiste à rassembler les données dans des classes de valeurs et à quantifier le nombre de valeurs expérimentales contenu dans chaque classe. La représentation classique d'un histogramme est un diagramme en bâton. Un ajustement du nombre de classes ("bins") à employer pour un meilleur compromis entre la qualité du diagramme et l'interprétation sera effectué. Une fois l'histogramme construit, nous obtenons une allure de la distribution de probabilité de notre variable "hauteur de nappe". Une loi expérimentale de probabilité peut alors être obtenue à partir de cet histogramme en appliquant la méthode des polygones de fréquences qui consiste en une courbe reliant les points au centre de chaque classe.

2.2 Outils d'analyse spectrale

En parallèle avec ce traitement statistique des données, une analyse spectrale sera effectuée. Une analyse spectrale est basée sur l'application de la transformée de Fourier à nos données sous forme de série temporelle. Une grandeur principale que nous allons construire à partir de la transformée de Fourier sera le spectre. Le spectre caractérise la distribution de l'énergie contenue dans un signal.

L'approche spectrale repose sur l'hypothèse que la série temporelle se compose d'oscillations élémentaires de fréquences différentes. La transformation de Fourier permet d'obtenir chaque oscillation sous forme de fonction sinus ou cosinus. Le spectre donne ainsi la distribution de l'énergie potentielle dans le signal à chaque fréquence d'oscillation élémentaire.

S'intéressant avant tout aux fluctuations de la nappe, nous utiliserons l'analyse spectrale pour traiter les données piézométriques initiales afin d'extraire de ces dernières les composantes d'oscillations correspondantes aux échelles des fluctuations dues à la pluie.

Avant d'aller plus loin, nous allons nous rappeler les bases de cette approche spectrale.

2.2.1 Analyse de Fourier

L'analyse de Fourier est un outil de traitement du signal couramment utilisé. Il permet de décomposer un signal en sinus et en cosinus (figure 8) qui correspondent chacun à une fréquence donnée. On peut ainsi analyser le contenu fréquentiel du signal.

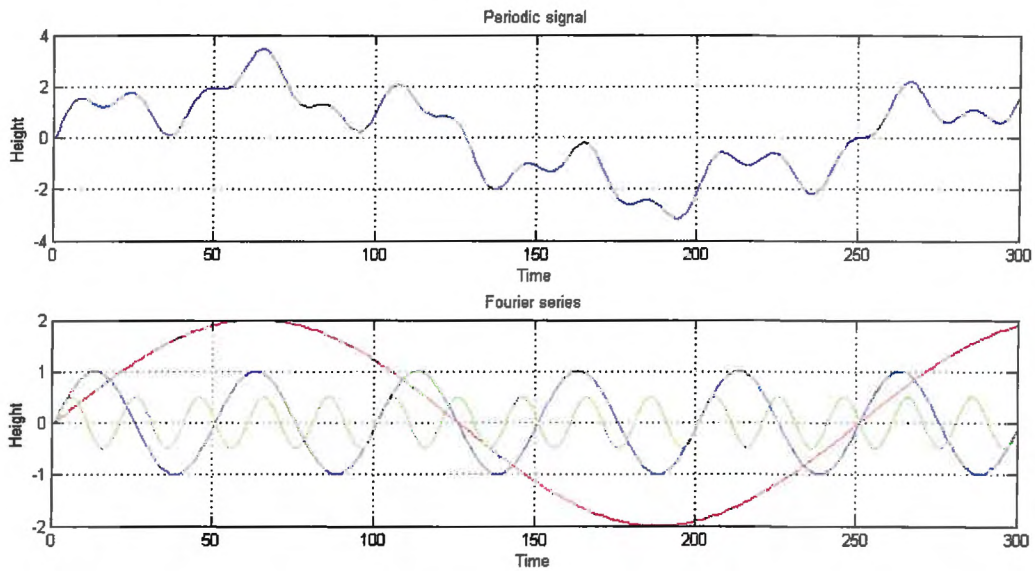


Figure 8 : Signal périodique et sa décomposition en séries de Fourier

Pour un signal non périodique, il est nécessaire de généraliser cette décomposition avec la transformée de Fourier.

2.2.1.1 Transformée de Fourier

Si le signal n'est pas périodique, il est possible de l'analyser de manière continue avec une transformée de Fourier (TF). Pour un signal $f(t)$, sa TF s'écrit :

$$\tilde{f}(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp 2i\pi.t.\nu \, dt$$

Dans cette formule, les variables temporelles "t" et fréquentielles "ν" sont conjuguées. La TF traduit une décomposition continue suivant les fréquences contenues dans le signal.

La TF permet de passer de l'espace physique (ici l'espace temporel) à l'espace de Fourier (espace des fréquences). D'une certaine façon, la TF consiste simplement à "peser" le poids relatif de chaque fréquence dans un signal donné. Compte tenu de ces propriétés mathématiques, il est possible de définir l'inverse d'une TF, notée :

$$\text{si} \quad \tilde{f}(\nu) = \text{TF}\, f(t) \quad \text{alors} \quad f(t) = \text{TF}^{-1}\, \tilde{f}(\nu)$$

$$\text{avec} \quad \text{TF}^{-1}\, \tilde{f}(\nu) = \frac{1}{2\pi} \int \tilde{f}(\nu) \exp 2i\pi.t.\nu \, d\nu$$

L'inversion de la transformée de Fourier (TF^{-1}) permet de reconstruire un signal temporel à partir de sa TF.

Variables conjuguées et exemples :

Grandeur	notation	unité	exemple
Variable	t	X	temps, en s
Variable conjuguée	ν	1/X	fréquence, en Hz

La définition de la transformation de Fourier, continue, se doit d'être amendée pour tenir compte du fait qu'un signal réel est échantillonné.

2.2.1.2 Analyse de Fourier discrète

L'analyse de Fourier discrète s'appuie sur un nombre fini de réalisations du signal, et donne un nombre fini de fréquences pour le décrire. Sa définition mathématique pour un signal f de N échantillons est la suivante :

$$\hat{f}(\nu) = \sum_{N=0}^{N-1} f(t_j) \exp 2i\pi\nu \frac{t_j}{N} \Delta t$$

Les logiciels de calcul tels que MATLAB® permettent le calcul numérique de la TF d'une fonction discrétisée sur un domaine donné à l'aide d'algorithmes rapides.

L'utilisation de techniques numériques pour effectuer un calcul de TF suppose que le nombre de données à traiter soit fini et que le nombre de fréquences pour lesquelles on calcule la TF soit aussi fini.

2.2.1.3 Analyse de Fourier rapide

L'analyse de Fourier rapide (acronyme anglais : Fast Fourier Transform ou FFT) est une forme spécifique de programmation de la transformation de Fourier. Son efficacité permet de réaliser des filtrages en passant dans le domaine transformé. L'usage d'une FFT implique :

- Une série comportant un nombre points N tel que $N = 2^n$ points, sinon le gain en temps est annulé, et la FFT peut devenir extrêmement lente si le nombre de points est premier, ou se factorise avec de grands facteurs premiers.
- Cette série se doit de plus d'être régularisée : la base de temps est supposée être une série arithmétique, de pas temporel fixe.
- La série de N valeurs conduit à un spectre de $N/2$ fréquences.

Dans notre travail, nous allons utiliser l'algorithme FFT de MATLAB®.

2.2.1.4 Spectre de Fourier

A partir de la TF, on définit le spectre de Fourier $sp(\nu)$ comme le carré de sa TF, selon la formule suivante :

$$sp(\nu) = \left|\tilde{f}(\nu)\right|^2$$

Pour conclure, la transformation de Fourier est un outil majeur pour le traitement du signal. Elle est incontournable dans l'analyse utilisant l'aspect fréquentiel d'un signal. En effet, une description fréquentielle est souvent plus "lisible" que la seule description temporelle, en particulier pour un signal de fluctuation.

Cette transformation permet de décrire la répartition des composantes fréquentielles du signal $f(t)$ mais ne nous renseigne pas sur les instants de l'apparition de celles-ci. Alors, les renseignements fréquentiels ainsi obtenus le sont au détriment de la description temporelle explicite du signal. Cette méthode ne convient donc pas à tous les types de signaux, notamment des signaux non stationnaires qui se caractérisent par l'apparition d'évènements transitoires.

Ni la description temporelle ni la description fréquentielle seule permette de décrire l'évolution temporelle du contenu spectral d'un signal. Une autre description est donc nécessaire, en combinant les deux : la représentation "temps – fréquence".

2.2.2 Analyse en ondelettes

La pluie est un phénomène transitoire. Il est donc normal de penser que la piézométrie, qui répond avec un retard plus ou moins important aux impulsions pluvieuses, le soit aussi. Comme nous l'avons dit plus haut, il convient alors de faire appel à une méthode adaptée : l'analyse en ondelettes.

L'idée consiste à représenter notre signal en fonction du temps et de la fréquence. On a donc une description directe et une description fréquentielle. Dans ce cas, les fonctions de base qui servent à décomposer le signal dépendent à la fois du temps et de la fréquence. Donc, nous allons pouvoir conserver la représentation temps – fréquence et réaliser une analyse dite multiéchelle / multirésolution. Dans ce travail, nous utiliserons à la place de la fréquence son inverse qui constituera une échelle (de périodicité) temporelle.

Les exemples de transformation en ondelettes ci-dessous montrent les résultats obtenus par analyse de trois types de signaux caractéristiques :

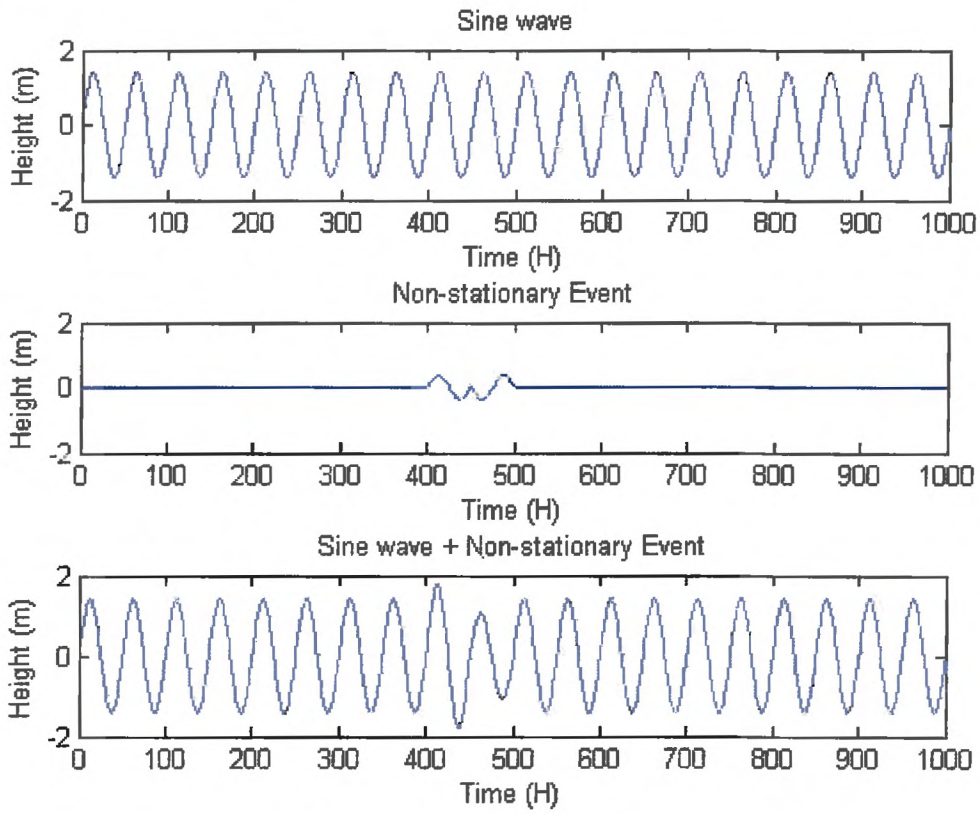


Figure 9 : Signaux exemples

La figure 9 représente de haut en bas : un signal sinusoïdal, un événement non stationnaire et un signal sinusoïdal comportant un événement non stationnaire.

Nous allons observer les résultats obtenus par analyse en ondelettes sur chacun de ces signaux afin de mieux comprendre les propriétés de la transformée en ondelettes.

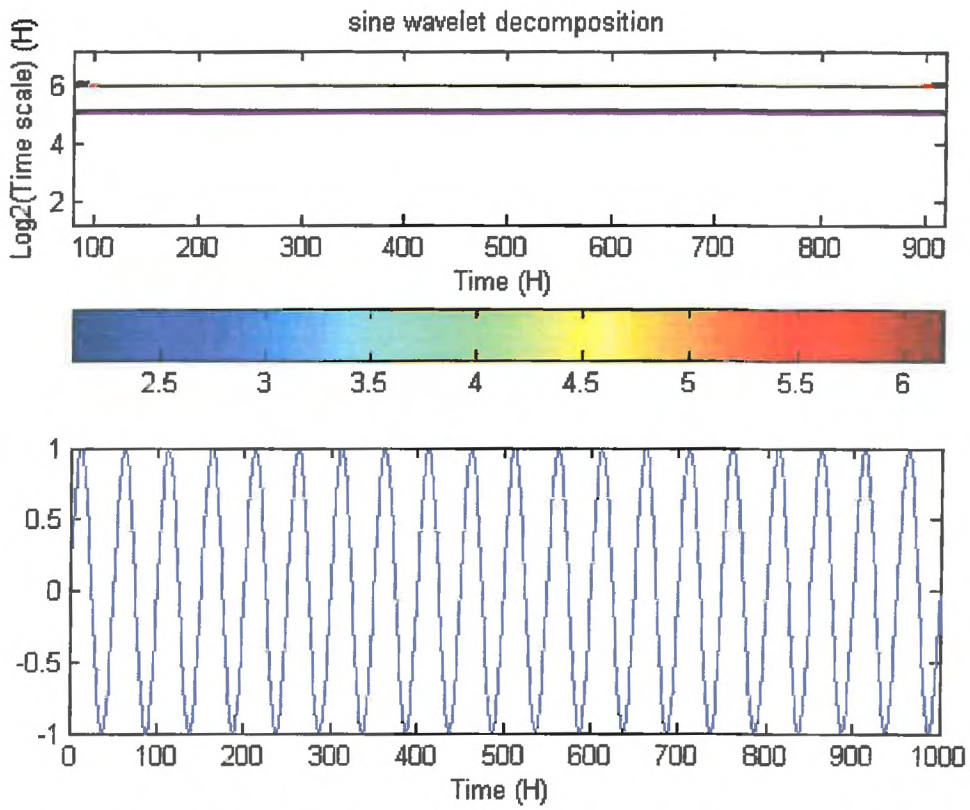


Figure 10 : Exemple 1 – Analyse en ondelettes d'un signal sinusoïdal

Dans la figure 10, on observe deux bandes énergétiques (correspondent au maxima et au minima de l'onde) stables tout au long de la série temporelle.

