# THÈSE

N° d'ordre :

**En vue de l'obtention du**

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

**Délivré par :** Institut National Polytechnique de Toulouse
**Discipline ou spécialité :** Hydrogéologie et Sûreté Nucléaire

---

Présentée et soutenue par
**Hassane FATMI**

# *Méthodologie d'analyse des signaux et caractérisation hydrogéologique :*

***application aux chroniques de données obtenues aux laboratoires souterrains du Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute-Marne***

---

**JURY**

| | |
|---|---|
| Moumtaz Razack | Université de Poitiers, HYDRASA |
| Israel Cañamon Valera | Universidad Politecnica de Madrid, Espagne |
| Paul Bossart | Consortium Mont Terri & Swisstopo, Suisse |
| Jacques Delay | ANDRA, LSM/HM, Bure |
| Jean-Michel Matray | Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire |
| Michel Quintard | Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse |
| Rachid Ababou | Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse |

---

**Ecole doctorale :** *Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace (SdU2E)*
**Unité de recherche :** *Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT)*
**Directeur(s) de Thèse :** *Rachid ABABOU.*

# *SOMMAIRE*

*Méthodologie d'analyse des signaux*
*et caractérisation hydrogéologique :*
*application aux chroniques de données obtenues aux laboratoires souterrains du Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute-Marne.*


**RESUME EXECUTIF**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**NOMENCLATURE ET UNITES**

**LEXIQUE ET CONVERSIONS DIVERSES**

**PARTIE 1 : LABORATOIRES SOUTERRAINS DE RECHERCHE DE TOURNEMIRE, DU MONT TERRI ET DE MEUSE/HAUTE-MARNE**

1 INTRODUCTION

2 PRESENTATION DES TROIS SITES MONT TERRI, TOURNEMIRE ET MEUSE/HAUTE MARNE

**PARTIE 2 : METHODES DE PRETRAITEMENT ET D'ANALYSE**

3 METHODES PRETRAITEMENT DES CHRONIQUES ATMOSPHERIQUES ET PIEZOMETRIQUES

4 METHODES D'ANALYSES STATISTIQUES DES SERIES TEMPORELLES

**PARTIE 3 : APPLICATION AUX CHRONIQUES DE PRESSIONS OBTENUES AU LABORATOIRE SOUTERRAIN DU MONT TERRI (SUISSE)**

5 APPLICATION DES METHODES D'ANALYSE AUX CHRONIQUES DU MONT TERRI (AVEC OU SANS PRETRAITEMENT).

6 ANALYSE DES EFFETS DU CREUSEMENT DE LA GALERIE 1998 (CAPTEURS PP1 ET PP2)

**PARTIE 4 : MODELES HYDRO-MECANIQUES / PORO-ELASTIQUES : APPLICATION A LA CARACTERISATION DES ARGILITES DES SITES DE MONT TERRI, TOURNEMIRE ET BURE**

7 MODELES EQUATIONNELS ET PARAMETRES HYDRO-MECANIQUES DES ARGILITES

8 CARACTERISATION HYDRAULIQUE PAR LES CHRONIQUES DE PRESSION PRETRAITEES OU NON (MONT TERRI)

**PARTIE 5 : SITE DE TOURNEMIRE : PRETRAITEMENT ET ANALYSES DES SIGNAUX DE PRESSION INTERSTITIELLE (FORAGE PH2)**

9 PRETRAITEMENT ET ANALYSES DES DONNEES DE PRESSION DU FORAGE PH2 A TOURNEMIRE

**PARTIE 6 : SITE DE MEUSE/HAUTE-MARNE : PRETRAITEMENT ET ANALYSES DE SIGNAUX DE PRESSION (FORAGE EST207)**

10 PRETRAITEMENT ET ANALYSES DE DONNEES DE PRESSION DU FORAGE EST207 (LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MEUSE/HAUTE-MARNE, ANDRA, FRANCE) LSM/HM

**CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**ANNEXES**

# *Avant-propos*

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au laboratoire de L'institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), et financé par l'institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN).

Arrivant au bout de cette thèse, il m'est agréable de remercier tous ceux qui n'ont pas hésité à me fournir ce qu'ils pouvaient comme aide et assistance.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse Rachid Ababou, qui a consacré à l'encadrement de ma thèse un temps et une disponibilité d'esprit considérables, j'ai été d'autant plus sensible que son emploi du temps est très chargé. J'ai ainsi largement pu profiter de sa grande acuité scientifique et de son enthousiasme indéfectible et communicatif pour le travail de ses étudiants. Je lui suis donc redevable d'avoir pu faire une thèse dans des conditions exceptionnelles.

Je remercie également Jean-Michel Matray, qui m'a accompagné tout au long de ce travail de thèse, au cours de longues et fructueuses discussions au téléphone et pour des corrections effectuées sur le mémoire de thèse. Je n'oublie pas de remercier sa direction, représentée par Denise Stammose, pour avoir accepté de financer cette thèse.

Je tiens à remercier Alain Mangin Directeur de recherche au Laboratoire Souterrain de Moulis, Saint-Girons (France) avec qui j'ai fait mon stage de Master et qui a commencé à m'apprendre les méthodes d'analyse des données.

Je remercie tous les membres du jury d'avoir accepté l'invitation à participer à mon jury de thèse : Moumtaz Razack. Professeur à l'université de Poitiers (France), Israel Cañamon Valera Professeur à l'université Polytechnique de Madrid (UPM), EUIT de Obras Publicas (Espagne), Paul Bossart. Directeur du Projet Mont Terri (Suisse), Jacques Delay Dirceteur Adjoint du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne LSM/HM (France), et Michel Quintard Directeur de recherche au CNRS (France).

Je remercie aussi Doris Barrau et Charlotte Joly pour les corrections d'orthographe et de grammaire effectuées sur le mémoire de thèse.

Je désire remercier mes parents. Je pense à ma mère : ses conseils et ses sacrifices sont gravés dans mon esprit et me guideront pour toute la vie ; à mon père ; sa patience et son soutien moral et matériel au long de mes études ont été pour moi d'un grand réconfort. Je pense aussi, à mes frères et soeurs pour leur compréhension et leur amour qui m'a donné la force de continuer.