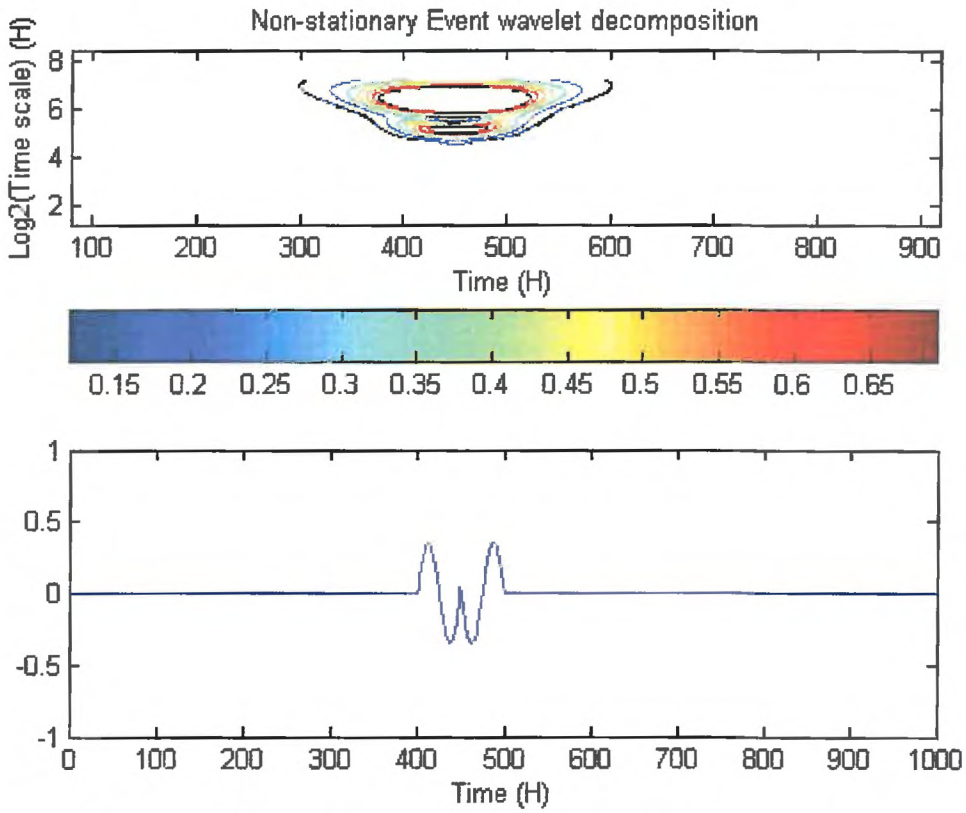


Figure 11 : Exemple 2 – Analyse en ondelettes d'un évènement non stationnaire

La figure 11 montre une structure localisée dans la décomposition en ondelettes entre 400 et 500, correspondant au temps d'apparition de l'événement non stationnaire sur la série temporelle.

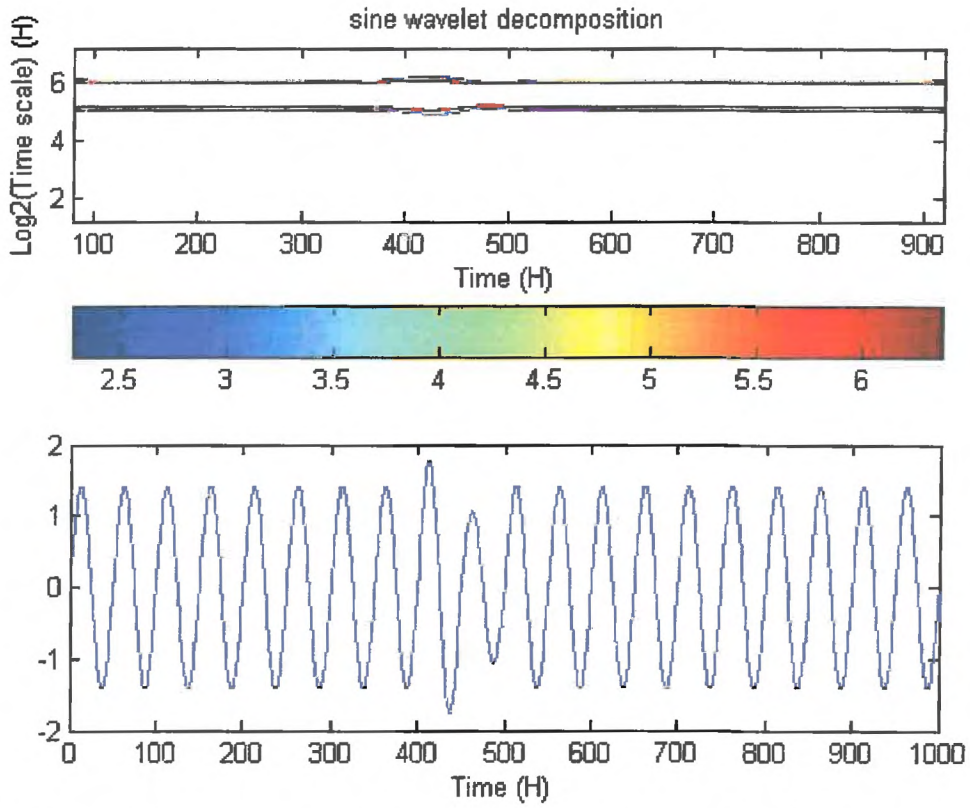


Figure 12 : Exemple 3 – Analyse en ondelettes d'un signal sinusoïdal comportant un évènement non stationnaire

Sur la figure 12, les propriétés rencontrées dans les exemples précédents s'ajoutent. En effet, on retrouve à la fois des bandes parallèles à l'axe temporel (rencontrées dans l'exemple 1) mais aussi une déformation énergétique localisée correspondant au temps d'apparition de l'événement non stationnaire (cf. exemple 2).

L'objectif principal de la transformée en ondelettes est de mettre en évidence les relations de type temps – échelle, d'évènements localisés temporellement. L'analyse en ondelettes fournit donc un regard sur la non stationnarité des phénomènes, leur intensité et leur impact sur le court terme ou sur le long terme.

L'analyse des non stationnarités étudiées a pour but de mettre en évidence certaines structures présentes de manière ponctuelle dans le temps. La décomposition des signaux par niveau d'échelle, l'isolement de composantes particulières doivent nous permettre de mieux comprendre les interrelations entre variables, à certains niveaux d'échelle. En jouant sur ce facteur d'échelle, on fait une sorte de zoom avant / arrière sur une portion du signal.

Plus précisément, il existe deux familles d'ondelettes : les ondelettes continues et les ondelettes discrètes. Le choix de l'ondelette la plus adaptée pour l'analyse d'un jeu de données dépend principalement de la nature même des données. La transformée en ondelettes discrètes (DWT pour Discrete Wavelet Transform) est préférée lorsqu'un petit nombre de données est présent en entrée. Généralement, la DWT est plus adaptée pour la compression de données et les modèles de prédiction. Alors que les ondelettes continues sont plus adaptées lorsqu'on a besoin de hautes résolutions temporelles, à toutes échelles, et pour obtenir des informations sur la phase (ADDISON, 2002). Cela vient du fait que les ondelettes continues possèdent des propriétés de similarité lorsqu'une translation et / ou une contraction leur sont appliquées. Dans cette étude, nous n'utiliserons que la transformée en ondelettes continues (CWT pour Continuous Wavelet Transform).

Les signaux que nous allons analyser présentent, en dehors d'une variation sinusoïdale à grande échelle, des oscillations de faibles fréquences constituant les fluctuations piézométriques. Ce type de signal, caractéristique des applications géophysiques, est généralement analysé par un type d'ondelettes particulières : les ondelettes de Morlet. Ce type d'ondelettes est bien connu car très utilisé pour l'analyse de jeux de données quand on cherche à localiser temporellement des structures isolées dans un environnement bruité. La fonction ondelette de Morlet consiste en une onde plane modulée par une cloche Gaussienne :

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{\left(-\frac{\eta^2}{2}\right)} e^{i2\pi f_0 \eta}$$

$\Psi_0(\eta)$ est appelée ondelette mère, elle dépend d'un paramètre "temporel" sans dimension : η.
f_0 est une fréquence sans dimension de l'onde plane.

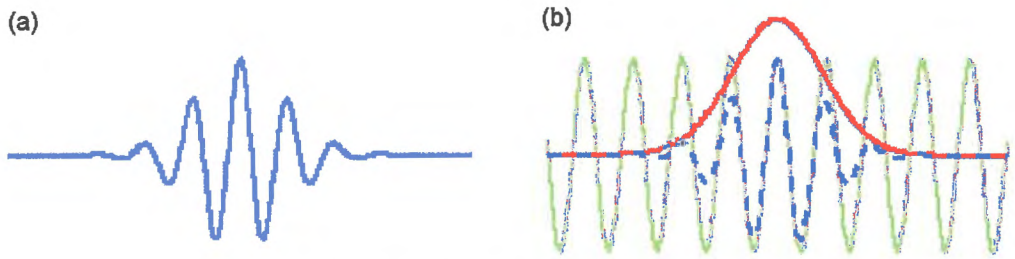


Figure 13 : Ondelette de Morlet

(a) Forme de sa partie réelle (b) Ondelette de Morlet (en pointillé bleu), résultante d'une cloche Gaussienne (en rouge) et d'une onde plane (en vert)

D'après la théorie des ondelettes, l'amplitude $\Psi_0(\eta)$ de l'ondelette mère doit décroître rapidement vers zéro quand $\eta \to \infty$. Cette condition assure l'aptitude de la fonction d'ondelette à localiser des évènements dans le temps.

On a vu la fonction basique d'ondelette, mais nous allons maintenant changer la taille de cette ondelette et la translater le long de l'axe temporel. Nous définissons donc les "ondelettes d'échelle" d'après la formule suivante :

$$\Psi_{\tau,s}(t) = \Psi\left(\frac{t-s}{\tau}\right)$$

τ est un paramètre d'échelle et s est un paramètre de translation. Toutes les ondelettes filles sont obtenues par dilatation et translation de l'ondelette mère selon l'équation ci-dessus. La famille regroupant les ondelettes filles est appelée ondelette d'analyse. En effet, la transformée en ondelettes continues (CWT) d'une fonction $f(t)$ se traduit par la convolution avec les fonctions d'ondelette et s'écrit :

$$W(\tau,s) = \int f(t)\,\Psi^*_{\tau,s}(t)\,dt$$

Dans la définition suivante, nous obtenons la principale forme de la fonction énergie associée à l'ondelette continue. A l'instar du spectre de Fourier, elle désigne la distribution temps – échelle de l'énergie :

$$E(\tau,s) = \frac{|W(\tau,s)|^2}{\tau}$$

Cette fonction est appelée scalogramme. Par l'intégration de la variable temps, elle permet aussi de mesurer l'énergie totale du signal analysé.

Dans ce travail, la décomposition du signal de fluctuations par ondelettes et le scalogramme correspondant combiné à celui de la pluie seront calculés. Les informations obtenues seront confrontées à celles obtenues par l'outil statistique, pour analyser la dynamique de ces fluctuations.

3

ÉTUDE DES TRANSFERTS SOL-NAPPE

Les outils d'analyse des données vont maintenant être appliqués à l'étude de l'évolution piézométrique suivant la quantité de pluie tombée sur le site atelier "Fontanille". Dans un premier temps, nous allons présenter les principales caractéristiques de ces données (origine, forme, stockage) avant de parler des logiciels utilisés pour leur collecte. Le traitement des données sera divisé en deux phases : un prétraitement qui consiste à préparer le signal en vue de son analyse et le traitement proprement dit, qui constitue l'essentiel de cette étude.

3.1 Caractéristiques des données

3.1.1 Relevés piézométriques

Le niveau piézométrique de la nappe alluviale est suivi selon deux protocoles mis en oeuvre par l'équipe transferts de masse en sols hétérogènes (**planche 4**) :

- le premier en date est un relevé manuel hebdomadaire. Un technicien vient mesurer les niveaux à l'aide d'une sonde piézométrique depuis le 21 juin 2002. Cette fréquence d'acquisition permet d'avoir une vision à moyen terme de l'évolution de la nappe mais elle est inexploitable pour caractériser des fluctuations (d'ordre horaire).

La figure **(a)** représente le signal issu du relevé hebdomadaire effectué sur PZ3C, le plus renseigné en terme de données. On observe dans ce graphique une inversion des cycles hydrogéologiques de la nappe avec une période d'étiage autour de février – mars et une période de hautes eaux fin août – début septembre ; ceci est dû à la présence d'un canal en bordure de la parcelle, destiné à la pratique de l'irrigation gravitaire (cf. § 1.2 Nappe alluviale de la basse Durance).

Campagne de mesures du 22 mars 2006

Nous avons suivi le protocole habituel en relevant le niveau pour les piézomètres équipés de sondes DIVER® et pour l'ensemble des piézomètres dits "longs" à l'aide d'une sonde manuelle. Les piézomètres sont repérés sur la tranche du tube et la précision maximale de la sonde est le demi centimètre. Les données sont ensuite stockées sous forme papier et en partie enregistrées sur le réseau informatique.

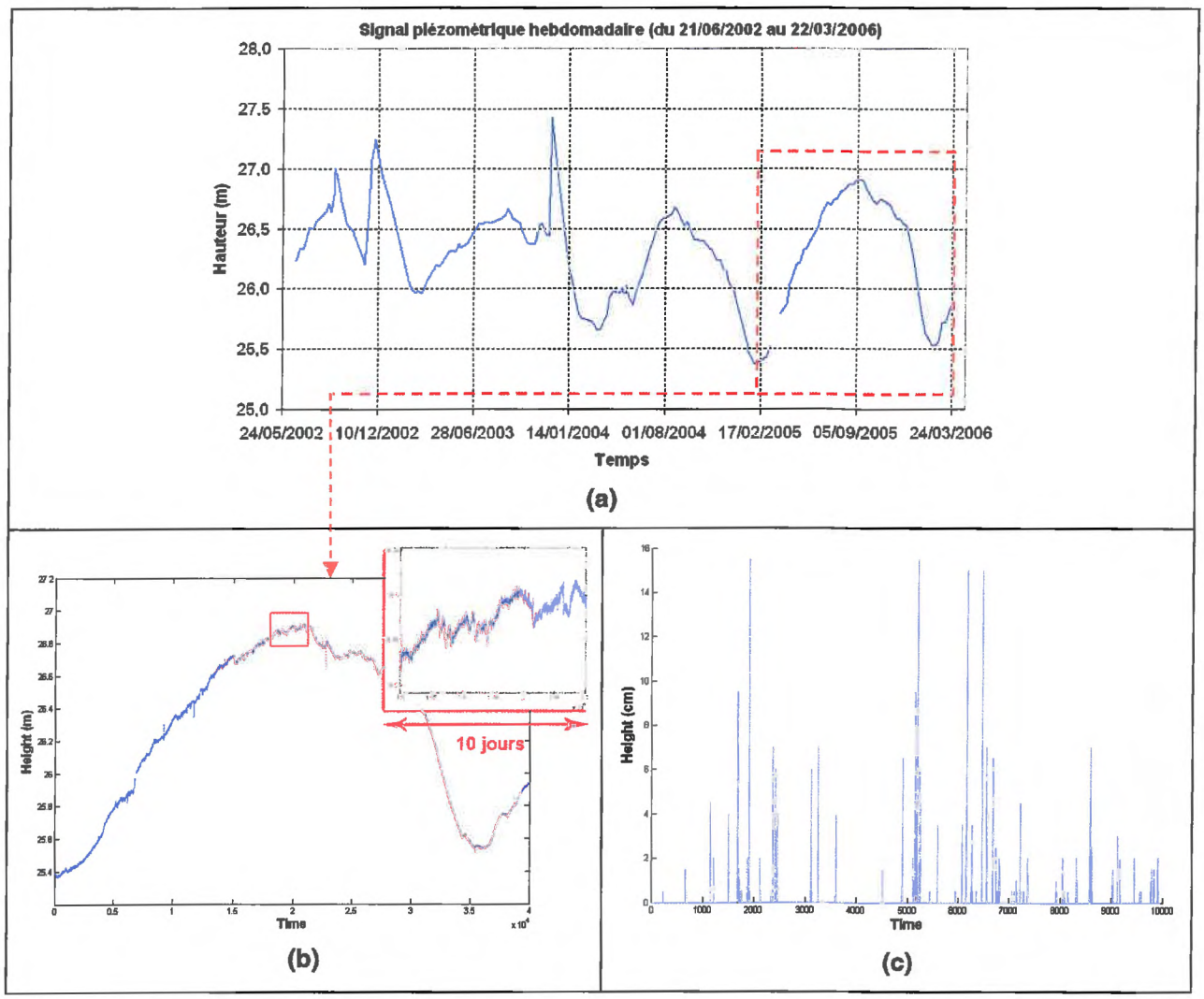


Planche 4 : (a) signal piézométrique hebdomadaire, (b) signal piézométrique continu (au pas de temps 15 mn) et (c) chronique de pluie horaire

- le second protocole, en continu (pas de temps de 15 mn), est réalisé grâce aux sondes DIVER® depuis le 4 février 2005. Un technicien vient, tous les 6 mois, relever les données brutes et les enregistre sur le réseau de l'INRA. Les données qui nous intéressent proviennent des piézomètres PZ1C, PZ2L et PZ3C (cf. figure 4 : schéma de l'instrumentation du site atelier "Fontanille").

Pour exemple, le signal piézométrique continu de PZ3C est présenté en figure **(b)**. On retrouve dans ce signal la forme générale observée grâce aux relevés hebdomadaires à laquelle s'ajoutent des pics piézométriques de courte durée (observables dans l'agrandissement).

NB : L'échelle de temps correspond au nombre de mesures effectuées ; ici une mesure toutes les 15 minutes pendant environ 14 mois soit à peu près 40 000 valeurs.

Une étude statistique globale réalisée d'après les données piézométriques est présentée ci-dessous. Elle permet d'avoir un ordre de grandeur des observations.

Piézomètre	Moyenne (en m)	Écart type (en m)
PZ1C	**26,552**	**0,258**
PZ2L	**26,625**	**0,265**
PZ3C	**26,256**	**0,244**

On remarque que les trois signaux présentent des caractéristiques (moyennes et écarts type) de même ordre de grandeur. Ces similarités entre les signaux vont se confirmer lors de chaque étape de traitement du signal. Les résultats des analyses piézométriques, sous forme graphique et très nombreux, seront donc présentés en annexe. Or, dans un souci de clarté, les résultats obtenus sur le piézomètre PZ3C seront dupliqués dans le texte pour exemple.

De même que pour les mesures piézométriques manuelles, je suis intervenu en présence d'un technicien, pour effectuer le relevé des sondes DIVER®.

<u>Relevé des sondes : intervention du 27 mars 2006</u>

Nous avons sorti la sonde du piézomètre pour la connecter à un PC de terrain afin de récupérer les données acquises (cf. § 1.4.3 Sondes piézométriques). Ensuite on a programmé la sonde sur place : on saisit sa localisation, l'heure de son futur démarrage (de sorte que toutes les sondes soient synchronisées) et sa fréquence de mesure. La date de cette intervention marque la fin du jeu de données à exploiter.

3.1.2 Données pluviométriques

Nous avons récupéré les données pluviométriques sur la Base de Données Agroclimatiques, fournies au pas de temps horaire, pour la période correspondant à la longueur du relevé piézométrique continu (du 4/02/2005 au 27/03/2006).

La figure **(c)** représente la chronique de pluie de la station AGROCLIM n°87007004 à Montfavet. On retrouve dans ce signal les caractéristiques du climat méditerranéen avec des précipitations inégalement réparties sur l'année, maximales en avril – mai et septembre – octobre (cf. § 1.3 Climatogie). Le cumul de pluie horaire maximal enregistré sur la chronique est de 15,5 mm. Durant toute la période, le cumul a été de 607,5 mm réparti sur seulement 116 évènements pluvieux soit une intensité moyenne de 5,2 mm / pluie. Une brève étude statistique menée sur le signal pluie va nous permettre de mieux nous rendre compte de la signification de cette chronique. Voici ces caractéristiques :

Durée de l'évènement	Nombre d'évènements	Pourcentage
1 à 3 h	**92**	**79,8 %**
4 à 6 h	18	15,5 %
7 h et plus	6	5,2 %

Cette étude permet de dégager une caractéristique importante du signal pluviométrique : la grande majorité des pluies n'excède pas une durée de trois heures.

3.2 Collecte des données

La collecte des données a été réalisée sous Excel. Nous avons récupéré les chroniques de pluie et de hauteur de nappe pour les rassembler dans un seul fichier. Ces données étaient à l'état brut, dispatchées et non collectées de manière uniforme.

Afin d'obtenir les meilleures mesures possibles pour les signaux recherchés, il est nécessaire d'utiliser des outils et des traitements appropriés. L'ensemble des traitements a donc été réalisé à l'aide du logiciel MATLAB® 7.1. En **annexe 4**, nous présentons les principaux atouts de ce dernier pour notre étude, les programmes (Toolboxes) utilisés ainsi que son environnement de travail.

Un CD, fourni au dos du présent mémoire, contient l'ensemble des données recueillies, nos programmes MATLAB® ainsi que les graphiques présentés en annexe.

Une fois les données recueillies sous MATLAB®, nous allons les mettre en forme (prétraitement des données) en construisant des séries temporelles de fluctuations. Cette première étape va nous permettre d'isoler un comportement particulier dans le signal. Pour cela, nous allons utiliser quelques unes des techniques de base du traitement du signal. Puis, pour une caractérisation plus fine de la transformation du signal pluie – piézométrie, on utilisera l'analyse en ondelettes.

3.3 Prétraitement des données

L'étape suivante consiste à construire des séries temporelles pour chacun des piézomètres suivi en continu. On va interpoler les données manquantes afin d'obtenir des signaux de pas temporel fixe et réaliser un filtrage qui ne conservera que les composantes à analyser.

3.3.1 Interpolation des données manquantes

- Les interpolations des signaux PZ1C et PZ2L sont présentées en **annexe 5**.

A ce stade, le signal comporte des points manquants dus aux interventions humaines. Les signaux provenant de chacune des trois sondes montrent des "trous" pour deux périodes correspondant au relèvement et à la programmation des sondes. En pratique, les sondes sont arrêtées pendant le transfert des données et leur acquisition est synchronisée pour une heure future. Ces quelques points ne représentent qu'une infime partie du signal mais sont essentiels à sa continuité pour assurer les traitements numériques futurs. Afin de combler ces "trous", nous allons interpoler le signal. En figure 14, trois types d'interpolation sont présentés :

- en vert, l'interpolation par splin cubique (algorithme de 3ème ordre);
- en rouge, l'interpolation linéaire;
- en rose, l'interpolation type "nearest neighbour" qui consiste à minimiser l'écart avec les voisins les plus proches (ici, les 50 points précédents et les 50 suivants).

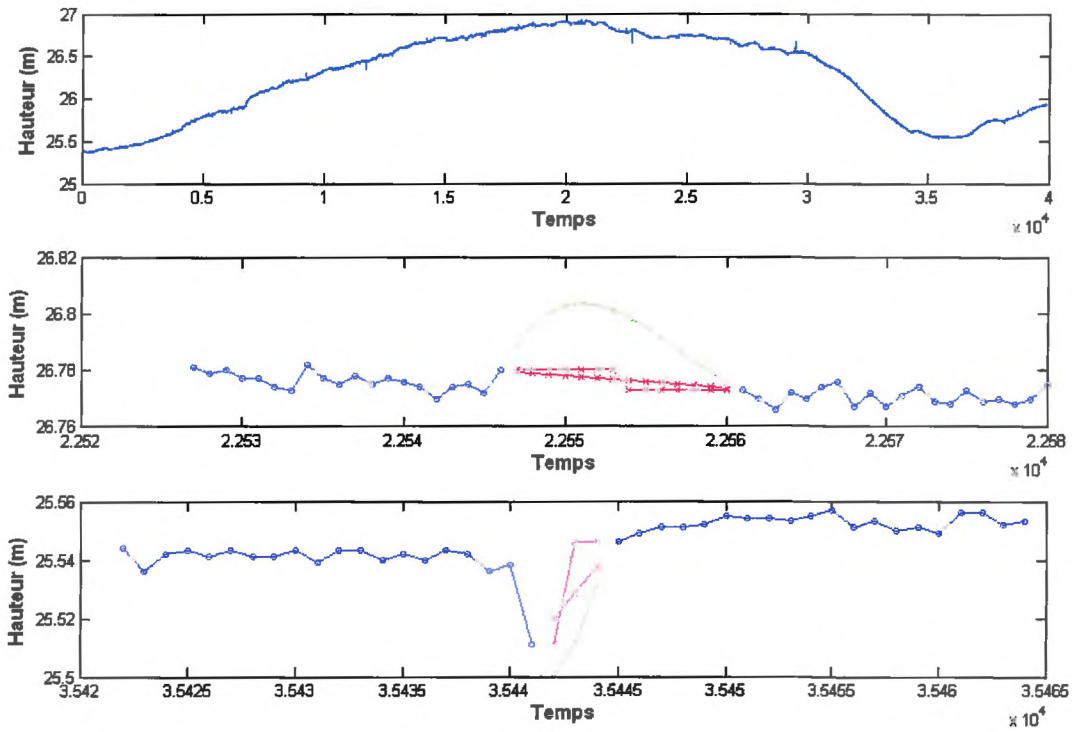


Figure 14 : Interpolation du signal piézométrique

La figure 14 représente de haut en bas : le signal piézométrique brut, un agrandissement de la première période (3 h 30 mn) puis de la seconde (45 mn) comportant des points manquants.

La méthode d'interpolation qui retranscrit le plus fidèlement les données adjacentes est choisie visuellement pour chaque domaine présentant des points manquants. Ce choix n'est pas crucial car les valeurs attribuées n'auront pas de poids significatif sur le signal.

NB : Dans le signal brut, à cette échelle, les "trous" ne sont pas visibles.

A l'issue de cette étape, le signal est continu, alors nous pouvons commencer son exploitation numérique en appliquant les techniques de traitement du signal choisies.

3.3.2 Filtrage par transformée de Fourier

- En **annexe 6**, les spectres bruts (en bleu) et filtrés (en rouge) de PZ1C et PZ2L sont présentés. L'**annexe 7** montre les séries temporelles de fluctuations de hauteur d'eau extraites des signaux PZ1C, PZ2L et PZ3C.

Ci-dessous, nous avons représenté le signal piézométrique de PZ3C avec le signal de pluie.

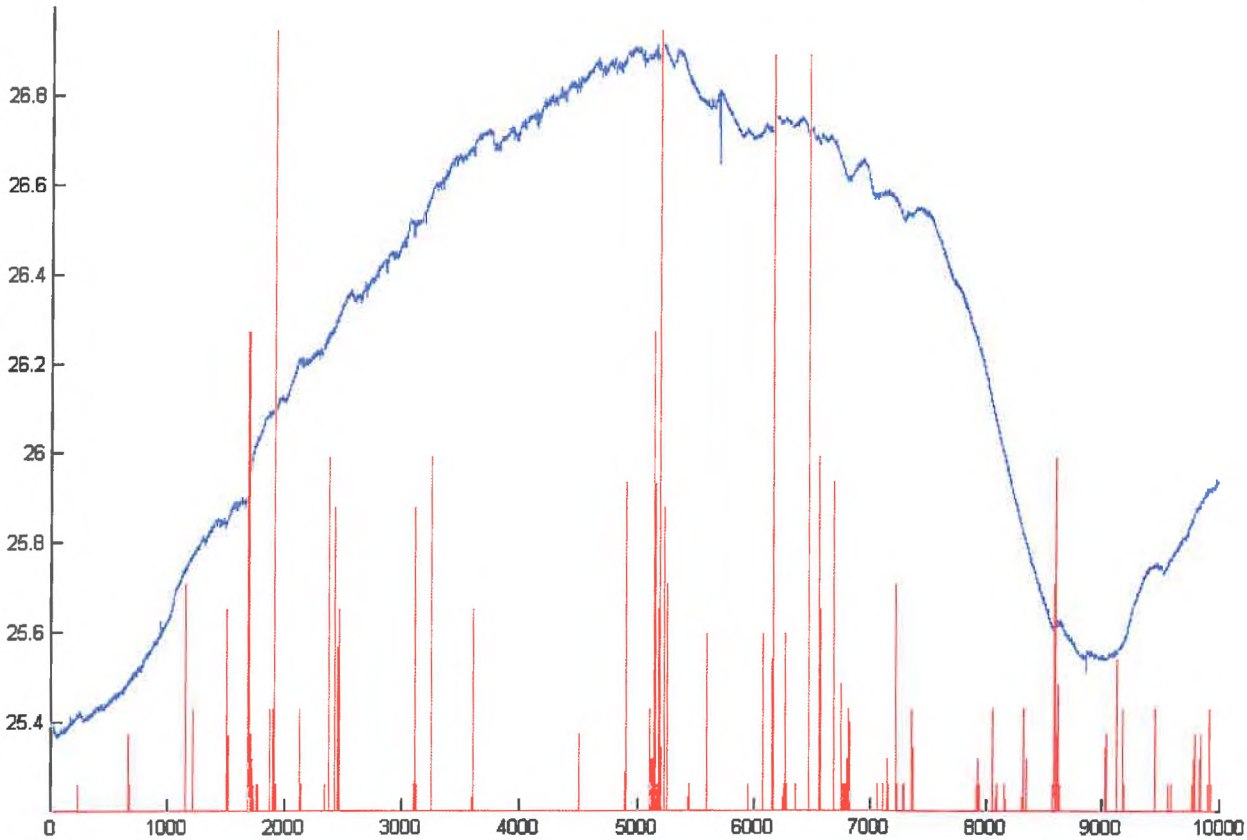


Figure 15 : Signal piézométrique brut avec la chronique de pluie

Sur cette figure, on observe à la fois une évolution lente du niveau (en bleu) et des mouvements rapides de la surface piézométrique (cf. Planche 4-b).

Certains de ces mouvements semblent directement liés aux impulsions pluvieuses (en rouge). On suppose alors que le signal est composé de 2 types de signaux qui s'additionnent :

- une variation saisonnière, qui correspond à une dynamique de grande échelle;
- des fluctuations, qui traduisent une réponse locale de la nappe à une pluie.

Dans ce graphique, l'échelle des cumuls pluvieux horaires n'a pas d'importance. La figure 15 permet simplement d'apprécier la correspondance entre les pics. Pour la caractérisation des transferts d'eau à l'échelle locale, ce sont les fluctuations piézométriques qui nous intéressent. En effet, ces fluctuations présentent des pics piézométriques de quelques heures correspondant à la fréquence des pics de pluviométrie. Nous allons donc isoler ce signal en supprimant la variation saisonnière.