## *Dedicaces*

*A Mes Très chers Parents*
*A Mes Frères et Mes sœurs*
*A Toute Ma Famille*
*A Tous Mes Amis*
*A Tous Ceux Qui m'ont Aidé*

*Je dédie ce travail*

# Table des Matières

## Méthodologie d'analyse des signaux et caractérisation hydrogéologique :

*application aux chroniques de données obtenues aux laboratoires souterrains du Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute-Marne.*


*Résumé exécutif* ..... 10

*Liste des figures* ..... 15

*Nomenclature et unités* ..... 22

*Lexique et conversions diverses* ..... 23

***Partie 1 :Laboratoires souterrains de recherche de Tournemire, du Mont Terri et de Meuse/Haute-Marne*** ..... 24

*1 Introduction* ..... 25

*2 Présentation des trois sites de Mont Terri, de Tournemire et de Meuse / Haute-Marne* ..... 28

2.1 LE LABORATOIRE DE RECHERCHE SOUTERRAIN DU MONT TERRI ..... 28
*2.1.1 Contexte géologique ..... 30*
*2.1.2 Contexte tectonique ..... 31*
*2.1.3 Caractéristiques de l'argile à Opalines (faciès argileux) ..... 31*
*2.1.4 Contexte hydrogéologique des argiles à Opalines ..... 33*
*2.1.5 Présentation du forage BPP-1 et du système de mesure au Mont Terri (pression, humidité, température) ..... 33*
2.2 LE LABORATOIRE DE RECHERCHE SOUTERRAIN DU TOURNEMIRE ..... 36
*2.2.1 Introduction ..... 36*
*2.2.2 Cadre géologique, structural, mécanique et hydrogéologique ..... 37*
*2.2.3 Objectifs et moyens mis en œuvre lors du test de creusement de la galerie principale de 2003 ..... 40*
2.3 LE LABORATOIRE DE RECHERCHE SOUTERRAIN DE MEUSE/HAUTE-MARNE ..... 41
*2.3.1 Introduction ..... 41*
*2.3.2 Le laboratoire de recherche de Meuse / Haute-Marne ..... 42*
*2.3.3 Propriétés du Callovo-Oxfordien et de son encaissant ..... 43*
*2.3.4 L'équipement et coupe géologique du forage EST207 ..... 44*

***Partie 2 : Méthodes de prétraitement et d'analyse des signaux*** ..... 46

*3 Méthodes de prétraitement des chroniques atmosphériques et piézomètriques* ..... 47

3.1 INTRODUCTION AU PRETRAITEMENT - POSITION DU PROBLEME ..... 47
3.2 OPERATIONS DE TRONCATION ET D'EXTRACTION ..... 48
3.3 RECONSTITUTION PRELIMINAIRE ET INTERPOLATION LINEAIRE ..... 48
3.4 FRACTIONNEMENT DES CHRONIQUES ..... 51
3.5 HOMOGENEISATION DES PAS DE TEMPS ..... 52
3.6 RECONSTITUTION DE LACUNES A L'AIDE D'UN PROCESSUS AUTOREGRESSIF ..... 53
*3.6.1 Etude du modèle de processus Auto-Régressif d'ordre 1 (AR1) ..... 53*
*3.6.1.1 Présentation du modèle AR1 ..... 53*
*3.6.1.2 Relation entre temps discret (AR1) et temps continu (Langevin) ..... 53*
*3.6.1.3 Formulation modèle AR1 et Thomas-Fiering. ..... 55*
*3.6.1.4 Caractérisation et identification statistique du processus autorégressif AR1 ..... 55*
*3.6.2 Tests de reconstitution de lacunes avec modèle AR1 (Δt constant) ..... 58*
*3.6.2.1 Introduction ..... 58*
*3.6.2.2 Méthodes d'identification du modèle AR1 ..... 60*
*3.6.2.3 Test de validation sur une chronique de Patm avec lacunes artificielles ..... 61*
*3.6.2.4 Conclusion partielle ..... 64*

*4 Méthodes d'analyses statistiques des séries temporelles* ..... 65

4.1 METHODES D'ANALYSE STATISTIQUE (VUE D'ENSEMBLE) ..... 65

4.2 FILTRAGES TEMPORELS (MOYENNE MOBILE, DIFFERENCIATION) ... 65
4.2.1 Moyenne mobile temporelle (filtre intégrateur linéaire) ... 65
4.2.2 Filtre de différenciation temporelle d'ordre 1 ... 67
4.3 METHODES D'ANALYSE CORRELATOIRE (UNIVARIEE ET CROISEE) ET FONCTION DE TRANSFERT TEMPORELLE ... 68
4.3.1 Fonction de corrélation ... 68
4.3.2 Déconvolution temporelle (causale, non causale) ... 69
4.4 ANALYSE SPECTRALE PAR TRANSFORMEE DE FOURIER UNIVARIEE ET CROISEE, GAIN FREQUENTIEL. ... 70
4.4.1 Analyse spectrale univariée (estimation de spectre avec filtrage) ... 70
4.4.1.1 TdF directe complexe d'un signal réel en temps continu ... 70
4.4.1.2 TdF-1 inverse d'un signal réel en temps continu ... 71
4.4.1.3 TdF de l'autocorrélation «W-K en temps continu » ... 72
4.4.1.4 TdF de l'autocorrélation «W-K en temps discret » ... 73
4.4.1.5 TdF de l'autocorrélation dans le cas d'une durée finie (fréquence discrète) ... 75
4.4.1.6 Filtres temporels pour l'estimation du spectre (filtre de Tukey) ... 75
4.4.2 Analyse spectrale croisée ... 80
4.4.2.1 TdF de la fonction de corrélation croisée «W-K en temps continu» ... 80
4.4.2.2 TdF de la fonction de corrélation croisée «W-K en temps discret» ... 81
4.5 METHODE D'ANALYSE EN ONDELETTES MULTIRESOLUTION ... 83
4.5.1 Décomposition d'un signal ... 83
4.5.2 Approximation et détail d'un signal ... 84
4.5.3 Utilisation de l'analyse en ondelette multirésolution ... 85
4.6 ANALYSE EN ONDELETTE CONTINUE DE MORLET (SCALOGRAMME) ... 86
4.7 METHODE D'ANALYSE PAR ENVELOPPE (TRANSFORMEE DE HILBERT) ... 88
4.7.1 Aperçu théorique ... 88
4.7.2 Définition de la transformée de Hilbert ... 89
4.7.3 Exemples des signaux synthétiques ... 89
4.7.4 Exemple : enveloppe de Hilbert d'un résidu de pression ... 91

***Partie 3 : Application aux chroniques de pressions hydrogéologiqu-es obtenues au laboratoire souterrain du Mont Terri (Suisse)*** ... 92

*5 Application des méthodes d'analyse aux chroniques du Mont Terri (avec ou sans prétraitement).* ... 93