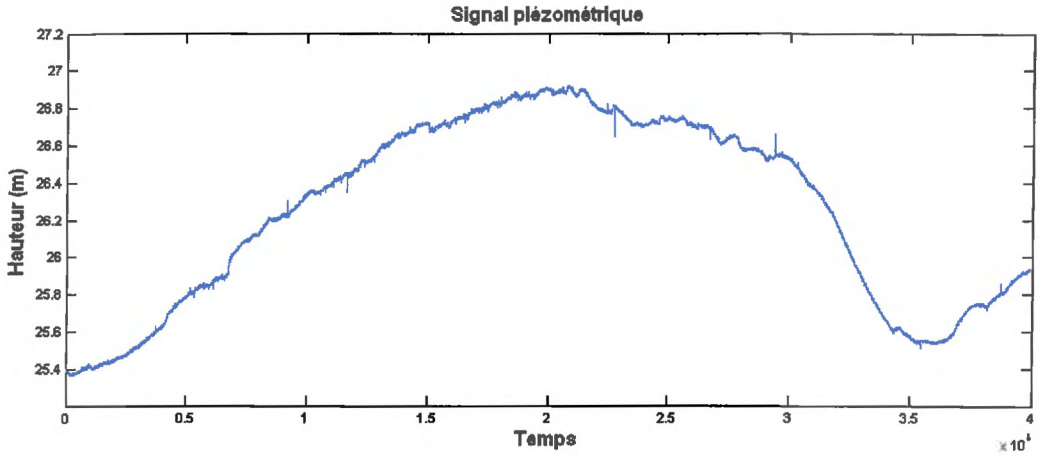
La transformée de Fourier permet la recherche de composantes périodiques dans un signal. Sur la **planche 5**, les deux premières représentations sont équivalentes. La figure **(a)** correspond au signal piézométrique et la **(b)**, à son spectre de Fourier. Le signal (en bleu) ne montre rien de définissable. Son spectre de Fourier (en rouge) dévoile en revanche une forte amplitude pour les basses fréquences. Nous allons voir que l'application d'un filtre linéaire sur ce spectre va nous permettre d'extraire les fluctuations de hauteur d'eau.

Filtrage linéaire :

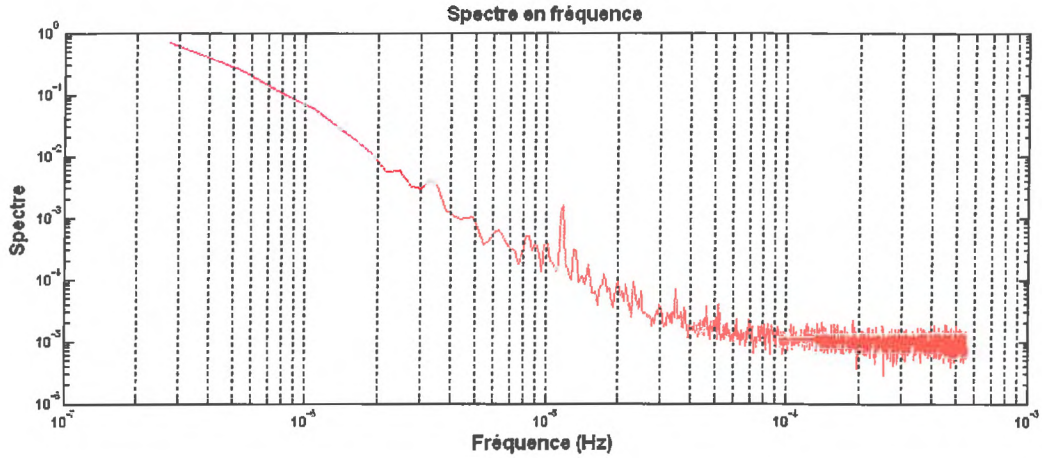
On a choisi d'appliquer ce type de filtre pour sa simplicité mais aussi parce qu'il fonctionne bien lorsque les deux phénomènes que l'on souhaite dissocier se superposent linéairement. Un filtrage linéaire est un opérateur linéaire appliqué à la TF du signal d'entrée. Pour s'affranchir d'une composante du signal, il faut s'appuyer sur les caractéristiques qui l'opposent à celle que l'on veut conserver. Ici, la composante du signal correspondant à la variation saisonnière de la nappe, à supprimer, est clairement identifiable dans le spectre sous forme de basses fréquences.

D'un point de vue fréquentiel, il existe plusieurs types de filtres linéaires. Dans notre cas, la méthode consiste à utiliser un filtre "passe-haut" afin de laisser passer les hautes fréquences et retirer les basses fréquences. Ce dernier a pour fonction de filtrer les signaux dont la fréquence est inférieure à une fréquence caractéristique appelée fréquence de coupure. Cette fréquence sépare les deux modes de fonctionnement idéaux du filtre : passant ou bloquant. Le choix de cette fréquence dépend du filtrage souhaité.

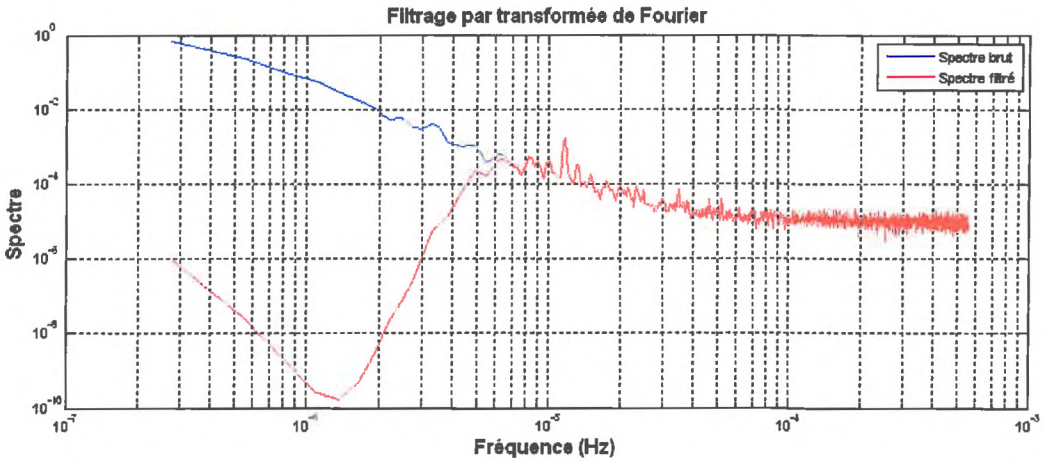
D'après la figure **(b)**, on observe une limite assez nette dans le spectre de Fourier entre deux domaines de fréquence autour de 10^{-5} Hz (fréquence de coupure). Il apparaît un domaine de basse fréquence (BF) en dessous de 10^{-5} Hz et un domaine de haute fréquence (HF) au-dessus de 10^{-5} Hz.



(a)



(b)



(c)

Planche 5 : (a) signal piézométrique, (b) spectre de Fourier et (c) filtrage par transformée de Fourier

Le domaine des BF correspond à la variation saisonnière de la nappe tandis que celui des HF correspond aux fluctuations. Par le calcul, on sait que 10^{-5} Hz correspond à un peu plus d'une journée (environ 28 h). L'analyse à venir portera donc sur des phénomènes temporels à petites échelles.

La figure **(c)** illustre le résultat du filtrage par TF sur le spectre. Ce graphique montre que la composante BF a bien été éliminée du spectre filtré (en rouge) car on observe que l'amplitude du spectre initial a été fortement diminuée, jusqu'à 8 décades (10^{-10} contre 10^{-2} auparavant).

Pour obtenir le signal de fluctuation, une inversion de la TF du résultat de l'opération de filtrage décrite plus haut est effectuée.

Inversion de la transformée de Fourier :

Sur la **planche 6**, La figure **(d)** représente le signal initial (en bleu) ainsi que ce même signal, une fois filtré (en rouge), correspondant aux fluctuations piézométriques.

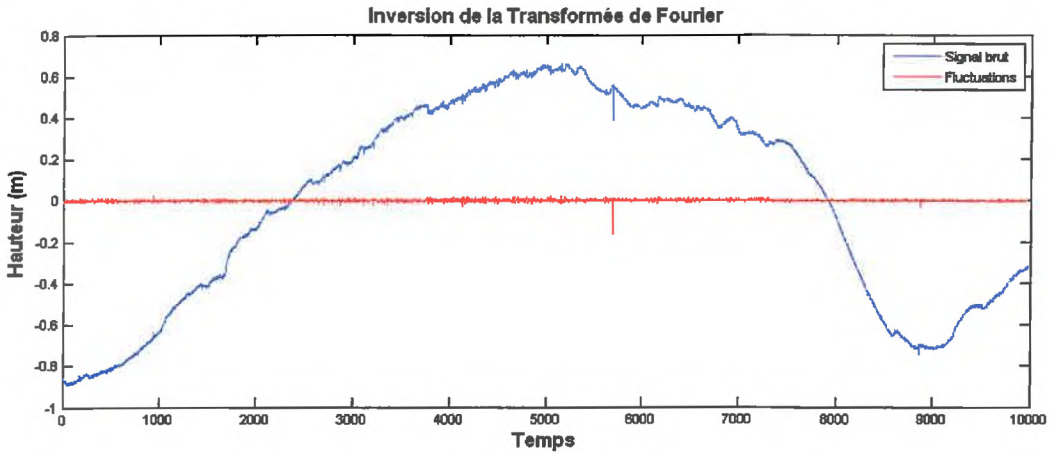
NB : la moyenne a été retranchée du signal initial afin d'améliorer la présentation. Un autre choix d'échelle est présenté en **annexe 7** pour la visualisation des séries temporelles de fluctuations, seules.

De retour dans l'espace temporel, on obtient effectivement un signal sans variation saisonnière. Visuellement, on suppose que les deux signaux sont en phase en s'appuyant sur les pics majeurs.

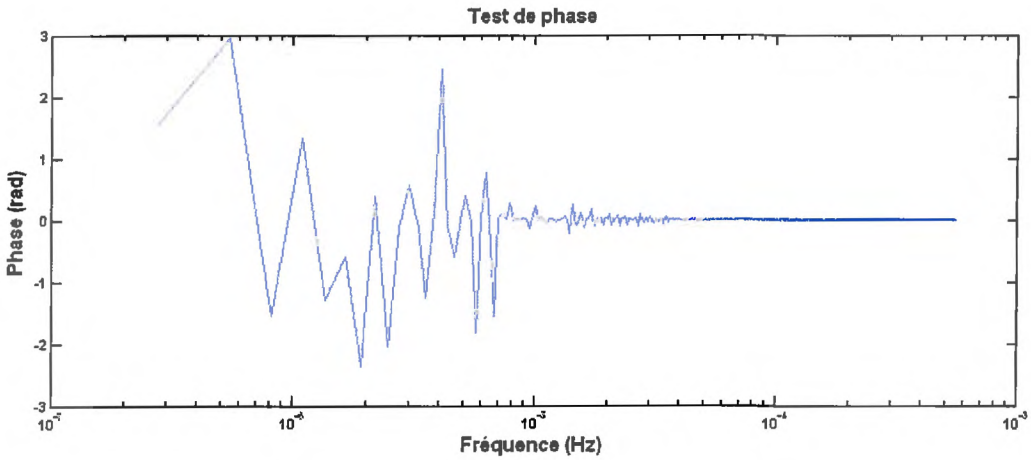
L'efficacité d'un filtre est définie par sa capacité à conserver les deux types d'informations véhiculés par le signal brut : sa phase et son amplitude. La figure **(e)** montre la concordance de phase et la figure **(f)** représente la cohérence entre le signal initial et les fluctuations.

On ne remarque aucun déphasage entre les deux signaux pour les hautes fréquences. De même une cohérence suffisamment élevée dans le domaine des hautes fréquences nous indique la qualité du filtrage.

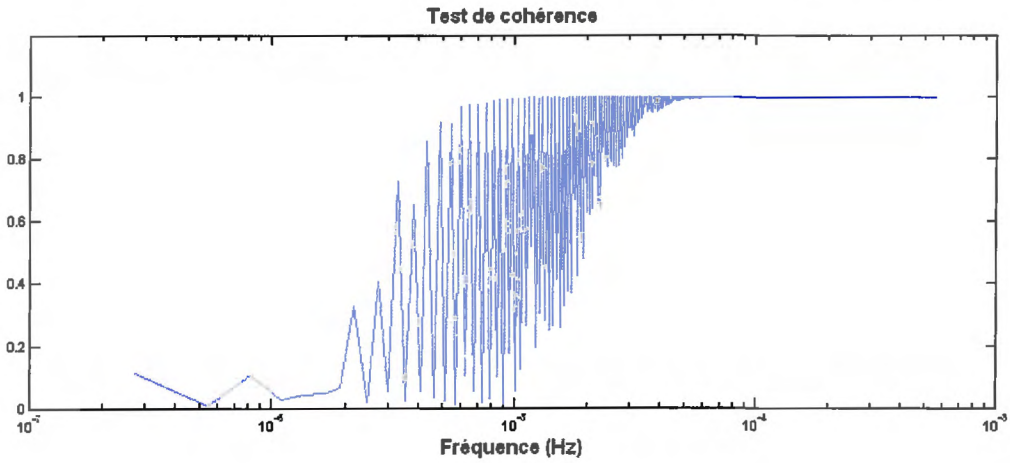
Maintenant que nous avons extrait les séries temporelles de fluctuations de hauteur d'eau, nous allons les étudier en utilisant les deux approches développées dans le second chapitre, à savoir une étude statistique et une analyse en ondelettes.



(d)



(e)



(f)

Planche 6 : (d) inversion de la transformée de Fourier, (e) test de phase et (f) test de cohérence du filtrage

3.4 Histogramme

- En **annexe 8 et 9**, on présente les histogrammes de PZ1C et PZ2L ainsi que la représentation logarithmique de leur distribution de probabilité.