5.1 INTRODUCTION : PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES (PIEZOMETRIQUES ET HYDROMETEOROLOGIQUES) ... 93
5.1.1 Présentation des données utilisées (piézométriques et hydrométéorologiques) ... 93
5.1.2 Transformation des pressions absolues en pressions relatives ... 94
5.1.3 Discussion de la relation Pabs(t) / Patm(t) et de Prel(t) ... 95
5.2 ANALYSE DES SIGNAUX DE PRESSION A L'ECHELLE MENSUELLE (SANS PRETRAITEMENT) ... 100
5.2.1 Analyse de Patm(t) à l'échelle mensuelle (non prétraitée) ... 100
5.2.2 Analyse de la pression relative dans PP1 à l'échelle mensuelle (non prétraitée). ... 103
5.3 ANALYSE DES CHRONIQUES DE PRESSION AUX ECHELLES DE TEMPS MULTI-MENSUELLES ET MULTI-ANNUELLES (AVEC PRETRAITEMENT) ... 104
5.3.1 Analyses du signal de pression atmosphérique sur 1.5 ans ... 105
5.3.2 Analyses du signal de pression relative dans BPP-1 sur 1.5 ans ... 108
5.3.3 Analyse de l'énergie de la pression relative selon les échelles de temps (ondelettes) ... 111
5.3.4 Chroniques de Pression absolue ... 112
5.3.4.1 Construction d'un résidu de pression par moyenne mobile, et analyses corrélatoire et spectrale ... 113
5.3.4.2 Construction et analyse d'un résidu de pression par ondelette multirésolution. ... 115
5.3.4.3 Analyse du résidu de pression absolue par Enveloppe (Transformé de Hilbert) ... 118
5.3.4.4 Analyses des chroniques d'humidité relative et de température du Mont Terri ... 119
5.4 CONCLUSION PARTIELLE ... 119

**6** *Analyse des effets du creusement de la galerie 1998 du Mont Terri via (capteurs PP1 et PP2)* 120

6.1 ANALYSE DE L'ETAPE PRE-EXCAVATION ... 122
6.2 ANALYSE DE L'ETAPE SYN-EXCAVATION ... 123
6.2.1 Analyse du résidu de pression par filtrage moyenne mobile ... 123
6.2.2 Analyse du résidu de pression par filtrage différentiel d'ordre 1 ... 125
6.2.3 Analyse du résidu par décomposition ondelette multirésolution ... 125
6.3 ANALYSE DE L'ETAPE POST-EXCAVATION ... 126
6.4 CONCLUSION PARTIELLE ... 126

***Partie 4 : Modèles hydromécaniques poroélastiques :application à la caractérisation des argilites des sites de Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute Marne*** ..... 128

*7 Modèles équationnels et paramètres hydro-mécaniques des argilites* ..... 129

7.1 RELATIONS HYDROMECANIQUES (CONTRAINTE-PRESSION), EFFICIENCE BAROMETRIQUE (B) EN FONCTION DE L'EMMAGASINEMENT SPECIFIQUE SS ET DE LA POROSITE EFFECTIVE ϕ ..... 129
7.2 OBSERVATIONS ET APERÇU THEORIQUE SUR LA MAREE TERRESTRE. ..... 133
*7.2.1 Géométrie d'un aquifère confiné (avec piézomètre d'observation)* ..... *137*
*7.2.2 Géométrie d'un aquifère non confiné (avec piézomètre)* ..... *138*
*7.2.3 Conclusions partielles* ..... *139*
7.3 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT SPECIFIQUE (SS) ..... 140
7.4 SYNTHESES DES PARAMETRES HYDRAULIQUES ET PETROPHYSIQUES OBTENUS DANS LA LITTERATURE (REVUE) ... ..... 144

*8 Caractérisation hydraulique par les chroniques de pression prétraitées ou non (Mont Terri)* 145

8.1 CARACTERISATION HYDRAULIQUE PAR LES CHRONIQUES PRETRAITEES ..... 145
*8.1.1 Emmagasinement spécifique.* ..... *145*
*8.1.2 Porosité effective.* ..... *150*
8.1 CARACTERISATION HYDRAULIQUE PAR LES CHRONIQUES NON PRETRAITEES ..... 153
8.2 CARACTERISATION PAR MODELE PORO-ELASTIQUE DE BIOT ..... 154
8.3 CONCLUSION PARTIELLE ..... 159

***Partie5 : Site de Tour-nemire : prétraitement et analyses des signaux de pression interstitielle (forage PH2)*** ... 161

*9 Prétraitement et analyses des données de pression du forage PH2 a Tournemire* ..... 162

9.1 INTRODUCTION ..... 162
9.2 DESCRIPTION DES DONNEES BRUTES DANS LES TROIS CHAMBRES ..... 162
*9.2.1 Phase pré-creusement* ..... *162*
*9.2.2 Phase du creusement* ..... *164*
9.3 ANALYSE DES PRESSIONS RELATIVES DANS PH2 ET DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE DANS LE TUNNEL DE TOURNEMIRE ..... 166
*9.3.1 Analyse pré-excavation de la galerie 2003* ..... *166*
*9.3.1.1 Pression atmosphérique* ..... 166
*9.3.1.2 Pression relative dans la chambre 1* ..... 167
*9.3.1.3 Analyse croisée Prel/Patm et calcule de BE dans la chambre 1* ..... 169
*9.3.2 Analyse pendant l'excavation de la galerie 2003* ..... *169*
*9.3.2.1 Pression atmosphérique* ..... 169
*9.3.2.2 Pression relative dans la chambre 1* ..... 171
*9.3.2.3 Analyse croisée Prel/Patm et calcul de l'efficience barométrique BE pour la chambre 1* ..... 173
*9.3.3 Analyse de la période post-excavation de la galerie 2003* ..... *173*
*5.3.4.5 Pression atmosphérique* ..... 173
*5.3.4.6 Pression relative dans la chambre 1* ..... 174
*5.3.4.7 Analyse croisé Prel/Patm et calcul de l'efficience barométrique BE dans la chambre 1* ..... 175
9.4 CONCLUSION PARTIELLE ..... 176
9.5 CARACTERISATION HYDRAULIQUE PAR LES CHRONIQUES PRETRAITEES (TOURNEMIRE) ..... 177
*9.5.1 Emmagasinement spécifique* ..... *177*
*9.5.2 Porosité effective* ..... *179*
9.6 CONCLUSION PARTIELLE PH2 TOURNEMIRE ..... 181

***Partie 6 : Site de Meuse/Haute-Marne :prétraitement et analyses de signaux de pression (forage EST207).*** ..... 183

*10 Prétraitement et analyses de données de pression du forage EST207 (laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, France)* ..... 184