L'histogramme expérimental des fluctuations de hauteur d'eau (notées α) est comparé ci-dessous à une loi normale *P(x)* de moyenne et d'écart type identique à ceux des données :

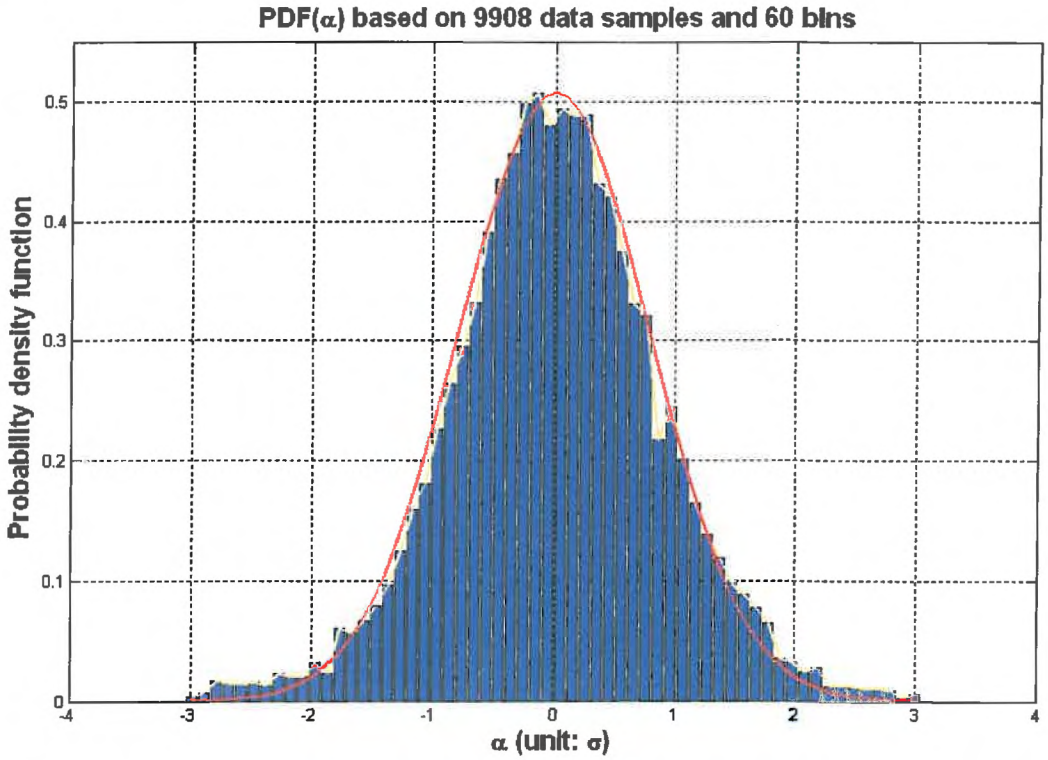


Figure 16 : Histogramme des fluctuations de hauteur d'eau (en bleu) et sa loi normale (en rouge)

La figure 16 montre l'histogramme et la loi normale "modèle" dans une représentation centrée réduite (μ=0, σ=1). Ce graphique montre un faible écart entre *P(x)* et l'histogramme. A première vue, il existe donc une certaine adéquation entre l'histogramme des données et la loi normale. Cependant, aux évènements extrêmes, les valeurs attendues dans le cas où les données suivraient cette loi s'écartent un peu de l'histogramme. Une représentation logarithmique des distributions de probabilité des points expérimentaux et de la loi normale permet de mieux s'en apercevoir (cf. figure 17).

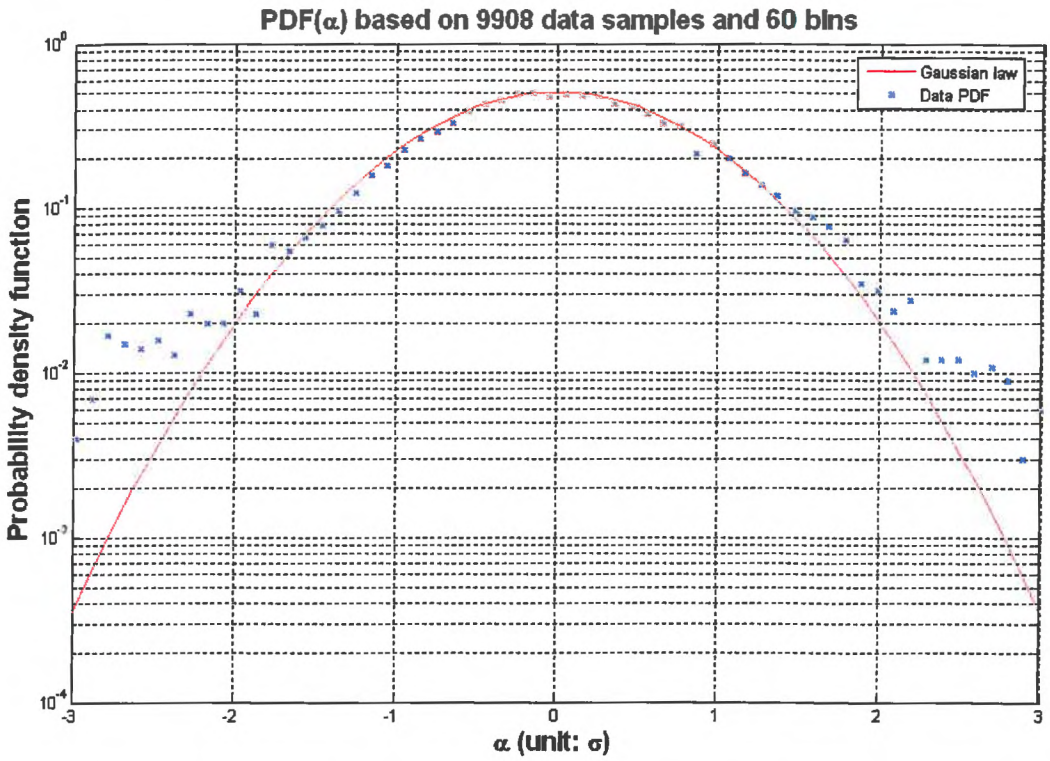


Figure 17 : Log distribution de probabilité des points expérimentaux (en bleu) et log loi normale (en rouge)

La figure 17 montre effectivement un écart à la loi normale pour les évènements extrêmes alors que cette même loi accorde à ces évènements des probabilités plus faibles.

Ceci semble traduire l'existence d'un processus de transfert "anormal" du sol vers la nappe lors d'évènements rares. Ces évènements pourraient correspondre à des épisodes pluvieux de fortes intensités.

3.5 Analyse par transformée en ondelettes

- **L'annexe 10** présente le scalogramme des fluctuations piézométriques et du signal de pluie ainsi que la corrélation croisée entre les deux décompositions en ondelettes pour PZ1C. **L'annexe 11** présente ces mêmes résultats pour PZ2L.

Ce paragraphe nécessite une mise en relation des signaux piézométriques et pluviométriques, le pas de temps de cet ensemble se doit alors d'être homogène. Nous sommes donc contraints de dégrader les signaux piézométriques vers un pas de temps horaire.

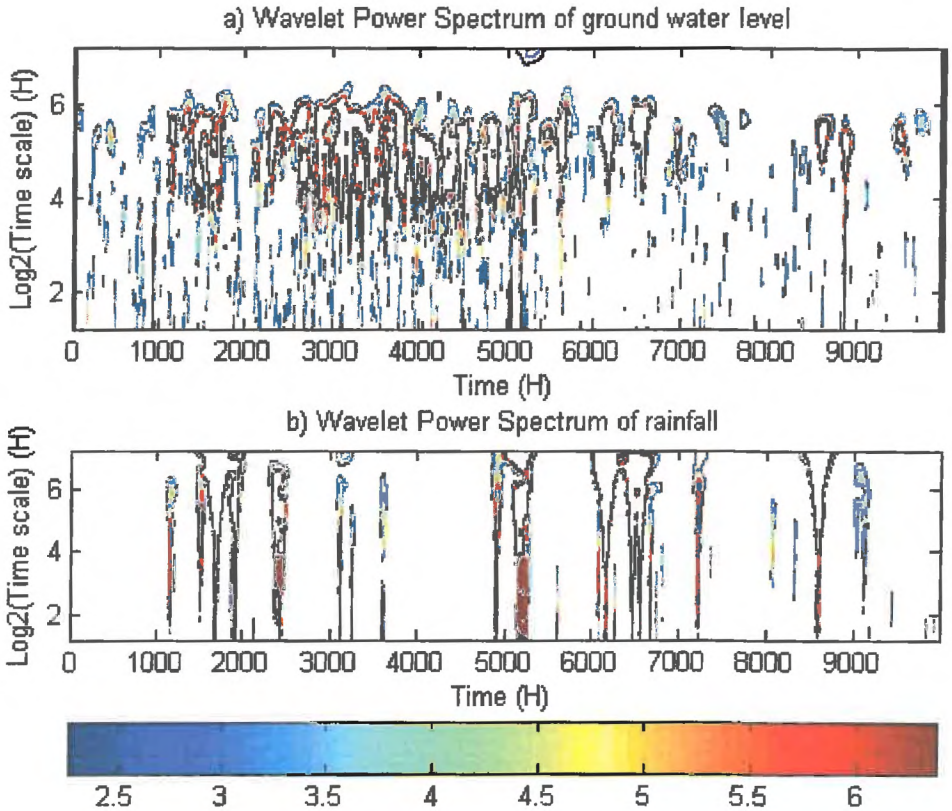


Figure 18 : (a) scalogramme des fluctuations piézométriques et (b) scalogramme du signal de pluie

La figure 18 montre le scalogramme associé au signal PZ3C (en haut) ainsi que celui du signal de pluviométrie (en bas).

A première vue, les fluctuations de la nappe semblent répondre à tous les pics de pluie. Cependant, un phénomène inattendu entre les temps 4000 et 5000 montre une variabilité de la nappe qui ne correspond pas à des évènements pluvieux. Cette variabilité a probablement une origine hydrodynamique que nous n'avons pas pu déterminer dans cette étude. Compte tenu de notre objectif dans ce travail, nous écarterons les questions liées à ce phénomène.

Plus précisément, le scalogramme des données piézométriques (dans les trois cas analysés) montre l'existence de deux groupes de fluctuations, tout au long de la série temporelle. Un premier groupe de fluctuations à une échelle temporelle assez grande (phénomène d'une durée au-delà de 20 heures) avec des formes assez structurées est bien identifiable. On peut ensuite observer un deuxième groupe de fluctuations d'échelle temporelle beaucoup plus faible sous une forme très localisée et sans structure apparente.

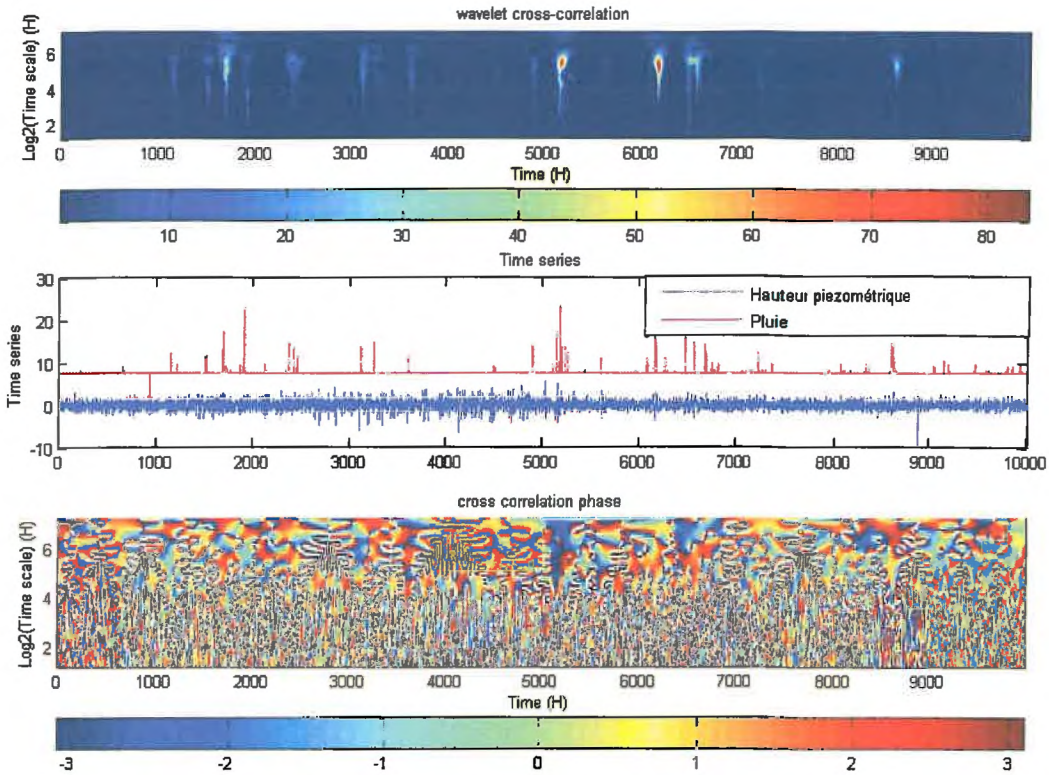


Figure 19 : Corrélation croisée entre le signal des fluctuations et le signal de pluie

La figure ci-dessus présente la corrélation entre les deux signaux : le graphique du haut illustre la cohérence énergétique, celui du milieu rappelle la forme des séries temporelles et le graphique du bas illustre la concordance de phase entre les signaux.

Grâce à la figure 19, on observe que le premier groupe qui constitue la majeure partie de l'énergie des fluctuations possède par endroit de bonne cohérences avec la pluviométrie, tandis que le groupe de fluctuations de plus faible échelle apparaît décorrélé de l'énergie du signal pluviométrique. Le second groupe possède néanmoins une certaine corrélation avec le signal de pluie lors d'événements intenses. Cette indépendance statistique et la séparation entre les deux groupes de fluctuations apparaissent assez clairement sur la représentation de l'évolution de la phase entre les énergies d'ondelettes de la pluie et des fluctuations de la nappe (présence de structure assez bien définie au-delà de 20 heures).

Ces résultats semblent prédire l'existence de deux modes de transfert dont le premier assez majoritaire en énergie et plus cohérent avec la distribution de l'énergie de la pluie domine le phénomène global de transfert. Le second mode beaucoup moins énergétique avec une plus faible échelle temporelle (donc plus rapide) apparaît peu corrélé avec la distribution d'énergie de la pluie.

Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail était de caractériser les transferts dans la zone non saturée à partir de données piézométriques et pluviométriques. Cette étude s'inscrit dans un projet à long terme dont l'enjeu est une meilleure compréhension des processus de transfert d'eau et de soluté pour la maîtrise des impacts environnementaux des activités agricoles. Notre approche a consisté en une analyse statistique et spectrale de ces données. Nous avons collecté plus d'une année de relevés piézométriques provenant de trois ouvrages implantés sur un site expérimental de l'INRA d'Avignon, en surplomb de la nappe alluviale de la basse Durance. Les données pluviométriques ont été recueillies par une station météorologique proche. Un prétraitement des données piézométriques a d'abord été nécessaire pour extraire les fluctuations de hauteur de nappe. Ensuite, nous avons réalisé une analyse croisée des signaux piézométriques et de la pluviométrie en utilisant la transformation en ondelettes.

L'analyse statistique a montré un écart à la loi normale qui pourrait traduire l'existence d'un processus de transfert "anormal" du sol vers la nappe lors d'évènements rares. Et l'analyse par transformée en ondelettes a conclu à la présence de deux modes de transfert possibles, dont un plus rapide mais peu énergétique. Ces résultats semblent concordants pour montrer l'existence d'un mode d'infiltration "anormale" de l'eau de pluie vers la nappe, peut-être lors d'évènements pluvieux intenses.

En perspective, une meilleure qualité des mesures piézométriques sur un temps plus long permettrait de confirmer ou non ces premiers résultats. La précision des sondes piézométriques devrait être évaluée en laboratoire, d'ici peu, par l'équipe métrologique. De même, l'acquisition de données pluviométriques avec un pas de temps plus fin permettrait d'améliorer les résultats. En outre, nous pensons qu'il serait judicieux de reproduire une telle étude uniquement sur les mois de septembre – octobre. En effet c'est à cette période que l'impact des pluies est décisif pour la recharge de la nappe de la basse Durance, car les précipitations sont alors maximales tandis que les canaux ne sont plus en charge.

Par la suite, les résultats d'autres études pourraient être mis en relation avec les nôtres. Nous pensons principalement aux résultats des analyses chimiques et isotopiques entrepris dans le cadre du stage d'Emilie GAREL, dont l'objectif est de mettre en évidence des écoulements préférentiels du sol vers la nappe.

Ce sujet rentre dans le cadre de préoccupation de l'équipe Transferts en sols Hétérogènes et sera poursuivi en parallèle avec la modélisation numérique. Les résultats de cette étude pourront servir à la validation des modèles.

Annexes

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des observations lithologiques et des équipements de forage

Forage	Épaisseur de couverture (m)	Profondeur du substratum (m)	Profondeur du forage (m)	Longueur crépinée (m)
PZ1L	2,5	9,3	9,5	7,5 à 9,5
PZ1C	2,6	-	7	5 à 7
PZ2L	3,6	9,3	10	7 à 9
PZ2C	3,6	-	6,5	4,5 à 6,5
PZ3L	3,6	9,7	10	8 à 10
PZ3C	3,6	-	7	5 à 7
PZ4L	2,5	9,1	9,3	7,3 à 9,3
PZ4C	2,6	-	7	5 à 7
PZ5L	2,4	9,3	9,5	5,5 à 9,5
PZ5C	2,4	-	6	4 à 6
PZ6L	1,3	9,6	10	6 à 10
PZ6C	1,3	-	6	4 à 6
PZ7L	1,5	9,1	9,3	5,3 à 9,3
PZ7C	1,5	-	6	4 à 6
PZ8L	1,9	9	9,2	5,3 à 9,2
PZ8C	1,9	-	6	4 à 6
PZ9L	1,9	9	9,3	5,3 à 9,3
PZ9C	1,9	-	6	4 à 6
PZ10L	1,6	9	9,2	5,2 à 9,2
PZ10C	1,6	-	6	4 à 6
PZ11L	2	8,9	9,1	5,1 à 9,1
PZ11C	2	-	6	4 à 6
PZ12L	2,6	8,9	9,2	5,2 à 9,2
PZ12C	2,6	-	6	4 à 6
PZ13L	1,8	9,1	9,3	5,3 à 9,3
PZ13C	1,8	-	6	4 à 6
PZ14L	1,7	8,8	9	5 à 9
PZ14C	1,7	-	6	4 à 6

Annexe 2 : Coupe lithologique du piézomètre PZ1L

Document Qualité N° 09.40.10

HYDRO-GEOTECHNIQUE

SONDAGE DE RECONNAISSANCE GEOLOGIQUE

Client INRA
Chantier MONTFAVET - Site Expérimental Agroparc
Dossier C/G/01/J/167/J/132
Date 27 décembre 2001

Sondage PZ1 long

Profondeur	Lithologie	Outil	Tubage	Equipement	Eau	Observations
0,20	limon sableux beige légèrement argileux humifère	taillant ø 115 mm	ODEX 127mm	PVC ø64/75mm + bouchon + tête de protection		
	argile sablo-limoneuse beige à cailloutis					
1,40	argile sablo-limoneuse brun beige à cailloux					
2,50	grave sableuse gris beige				▼	
				PVC ø64/75mm crépiné	▼	
9,30	marne calcaire gris bleu					
9,50						

Ce sondage de reconnaisance réalisé en petit diamètre ne peut fournir qu'une lithologie approximative donnée à titre indicatif

Eau : première rencontre à 6,3 m Eau : fin de forage à 5,7 m

HYDRO-GEOTECHNIQUE - Direction régionale Méditerranée - 114 ZI Avon - 13120 Gardanne - tél 04 42 65 88 21 - fax 04 42 65 88 56

Annexe 3 : Caractéristiques techniques des mesures de pression par sonde DIVER®

Type	DI240 (DIVER®)	DI250 (BARO-DIVER®)
Range	950-1450 cm wc*	950-1100 cm wc*
Calibrated range	500 cm wc*	500 cm wc*
Usable range	400 cm wc*	150 cm wc*
Accuracy	± 0,1 % FS** soit ± 0,5 cm	± 0,5 cm
Resolution	0,1 cm	0,1 cm
Maximum pressure	10 m wc*	10 m wc*

* Water Column / Colonne d'eau

** Full Scale / Pleine échelle

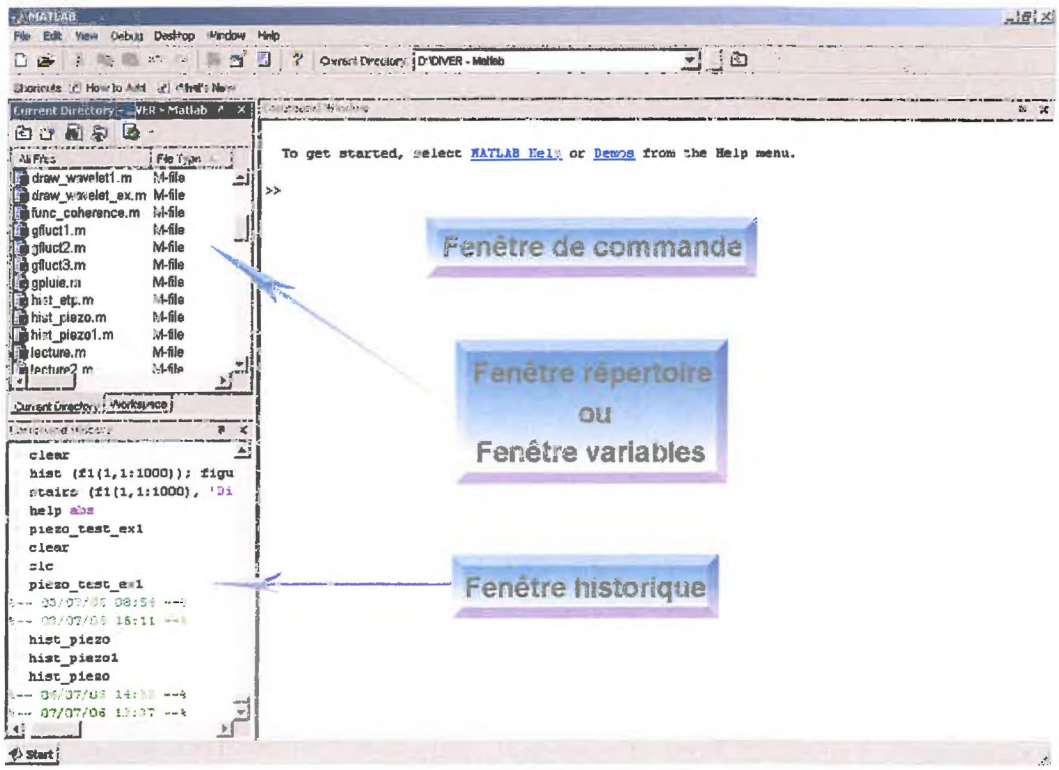
Annexe 4 : Présentation de Matlab

MATLAB® est un logiciel de calcul interactif distribué par "The MathWorks Inc.". MATLAB® est un environnement généraliste destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement ouvert et programmable. Il dispose de plusieurs centaines de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB®, il est possible de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits. Les résultats et exemples édités dans ce mémoire sont réalisés à l'aide de ce logiciel.

MATLAB® possède son propre langage inspiré du C, intuitif, et destiné à un large public. Avec ce dernier, on peut aussi faire des liaisons de façon dynamique, à des programmes C ou Fortran, échanger des données avec d'autres applications. En particulier, nous disposons d'un programme d'importation de données Excel, avec lequel les données ont initialement été enregistrées.

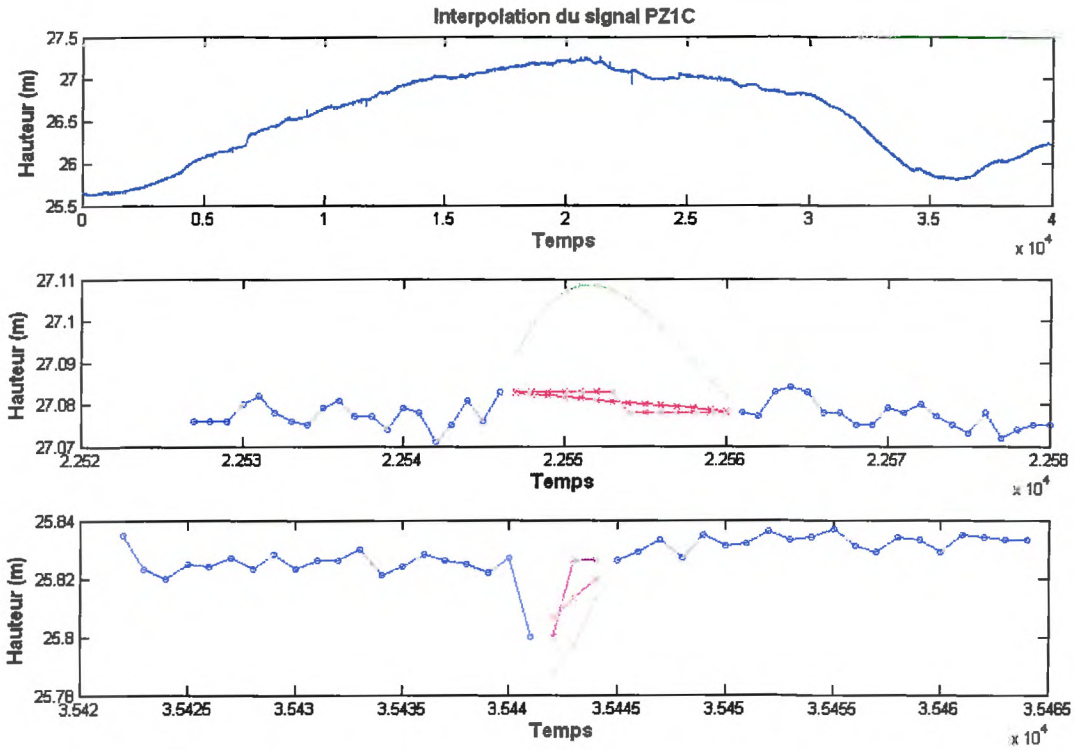
Des boîtes à outils supplémentaires, appelées Toolboxes (collections de fonctions MATLAB® à vocation spécifique), élargissent l'environnement pour résoudre des catégories spécifiques de problèmes. Les domaines couverts sont très variés. L'approche ouverte de MATLAB® permet de construire un outil sur mesure. On peut inspecter le code source et les algorithmes des bibliothèques de fonctions (Toolboxes), modifier des fonctions existantes et en ajouter d'autres. Dans notre cas, les programmes de routine de calcul utilisés sont issus de la bibliothèque de programmation de MATLAB® (Toolboxes : *Image processing, signal processing, wavelet, statistics*) et de programmes spécifiques développés dans l'équipe.

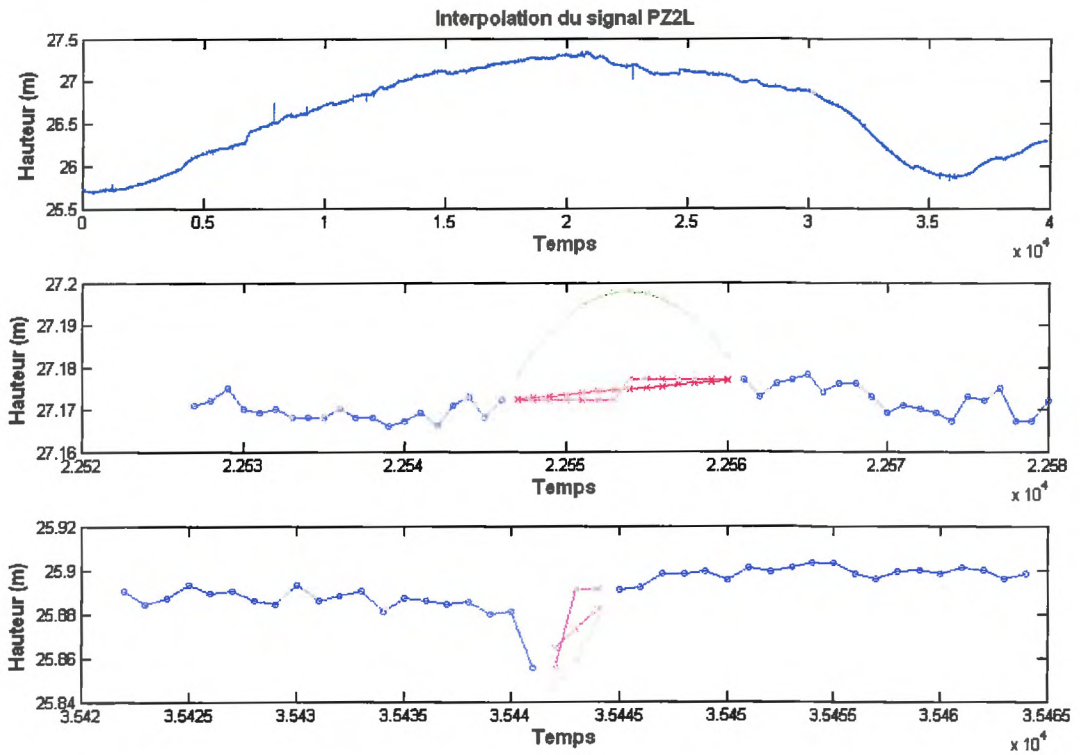
L'environnement de travail de MATLAB® est constitué de 3 fenêtres principales :



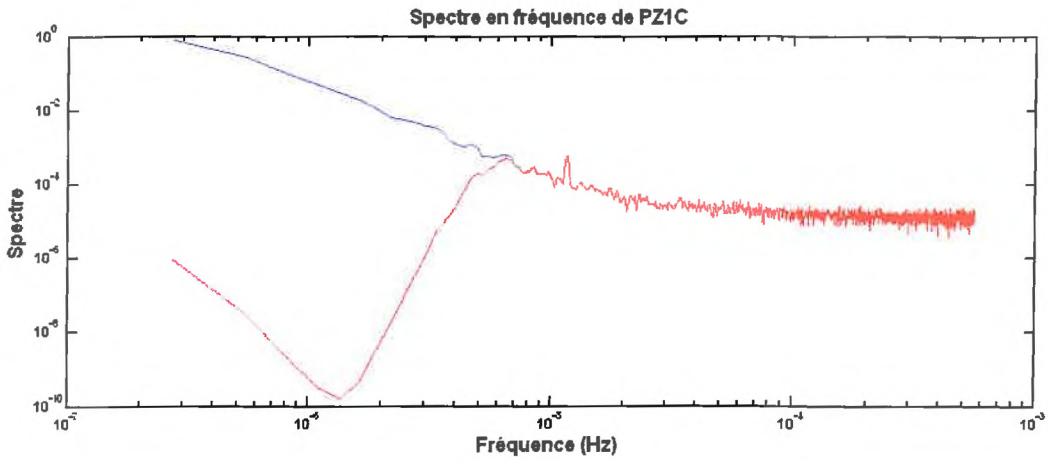
La fenêtre "de commande" sert à taper des lignes de commande qui font appel aux variables. La fenêtre "répertoire" permet de sélectionner notre dossier de travail. La fenêtre "variables" affiche les différentes variables actives avec leurs caractéristiques et la fenêtre "historique" permet la sauvegarde des commandes écrites précédemment.