10.1 INTRODUCTION ..... 184
10.2 DESCRIPTION DES DONNEES BRUTES DANS LES TROIS CHAMBRES (LSM/HM) ..... 184
10.3 TRANSFORMATION DES PRESSIONS ABSOLUES EN PRESSIONS CORRIGEES PAR ACF (LSM/HM) ..... 185
10.4 ANALYSE DES PRESSIONS CORRIGEES DU EST207 ET DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE (LSM/HM) ..... 186
10.5 CARACTERISATION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES DE LSM/HM PAR L'ANALYSE DES SIGNAUX DE PRESSION ..... 188
*10.5.1 Emmagasinement spécifique* ..... *188*
*10.5.2 Porosité effective* ..... *190*
*10.5.3 La sensibilité des résultats : méthodes de prétraitement* ..... *192*

10.6 CONCLUSION PARTIELLE (MEUSE/HAUTE-MARNE) ..... 195
*Conclusions générales et recommandations* ..... 196
CONCLUSIONS GENERALES POUR LES SITES D'ARGILITES ..... 196
RECOMMANDATIONS SPECIFIQUES A L'EXPERIENCE LP DU MONT TERRI ..... 200
PERSPECTIVES : ..... 201
*ANNEXES* ..... 203
*ANNEXE 1 :* ..... 204
*ANNEXE 2 :* ..... 215
*ANNEXE 3:* ..... 216
*ANNEXE 4:* ..... 219
*ANNEXE 5 :* ..... 228
*ANNEXE 6 :* ..... 230
*ANNEXE 7 :* ..... 233
*ANNEXE 8* : ..... 243
*ANNEXE 9 :* ..... 244
*REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES* ..... 245

## *Résumé exécutif*

Ce mémoire de thèse coïncide avec le rapport de recherche final effectué pour l'IRSN intitulé «*Méthodologie d'analyse des signaux et caractérisation hydrogéologique : application aux chroniques de données obtenues aux laboratoires souterrains du Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute-Marne* ». Ce rapport final complète et synthétise l'ensemble des résultats d'une étude IRSN/IMFT sur les méthodes de pré-traitement, d'analyse statistique et d'interprétation des chroniques hydrométéorologiques et hydrogéologiques, des formations semi-perméable, de type 'argilite' par l'analyse des pressions, températures et humidités relatives, mesurées dans. L'objectif est de caractériser les formations argileuses et dans l'atmosphère des galeries qui les traversent.

Le travail de thèse a été réalisé à l'IMFT, et dirigé par R. ABABOU (Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse). Cette a été suivi à l'IRSN par J.M. Matray (Ingénieur Chercheur à l'IRSN), dans le cadre des projets de l'IRSN « *Fonctionnement hydrogéologique des formations argileuses, semi-perméables par l'analyse des séries chronologique, de pression, humidité et température*» et du Mont Terri : «*Expériences 'HA' et 'LP'* respectivement *Hydrogeologic Analysis HA, et Long term monitoring of water Pressure*» pour lesquelles l'IRSN a participé (HA) ou participe encore (LP) au sein du consortium international du Mont Terri.

Ce rapport de thèse final fait suite à deux rapports d'avancement internes au projet. Le premier rapport d'avancement, notamment, a été diffusé par l'IRSN en 2007 sous le titre **«***Méthodologie de pré-traitement et d'analyse du signal. Application aux chroniques de données multi-variées obtenues au Mont Terri* **»**. Ce rapport portait sur les pré-traitements et pré-filtrages des chroniques hydrogéo-météorologiques, permettant de palier aux problèmes de : i) lacunes et aberrations, ii) homogénéisation des pas de temps, iii) séquençage et synchronisation des chroniques disponibles pour analyse simple et/ou croisée. Ces techniques peuvent mener à des reconstructions partielles de signaux. Par souci de complétude, certains éléments du rapport IRSN sur les « prétraitements » sont à nouveau développés et illustrés ici (sans aller dans tous les détails).

Noter que les étapes de prétraitement et d'analyse statistique des signaux sont présentées de façon découplée pour la clarté de l'exposé. Cependant, certaines techniques de filtrage utilisées en prétraitement, sont à nouveau utilisées dans le cadre de l'analyse des signaux de pression (prétraités ou séquencés) en vu de leur interprétation hydrogéologique.

Ce mémoire présente en première partie les forages et galeries des trois laboratoires souterrains de recherche pour lesquels une analyse et interprétation des données hydrogéologiques et hydrométéorologiques a été faite. Il s'agit en particulier des forages BPP-1 du Mont Terri, du forage PH2 de Tournemire, et du forage EST207 du site de Bure. Ces analyses ont pour but de caractériser le comportement hydro-mécanique de ce type de formation peu perméable.

Rappelons que les argilites sont des formations géologiques, dites semi-perméables, potentiellement utilisables pour le stockage profond des déchets radioactifs, en raison de leur très faible perméabilité et de leur capacité de rétention des radionucléides.

Les méthodes et les objectifs proposés dans la présente étude sont tout à fait pertinents par rapport aux objectifs des expériences menées dans les trois sites. Celles-ci ont pour

objet d'évaluer les propriétés hydrauliques *in situ* à moyen et long terme, et le fonctionnement hydrogéologique global du massif d'argilite, à partir de l'auscultation des pressions interstitielles et d'autres variables connexes. Dans le cadre de l'étude qui nous concerne, nous avons récupéré les données via l'IRSN qui a obtenu les agréments auprès du consortium du Mont Terri en tant que partenaire du consortium, et auprès de l'Andra via une demande spécifique[1] .

Les pressions interstitielles, exprimées en bars absolus, étudiées au Mont Terri sont celles mesurées dans les chambres de mesure PP-1 et PP-2 du forage BPP-1 réalisé au niveau de la niche PP (Porewater Pressure) du laboratoire souterrain. Le forage BPP-1 qui recoupe le faciès argileux de l'Argile à Opalines a été sélectionné car il permet d'accéder aux chroniques de pression interstitielle les plus longues mesurées entre le 17/12/1996 et le 30/06/2005. Cette période coïncide également avec la période d'excavation de la galerie 1998 située à moins de 5 m de la chambre PP1 du forage BPP1. La position particulière du forage a permis de suivre le comportement hydromécanique de l'argile à Opalines avant, pendant et après le creusement de la galerie lors d'une expérience dite de *suivi de creusement* ou « *Mine-by test* ».