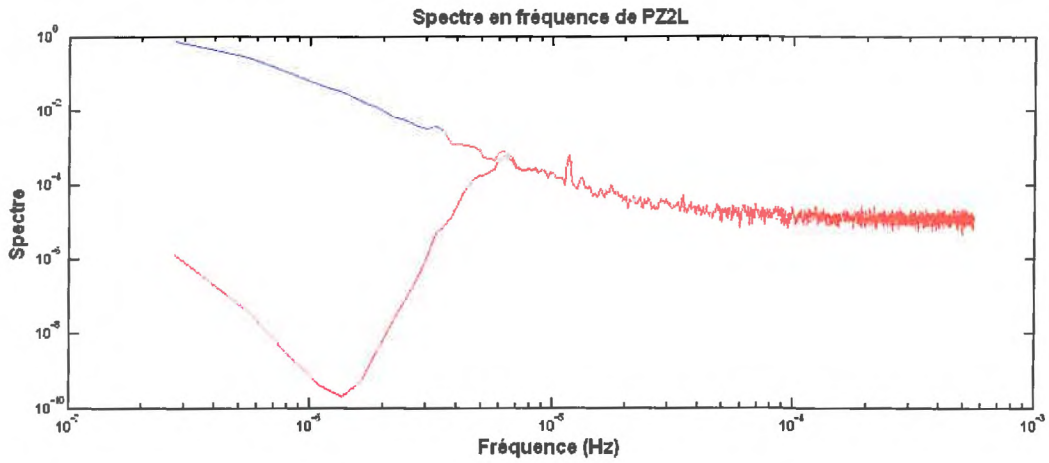
Annexe 5 : Interpolation des signaux PZ1C et PZ2L



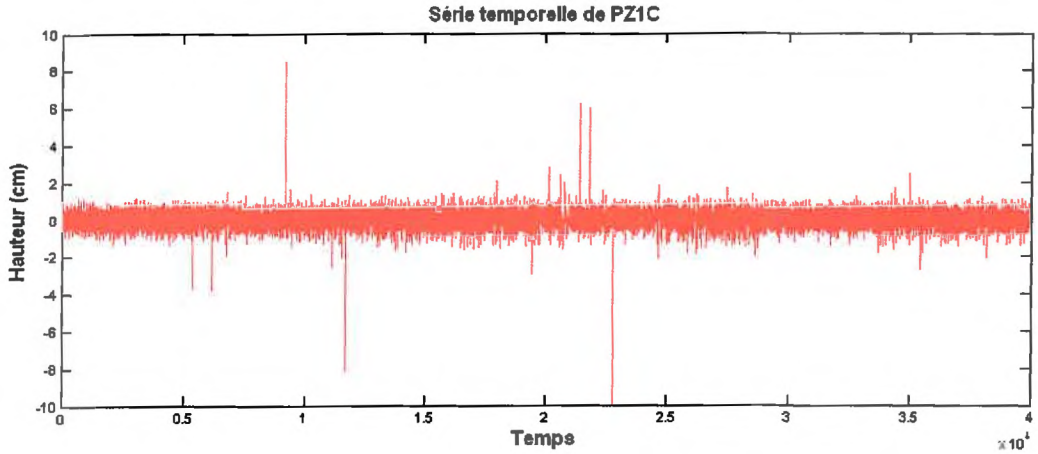


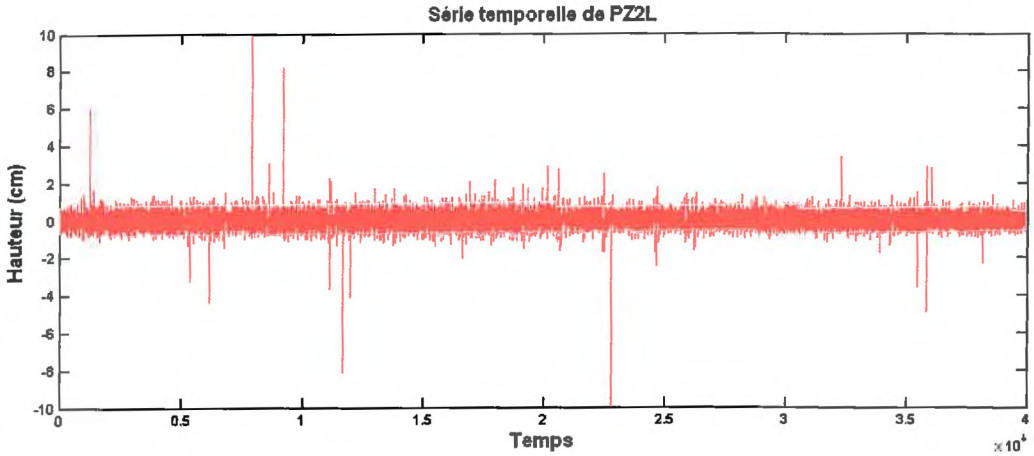
Annexe 6 : Filtrage par transformée de Fourier – spectres bruts et spectres filtrés de PZ1C et PZ2L

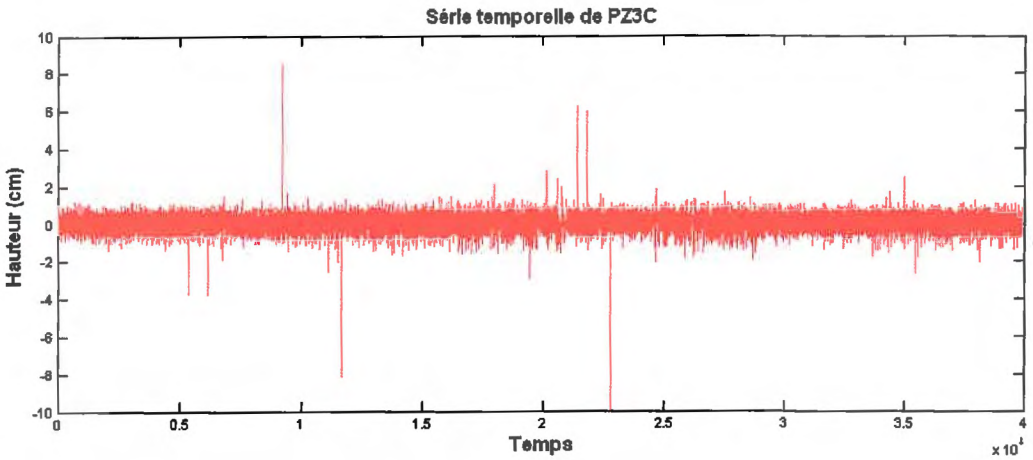




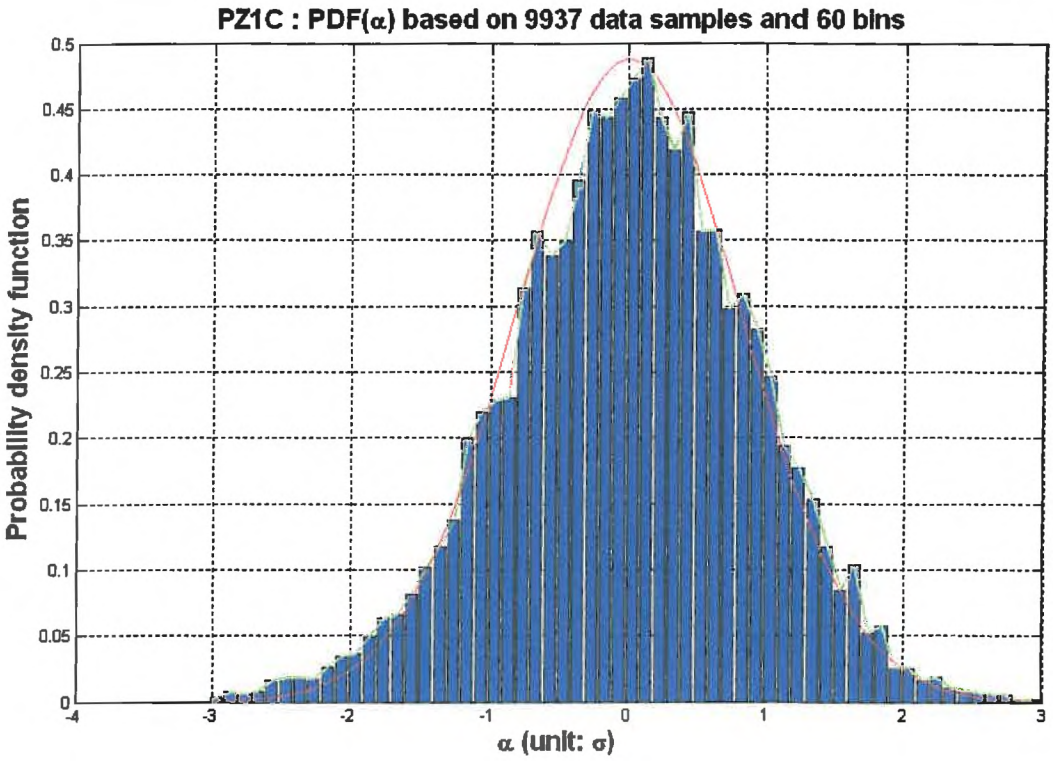
Annexe 7 : Filtrage par transformée de Fourier - Séries temporelles de PZ1C, PZ2L et PZ3C

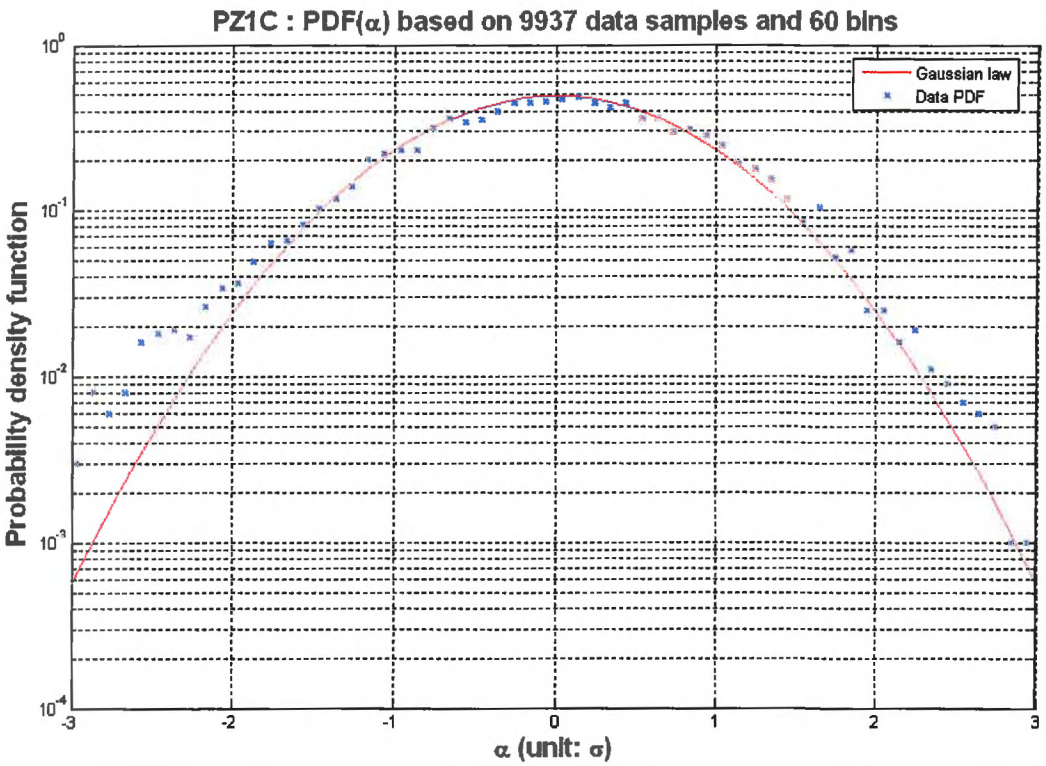




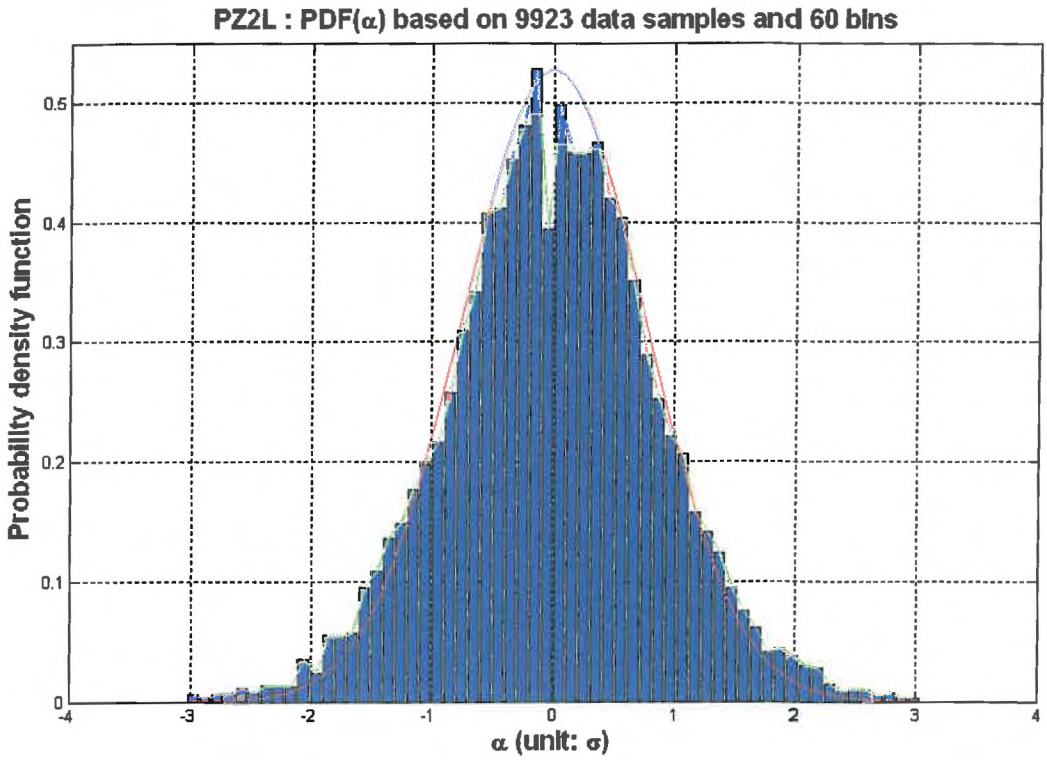


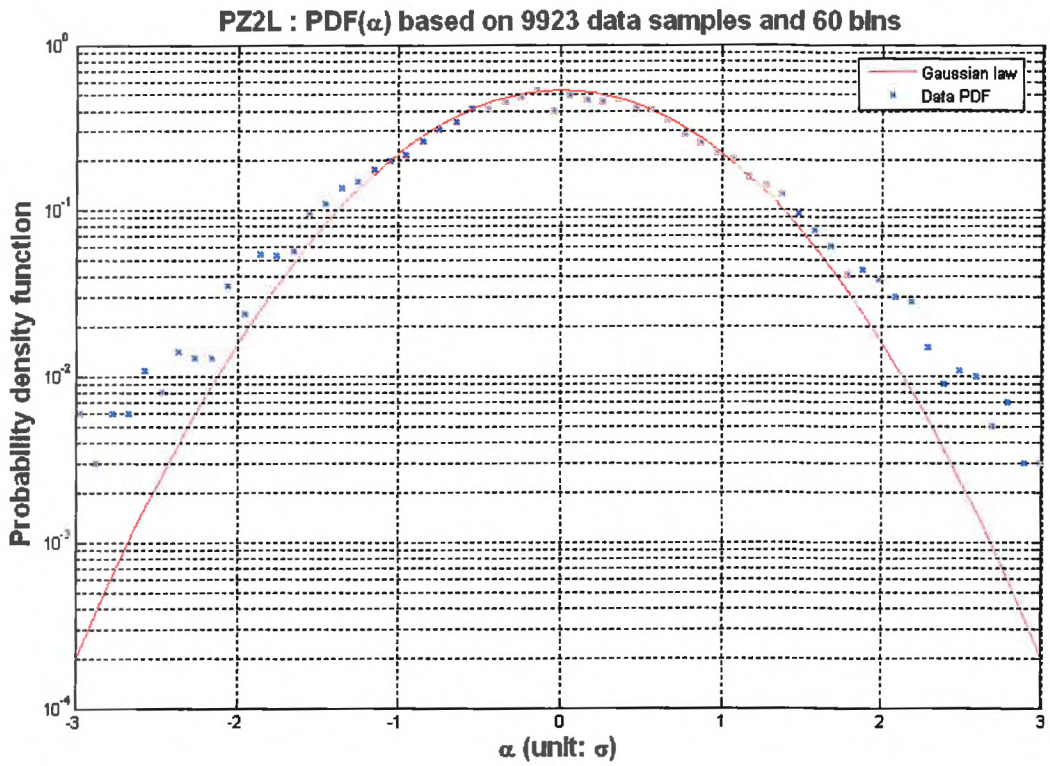
Annexe 8 : Histogramme de PZ1C et représentation logarithmique de sa distribution de probabilité



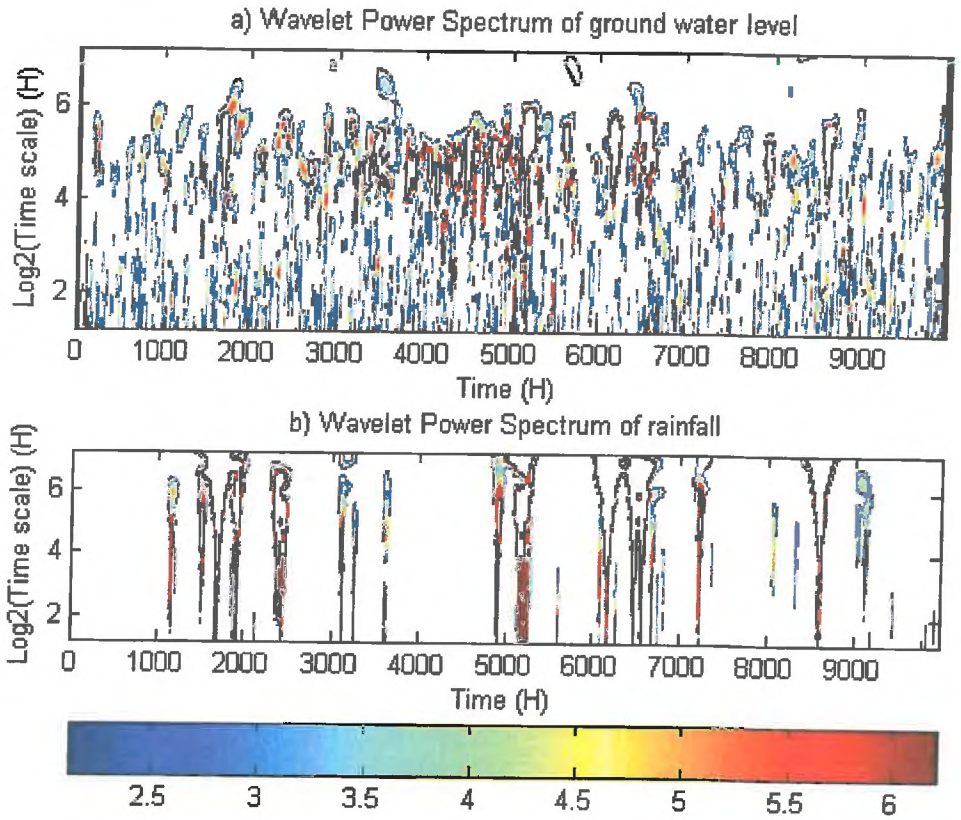


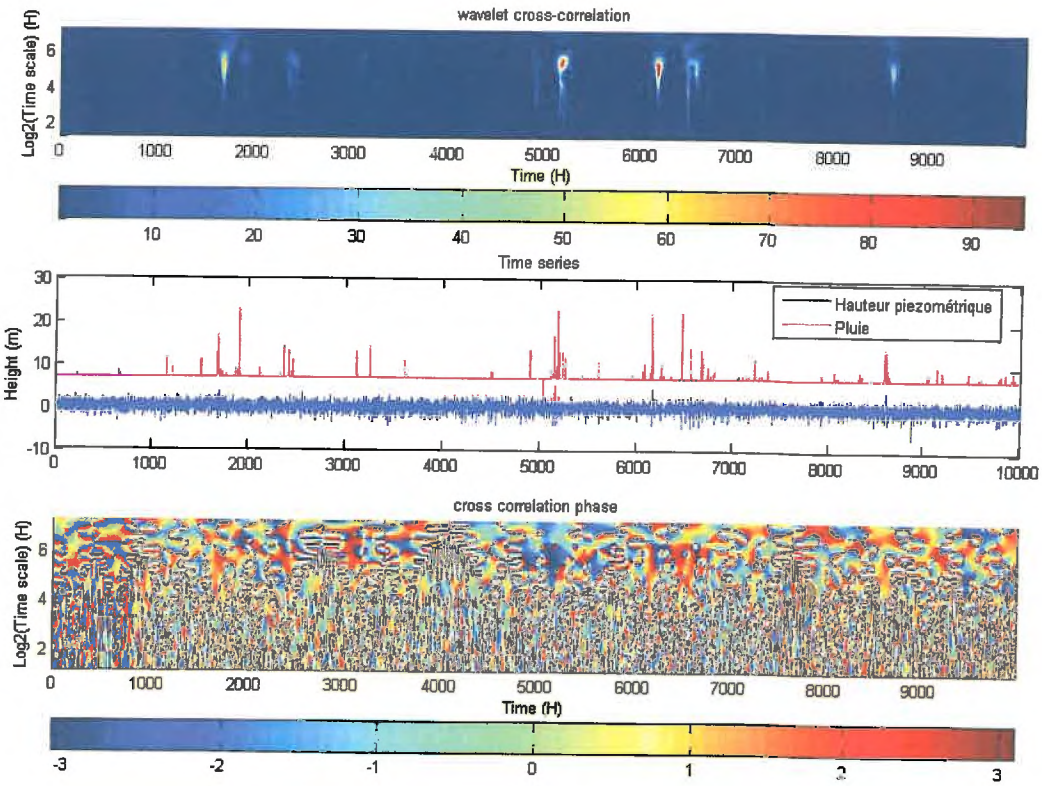
Annexe 9 : Histogramme de PZ2L et représentation logarithmique de sa distribution de probabilité



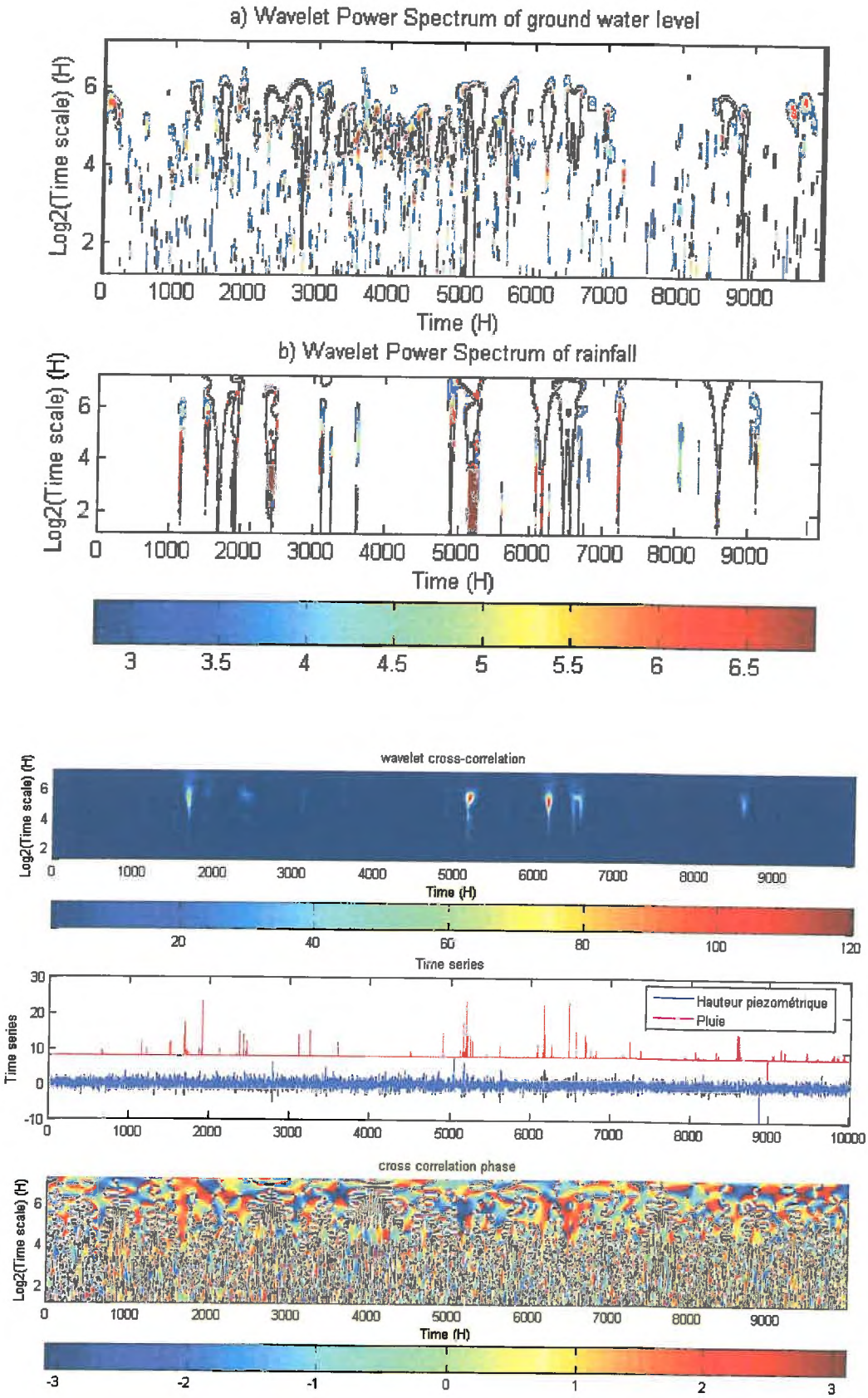


Annexe 10 : Scalogramme de PZ1C et corrélation croisée avec le signal pluviométrique





Annexe 11 : Scalogramme de PZ2L et corrélation croisée avec le signal pluviométrique



Références bibliographiques

ADDISON, P.S., WATSON, J.N., & TONG F. 2002. *Low-oscillation complex wavelets.* Journal of Sound and Vibration, 254, pp. 733-762.

BOGNER, C. 2003. *Infiltrations préférentielles dans les sols agricoles, traçage naturel de l'eau et essais de modélisation.* Rapport de stage, Magistère interuniversitaire 2ème année, 50 p.

BOGNER, C. 2004. *Hydrodynamique et Hydrochimie de la nappe alluviale à la confluence Rhône-Durance.* Mémoire de DEA de l'Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 38 p.

BURNS, E. 1996. *Dispersivity determination and seawater intrusion of coastal aquifers.* Master Thesis, University of Nevada.

CIRON, P. 1992. *Étude hydrogéologique spécifique : TGV Méditerranée – Appréciation des effets de la voie nouvelle sur le champ captant d'Avignon-la-Saignone.* Rapport BRGM R 35747 PAC 4S 92, document non public, 37 p.

CROSBIE, R.S., BINNING, P. & KALMA, J.D. 2005. *A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method.* Water Ressources Research, 41, W01008, doi:10.1029/2004WR003007.

DAGNELIE, P. 1973. *Théorie et méthodes statistiques.* Ed. Les presses agronomiques de Gembloux, vol. 1, 378 p.

DEBNATH, L. 1995. *Integral transforms and their applications.* Ed. CRC PRESS, 480 p.

DI PIETRO, L., DOUSSAN, C., RUY, S., GAUDU, J.C., PERRIN, P., PALLUT, R. & RENARD, D. 2004. *Site atelier "Fontanille".* Rapport interne INRA n°1, document non public, 31 p.

GASQUET, C. & WITOMSKI, P. 2000. *Analyse de Fourier et applications : Filtrage, calcul numérique et ondelettes.* Ed. DUNOD, 355 p.

GRINSTED, A., MOORE, J.C. & JEVREJEVA S. 2004. *Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series.* Nonlinear Processes in Geophysics, 11, pp. 561-566.

HYDRO-GEOTECHNIQUE SUD-EST. 2002a. Compte-rendu d'investigations n°C/G/02/H/192/I/151.

HYDRO-GEOTECHNIQUE SUD-EST. 2002b. Compte-rendu d'investigations n°C/G/01/J/167/J/132.

JOELSON, M. 2004. *Wavelet analysis of hydrodynamic modulation of short waves energy by long wave.* Rapport technique, Office of Naval Research, document non public, 37 p.

LABAT, D., ABABOU, R. & MANGIN, A. 2001. *Introduction of wavelet analyses to rainfall/runoff relationship for a karstic basin : the case of Licq-Atherey karstic system (France).* Ground Water, 39, No. 4, pp.605-615.

LEVY, M., Berkovitz. 2003. *Measurment and analysis of non Fickian dispersion in heterogeneous porous media.* Journal of Hydrology, 64, pp. 203-226.

MATHEVET, T., MANGIN A. & LEPILLER, M. 2002. *Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-L'eau-Morte (Bauges, Savoie & Haute-Savoie, France).* Mémoire de DEA du laboratoire d'Hydrogéologie de MOULIS, 59 p.

MATLAB®. 2000. Getting *start with MATLAB® Version 6.* Manuel, Ed. The MATHWORKS Inc., 111 p.

MATLAB®. 2000. *Using MATLAB® Version 6.* Manuel, Ed. The MATHWORKS Inc., 738 p.

MANGIN, A. 1984. *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales.* Journal of Hydrology, 67, pp. 25-43.

MIOSSEC M.P. 2004. *Apport des Multi-Modèles pour la modélisation sur des bassins versants non jaugés.* Mémoire de DEA du CEMAGREF Antony, 43 p.

MONJUVENT, G. et AL. 1991. *Notice explicative de la feuille Avignon.* Carte géologique de la France à 1/50 000 feuille Avignon, Ed. BRGM.

MUDRY, J. 1989. *Révision des périmètres de protection du champ captant de la Saignone.* Expertise officielle pour le département du Vaucluse.

SADOWSKY, J. 1996. *Investigation of signal characteristics using the continuous wavelet transform.* Basic Research, 17, No. 3, pp. 258-269.

TORRENCE, C. et COMPO, G.P. 1998. *A practical guide to wavelet analysis.* Bulletin of the American Meteorological Society, 79, No. 1, pp. 61-78.

Sources documentaires

Banque ADES	www.ades.eaufrance.fr
Base fontaine	www.ate.tm.fr/fontaine
Chambre d'agriculture du Vaucluse	www.vaucluse.chambagri.fr
Glossaire International d'Hydrologie	www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/aglo.htm
Infoterre	infoterre.brgm.fr/eSIG/index.jsp
INRA d'Avignon	www.avignon.inra.fr/internet
INSA de Rouen, cours de traitement du signal	asi.insa-rouen.fr/enseignement/siteUV/tds
SDEC – Séminaire DIVER® du 8 juin 2006 à Avignon	
Wikipédia – L'encyclopédie libre	fr.wikipedia.org