Pour le site de Tournemire, situé en Aveyron nous avons sélectionné le forage PH2 réalisé dans l'encaissant Toarcien supérieur pour étudier le suivi du creusement de la galerie excavée en 2003. Ce forage isole 3 chambres de test situées respectivement à 1m, 4.5m et 10m de la galerie Est de 2003. Les résultats obtenus dans ce mémoire sont comparés à ceux obtenus au Mont Terri sur BPP-1. De plus, les données obtenues dans la formation semi-perméable du Toarcien du site de Tournemire (IRSN) étudié antérieurement à cette thèse (Fatmi H., A.Mangin, J.M.Matray**,** 2005) ont été réexaminées à la lumière des nouveaux outils et méthodes d'interprétation développées ici. Elles permettent notamment de comparer les mesures effectuées en zone saine à celles obtenues sur forages recoupant des fractures ayant produit de l'eau.

Enfin, pour le site de Meuse/Haute Marne le forage EST207 a été sélectionné car il permettait d'accéder à des chroniques de pression de interstitielle sur une grande partie de la colonne argileuse du Callovo-Oxfordien. Nous avons sélectionné la chambre 5 qui coupe la formation argilite et les chambres 1 et 11 situées dans les aquifères carbonatés encaissants Callovo-Oxfordien. Nous avons comparé l'analyse des données acquises dans les trois chambres de EST207 à celles des données acquises dans les formations « non perturbées » des sites de Mont Terri et Tournemire.

La deuxième partie du document présente les outils développés pour le traitement de ces chroniques au moyen d'outils mathématiques, après avoir effectué tous les prétraitements possibles (Rapport Annuel N°1 : *Méthodologie de prétraitement et d'analyse du signal. Application aux chroniques de données multi-variées obtenues au Mont Terri*), et d'en extraire, pour les pressions en particulier, les signaux susceptibles de renseigner sur le fonctionnement global de l'argilite à l'échelle du massif. L'idée sous-jacente initiale était que ces informations pouvaient alors être confrontées à celles acquises localement en forage (par exemple lors d'essais hydraulique) ou à d'autres valeurs obtenues par ailleurs (modélisation hydrodynamique) dans la littérature. Parmi les résultats obtenus, on notera une réponse différente des pressions interstitielles des

[1] Courriers à J Delay, (Dir.-adj du Laboratoire Souterain de Meuse/Haute Marne) en dates du 10/08/2005 et de 19/07/2005.

argilites selon le milieu auxquelles elles sont associées. Nous avons rencontré trois cas de figure :

- Premier cas : les données traitées sont associées à un milieu sain, les pressions mesurées sont des pressions de pore ou pressions interstitielles non perturbées par une quelconque perturbation. C'est le cas des forages BPP-1, PH2 avant excavation et du forage EST207 dans l'argilite (chambre 5). Dans ce cas, l'analyse met en évidence l'influence de la marée terrestre au niveau de la formation semi-perméable saine. Ceci démontre que dans ce cas les argilites du Mont Terri, de Tournemire et de Bure se comportent, *au moins partiellement*, comme des formations hydrogéologiquement captifves. La mise en évidence de la marée terrestre et de l'effet barométrique sur ces chroniques nous a permis d'estimer les coefficients d'emmagasinement spécifique et la porosité effective. Pour le site de Mont Terri, l'emmagasinement spécifique apparaît homogène dans le temps, avec une valeur de l'ordre de $\mathbf{10^{-7}\ m^{-1}}$, comparable aux données de *tests de forages* (*à un ordre de grandeur près*). La porosité effective est plus hétérogène, variant à peu près entre 1% (*ou même moins*) et 5%.

- Deuxième cas : Les données traitées sont associées à des fractures transmissives d'origine tectonique. Ce cas n'a été rencontré qu'à Tournemire. La marée terrestre est alors indécelable. Le milieu n'est plus « captif » et ne permet donc plus d'estimer ni emmagasinement spécifique ni porosité effective par nos méthodes basées sur les effets de compressibilité. Ce cas est déjà traité précédemment dans une autre étude ultérieure (Fatmi et al 2005).

- Troisième cas : Les données traitées sont associées aux perturbations d'origine anthropique liées au comportement hydro-mécanique de la roche lors du creusement de galeries. Les résultats montrent clairement l'existence de 3 phases pré-exacavation, syn-excavation et post-exacavation. Sur le forage PH2 (Tournemire) comme sur BPP-1 (Mont Terri), la montée de pression absolue lors du passage du front d'excavation (jusqu'à 9 bars de surpression), coïncide avec une diminution de l'emmagasinement spécifique d'un facteur 2 à 10 selon le forage et la position de la chambre. Idem pour la porosité effective dont la diminution importante (PH2(1), BPP-1) coincide sans ambigüité avec l'augmentation de la pression. C'est la première fois que la relation entre augmentation de pression et baisse de la porosité est clairement établie pour un essai in situ. Le suivi des pressions de PH2 montre que pour la chambre la plus proche, il pourrait y avoir eu déconfinement du milieu avec probablement rupture, alors que sur BPP-1, les marées ne sont que masquées mais demeurent présentes.

En conclusion, l'analyse des séries chronologiques des pressions interstitielles des trois sites étudiés nous a montré à quel point cette méthodologie d'analyse des signaux peut s'avérer utile pour :

- préciser le degré de confinement du milieu lorsque les marées sont présentes et en déduire ainsi les paramètres hydrauliques que sont l'emmagasinement spécifique et la porosité effective (en hypothése de compressibilité élastique).
- détecter un éventuel déconfinement du milieu lorsque la chambre de test rencontre une fracture ouverte, et suivre l'évolution à long terme des effets hydro-mécaniques couplés associés au creusement d'une galerie ou d'une alvéole.

Ce travail met en exergue de nombreuses perspectives quand à l'évaluation en grand des différentes propriétés hydrauliques, telles que l'emmagasinement spécifique et la porosité effective, mais aussi la perméabilité d'un massif peu-perméable. Il reste néanmoins également des améliorations à apporter aux interprétations des signaux de de pressions interstitielles et atmosphériques mesurées dans les trois sites.

*Mots-clés :* Mont Terri; Tournemire; Bure; argilite; argiles à Opalines; Callovo-Oxfordien, pression interstitielle; chroniques; séries temporelles; traitement des signaux; processus aléatoires; prétraitements; reconstitution; analyse corrélatoire ; analyse spectrale ; ondelettes multirésolution ; marées terrestres ; effet barométrique; compressibilité; porosité; emmagasinement spécifique; porosité effective; EDZ (Excavation Damaged Zone) perméabilité.

## *Title:*

*Signal analyzis methodology and hydrogeologic characterization :*
*application to time series collected at the underground research laboratories of Mont Terri, Tournemire, and Meuse/Haute-Marne.*


## *Abstract :*

This report presents a set of statistical methods for pre-processing and analyzing multivariate hydrogeologic time series, such as pore pressure and its relation to atmospheric pressure. The goal is to study the hydrogeologic characteristics of low permeability geologic formations (argilite) in the context of deep disposal of radioactive waste. The pressure time series are analyzed in relation with different phenomena, such as earth tides, barometric effects, and the evolution of excavated galleries. The pre-processing is necessary for reconstituting and homogenizing the time series in the presence of data gaps, outliers, and variable time steps. The preprocessed signals are then analyzed with a view to characterizing the hydraulic properties of this type of low permeability formation (specific storativity; effective porosity). For this sake, we have developed and used the following methods (implemented in Matlab): temporal correlation analyses; spectral/Fourier analyses; multiresolution wavelet analyses envelopes of random processes. This methodology is applied to data collected at the URL (Underground Research Laboratory) of the Mont Terri International Consortium (Swiss Jura), as well as some other data collected at the URL of IRSN at Tournemire (Aveyron) and at the URL of ANDRA (Meuse / Haute-Marne).



## *Key words:*

Pore pressure; argilite; signal pre-processing; random processes ; earth tides; barometric effect; specific storativity; effective porosity ; correlation analyses; spectral Fourier analyses; multiresolution wavelet analyses; EDZ (Excavation Damaged Zone); hydrogeology.

# *Liste des figures*

Figure 1: Emplacement du Laboratoires de Recherche souterrain du Mont terri et de ses galeries de recherche. ..... 29

Figure 2: Coupe géologique, montrant la forme anticlinale du Mont Terri traversé par le tunnel autoroutier long de 4 km permettant un accès à la formation de l'Argile à Opalinus, ainsi que les principales structures tectoniques rencontrées (d'après Schaeren et Norbert, 1989). ..... 30

Figure 3: Situation du forage BPP-1 dans la niche PP excavée au niveau de la galerie de reconnaissance du laboratoire souterrain du Mont Terri URL (Underground Research Laboratory). ..... 34

Figure 4: Schéma et photo du dispositif PP installé dans le forage BPP1 (Thury and Bossart, 1999). ..... 35

Figure 5: Coupe géologique générale de la station expérimentale IRSN de Tournemire avec la localisation des galeries. ..... 39

Figure 6: Détail de l'instrumentation hydraulique (forage PH2) et mécanique (sections de convergence et forages M4 et M5 dédiés aux mesures de déplacement) de la galerie principale de 2003. Les chambres de mesure de pression 1, 2 et 3 du forage PH2 sont situées respectivement à 1m, 4.5m et 10m de la paroi de la nouvelle galerie.les galeries et forages sont montrés en projection horizontale. Le forage PH2 est sub-orizontale à -2°. ..... 41

Figure 7: Localisation des forages de mesures dans les argilites du Callovo-Oxfordien et aquifer encaissant (Delay et al., 2006). ..... 43

Figure 8: Présentation de l'équipement mis en place dans EST207 et de la formation géologique associée (d'après Note technique Andra D PL ADPE 05-0187/A.). ..... 45

Figure 9: Extraction de la sous séquence continue la plus longue (b) à partir de la chronique de Patm au Mont Terri comportant des lacunes (a), avec Δt variable, pour la période 02/04/1997-03/10/1997. ..... 48

Figure 10: Chronique de Patm du Mont Terri, avec Δt variable, avant détection des valeurs aberrantes, pour la période 02/04/1997-30/06/1998 ..... 50

Figure 11: Chronique de Patm avec Δt variable, après détection des valeurs aberrantes remplacées par des lacunes pour la période 02/04/1997-30/06/1998 ..... 50

Figure 12: Courbe schématique montrant l'algorithme utilisé pour la reconstitution des lacunes par interpolation linéaire avec le modèle 2. ..... 51

Figure 13: Algorithme de fractionnement de la chronique X(t) : par dichotomie, sur la base de la plus longue plage de lacune ..... 51

Figure 14 : Exemple de prétraitement d'un tronçon de 3 jours de la chronique PATM(t) du Mont Terri pour la période du 27/06/2005-30/06/2005 : comparaison de la chronique brute à Δt(i) variable avec la chronique « homogénéisée » à Δt0 constant (choix Δt0=3600 s) ..... 52

Figure 15 : Chronique de pression atmosphérique au Mont Terri, avec Δt=30min, pour la période 28/05/2004-29/07/2004. ..... 61

Figure 16: Chronique de pression atmosphérique montrant la plage des lacunes artificielles (Nlac=192), avec Δt=30min, pour la période 28/05/2004-29/07/2004 ..... 61

Figure 17: Résidu $X_R(t)$ de la chronique de pression atmosphérique avec lacunes reconstituées par la moyenne X0(t) et Δt=30min, pour la période 28/05/2004-29/07/2004 ..... 62

Figure 18: Fonction d'autocorrélation Rxx(k) du résidu $X_R(t)$ de la pression atmosphérique avec Δt=30min, et M=±300Δt. ..... 62

Figure 19: Comparaison du signal reconstitué (XAR1(t)en rouge) et du signal d'origine (X(t)en bleu) (zoom sur la plage de lacunes : voir figure précédente). ..... 63

Figure 20: Calcul de la moyenne mobile pour une chronique aléatoire de pression atmosphérique de pas de temps Δt (i). ..... 67

Figure 21: Formes de filtre D(j) dans l'espace temporel des délais discrets (j)( A. Mangin, comunication personnelle). ..... 76

Figure 22 : Ce schéma illustre certains aspects de l'échantillonnage d'un signal en temps discret sur une fenêtre d'observation temporelle de taille finie. ..... 79

Figure 23: Signal synthétique $y_0(t)$ et son enveloppe R(t) par méthode de Hilbert. ..... 90

Figure 24: Signal synthétique y2(t) et son enveloppe R(t) par méthode de Hilbert..... 90

Figure 25: Signal synthétique y1(t) et son enveloppe R(t) par méthode de Hilbert..... 90

Figure 26: Evolution du résidu Xr(t) par ondelette de pression absolue mesurée dans PP1, en bleu, et son enveloppe de Hilbert R(t) en rouge, pour la période 29/01/2004-12/04/2005 (14 mois) avec un pas de temps d'1/2 heure. ..... 91

Figure 27: Zoom sur la figure précédente (du 29/05/2004 au 26/07/2004) montrant le résidu ondelette et son enveloppe évolutive de Hilbert R(t). ..... 91

Figure 28: Chroniques des pressions absolues non prétraitées et mesurées dans les chambres PP1 et PP2 du forage BPP-1, sur une durée d'environ 9 ans (du 17/12/1999 au 30/06/2005). ..... 93

Figure 29: Fonction d'intercorrélation de la composante d'ondelette à 24h entre la pression atmosphérique et le résidu de la pression interstitielle mesurée dans PP1 entre le 18/05/2004 et le 23/09/2004 (délai maximal : M=300Δt, Δt=30min)..... 95

Figure 30: Fonction de phase entre la pression atmosphérique et la pression absolue mesurée dans PP1 entre les 29/01/2004 et le 12/04/2005 (durée: 1.5 ans). ..... 96

Figure 31: Ce schéma montre la méthode utilisée pour calculer la pression relative à partir de la pression interstitielle absolue (*pore pressure*) et de la pression atmosphérique, avec prétraitement (reconstruction) tenant compte de possibles lacunes et aberrations dans les chroniques brutes observées, Patm(t) et Pabs(t). ..... 99

Figure 32. Chronique de Patm(t) en kPa durant le mois d'août 2002. Période du 02/08/2002 au 04/09/2002,durée = 1440 Δt ≈ 1mois, Δt = 30min..... 101

Figure 33. Spectre réduit de ΔPatm(t), pression atmosphérique différentiée à l'ordre 1. Période du 02/08/2002 au 04/09/2002,(1mois), Δt = 30min. délai de coupure M=125 Δt , et k0=1. ..... 101

Figure 34. Analyse en log-log du spectre réduit de la pression atmosphérique brute: identification de l'exposant (β ≈ -1.40). Durée de la chronique ≈ 1mois (du 02/08/2002 au 04/09/2002), pas de temps Δt = 30 mn. ..... 102

Figure 35: Chronique de pression relative (kPa) dans PP1, avec Δt=30mn, du 02/08/2002 au 04/09/2002 (1 mois).104

Figure 36**:** Spectre réduit de la chronique ΔPP1(t) de pression relative différentiée à l'ordre 1 (Δt=0.5h, du 02/08/2002 au 04/09/2002) délai de coupure M=125 ; k0=1..... 104

Figure 37: Evolution de la pression atmosphérique (kPa) entre le 07/11/2003 et le 21/05/2005 après traitement. La durée du signal est 26929 Δt, au pas de temps 30 mn, soit environ 1 an, 6 mois et 16 jours au total..... 105

Figure 38**:** Spectre réduit de Patm en fonction de la fréquence adimensionelle. ..... 106

Figure 39: Analyse log-log du spectre réduit de Patm (durée : 26929 Δt)..... 106

Figure 40: Spectre réduit de Patm filtrée par différenciation d'ordre 1 de Patm (durée de la chronique : 26929 Δt avec Δt=0.5 h). Paramètres d'estimation spectrale : délai de coupure M=125 (nombe de pas de temps) ; k0=1. ..... 107

Figure 41: Scalogramme temps-échelle de Patm (ondelettes continues de Morlet). Durée de la chronique : 26929 Δt, avec Δt=0.5 h. ..... 107

Figure 42: Pression relative (kPa) dans la chambre de mesure PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005(durée : 20736 Δt ~ 14mois avec Δt=0.5h ). ..... 108

Figure 43: Spectre réduit de PP1(t) en fonction de la fréquence normalisée (durée : 20736 Δt) avec Δt=0.5h. ..... 109

Figure 44: Analyse en logspectre de pression relative dans PP1(t),(durée : 20736 Δt) avec Δt=0.5h. ..... 109

Figure 45: Spectre réduit de la pression relative filtrée par différenciation d'ordre 1 (ΔPP1(t)). Durée du signal : 20736 Δt .avec Δt=0.5h. ..... 110

Figure 46: Scalogramme temps-échelle de la pression relative dans PP1 (ondelette continue de Morlet). Durée de la chronique : 20736 Δt, avec Δt=0.5 h. ..... 111

Figure 47: L'énergie de la pression relative dans PP1 et PP2 en fonction de l'echelle dyadique temporelle (en heures). Ces echelles vont de 2h à 352 j..... 112

Figure 48: Evolution de la pression absolue en kPa dans les chambres PP1 et PP2 entre 29/01/2004 et 12/04/2005 (durée : 20736 Δt)..... 112

Figure 49: Evolution du résidu par filtrage moyenne mobile de la pression absolue en kPa dans PP1 entre 29/01/2004 et 12/04/2005 (durée : 20736 Δt~14mois). ..... 113

Figure 50: Evolution de la moyenne mobile de la pression absolue en kPa dans PP1 et PP2 entre 29/01/2004 et 12/04/2005 (durée : 20736 Δt~14mois) avec Wt=6j..... 114

Figure 51: Fonction d'intercorrélation des composantes ondelettes 24h et 12h entre les pressions absolues de PP1 et PP2 (plage de délai [-M,+M] avec délai maximal :M=100 Δt). ..... 114

Figure 52: Zoom sur la Fonction d'intercorrélation des composantes 24h et 12h entre les pressions absolues de PP1 et PP2 (plage de délai [-M,+M] pour un délai maximal :M=20 Δt). ..... 114

Figure 53: Fonction de phase entre les pressions de pore dans les sections PP1 et PP2. La phase est exprimée en rad et la fréquence est adimensionelle. ..... 115

Figure 54 : Fonction de cohérence entre les pressions de pore dans les sections PP1 et PP2. ..... 115

Figure 55: Evolution du résidu de pression absolue en kPa dans PP1 entre 29/01/2004 et 12/04/2005 par la méthode ondelette multirésolution(C=5j et durée : 20736 Δt~14mois). ..... 116

Figure 56: Evolution des approximations de pression absolue en kPa dans PP1 et PP2 entre le 29/01/2004 et le 12/04/2005(C=5j et durée : 20736 Δt~14mois). ..... 116

Figure 57: Fonction d'intercorrélation des composantes ondelettes 24h et 12h entre pressions absolues de PP1 et PP2 (plage de délai [-M,+M] avec délai maximal :M=100 Δt). ..... 117

Figure 58: Zoom sur la fonction d'intercorrélation des composantes 24h et 12h entre les pression absolues de PP1 et PP2 (plage de délai [-M,+M] avec délai maximal :M=20 Δt). ..... 117

Figure 59: Comparaison entre les courbes obtenues par approximation et par moyennes mobile de pression absolue en kPa dans PP1 et PP2 du 29/01/2004 au 12/04/2005 avec C=5j et $W_t$=6j (durée : 20736 Δt~14mois). L'Approximation est représentée en rouge et la moyenne mobile en bleu. ..... 117

Figure 60: Evolution du résidu Xr(t) de la pression absolue dans PP1 calculé par moyenne mobile et son enveloppe déterminée par la méthode de Hilbert. ..... 118

Figure 61: Evolution du résidu Xr(t) de la pression absolue dans PP1 calculée par ondelette et son enveloppe déterminée par la méthode de Hilbert. ..... 118

Figure 62: Chronique des pressions absolues et relatives dans les chambres PP1 et PP2 pendant la période d'excavation de la galerie 1998 (03/10/97-30/06/98)..... 120

Figure 63: Evolution des distances entre la chambre PP1 et le front d'excavation de la galerie Ga98 en fonction du temps. A noter avec la distance minimale est de 4m. ..... 121

Figure 64 : Plan 2D du laboratoire souterrain de Mont Terri montrant la galerie Ga98 et le forage BPP-1. ..... 121

Figure 65: Chronique de pression relative dans PP1 Pré-excavation période (06/10/97-17/11/97)..... 122

Figure 66: Chronique de pression relative ΔPP1(t) filtrée par différenciation d'ordre 1 dans PP1 Pré-excavation période allant de 06/10/97 au 17/11/97). ..... 122

Figure 67: Spectre réduit de pression relative de pore en kPa de ΔPP1(t) Δt=30min. Délai de coupure M=125 pas de temps..... 122

Figure 68: Chronique de pression relative dans PP1, syn-excavation période (17/11/97-23/04/98). ..... 123

Figure 69: Residu de pression relative dans PP1 obtenue par filtrage moyenne mobile avec une demi-fenêtre de Wt=6h. La période syn-excavation allant du 17/11/97 au 23/04/98. ..... 123

Figure 70: Analyse en ondelettes continue de la pression relative dans PP1, période du 03/10/97 au 30/06/98. ..... 124

Figure 71: Spectre réduit du residu, filtrage par moyenne mobile de la pression relative de pore en kPa avec Δt=0.5h Délai de coupure M=125 pas de temps. ..... 124

Figure 72: Résidu du filtrage par différenciation d'ordre 1 de la chronique de Prel dans PP1, période syn-excavation allant du 17/11/97 au 23/04/98. ..... 125

Figure 73: Spectre réduit du résidu, filtrage par différenciation d'ordre 1 de Prel en kPa avec Δt=30min. Délai de coupure M=125 pas de temps. ..... 125

Figure 74: Résidu calculé par ondelette multirésolution, de la chronique de Prel dans PP1, période syn-excavation allant du 17/11/97 au 23/04/98. ..... 125

Figure 75: Spectre réduit du residu par ondelette multirésolution de Prel en kPa avec Δt=0.5h . Délai de coupure M=125 pas de temps.(composante de coupure C=5)..... 125

Figure 76: Chronique de pression relative PP1 post-excavation période du 23/04/98 au 31/05/98 avec Δt=0.5h... 126

Figure 77: Spectre réduit de pression relative différenciée en kPa, ΔPP1(t) Δt=0.5h. Délai de coupure M=125 pas de temps..... 126

Figure 78: schéma montrant l'effet de la contrainte exercée entre deux grains en contact..... 129

Figure 78a : Schéma à l'échelle mesoscopique d'un V.E.R (Volume Elémentaire Représentatif)..... 130

Figure 78b : Schéma à l'échelle microscopique des grains. ..... 130

Figure. 78c : Représentation d'un aquifère confiné séparé de la zone supérieure par une couche semi-perméable. Notation : ..... 131

Figure 79 : Représentation idéale d'un puits d'observation permettant l'accès à une cavité finie isolée par une formation semi-perméable..... 134

Figure 80: Représentation idéale d'un piézomètre d'observation dans un aquifère confiné (Bredhoeft, 1967). ..... 137

Figure 81 : Représentation idéale d'un piézomètre d'observation dans un aquifère libre (a,b) et confiné (c,d) (Freeze & Cherry 1979)..... 139

Figure 82: Analyse multirésolution de la pression relative du pore dans PP1 entre 29/01/04 et 12/04/05 Avec un pas de temps Δt=30min, k=1 . ..... 145

Figure 83: Analyse multirésolution de la composante 12h entre 29/01/04 et 12/04/05 avec Δt=30min de la pression relative du pore dans PP1 k=1, ΔH=0.06m..... 146

Figure 84 : Courbes d'emmagasinements spécifiques calculés par analyse du signal correspondant à trois composantes dyadiques 8h, 12h et 16h dans la section de mesure PP1. ..... 150

Figure 85: Fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative dans PP1 période allant du 27/02/2002 au 24/01/2003. ..... 153

Figure 86: Analyse multirésolution de la pression relative du pore dans PP1 entre 02/08/02 et 24/08/02 Avec un pas de temps Δt=30min, k=1. ..... 153

Figure 87: Analyse multirésolution de la composante 8h entre 02/08/02 et 22/08/02 avec Δt=30min de la pression relative du pore dans PP1, ΔH=0.058m..... 154

Figure 88: Evolution de l'emmagasinement spécifique et porosité effective corespondant à chaque période dans la section de mesure PP1 en fonction du temps (02/04/97 au 12/04/2005). ..... 160

Figure 89: Evolution de la pression interstitielle de PH2 dans les trois chambres de mesure 1,2 et 3..... 162

Figure 90: Evolution de la pression interstitielle dans les 3 chambres de mesure pré-excavation, syn-excavation et post-excavation avant changement du capteur de la chambre 1. ..... 163

Figure 91: Creusement de la galerie principale de 2003 montrant le tronçon bétonné et celui avec cintres métalliques et grillage en voûte. ..... 164

Figure 92: Evolution de la pression interstitielle dans le forage PH2 en fonction du temps avec le creusement de la galerie 2003. Noter que le capteur de la chambre 1 a dû être changé vers le 20 Juin 2003, en phase de creusement, pour accéder au maximum de pression enregistrée d'environ 1100kPa. ..... 165

Figure 93: Evolution de la pression atmosphérique avec un pas de 30 min ..... 166

Période anté-excavation (22/01/2003-10/05/2003)..... 166

Figure 94: Résidu de la pression atmosphérique calculé par filtrage de type différenciation d'ordre 1 (Période 22/01/2003-10/05/2003) ..... 167

Figure 95: Spectre réduit du résidu de la pression atmosphérique ΔPatm(t) en kPa (Δt=30min)..... 167

Figure 96: Evolution de la pression relative et sa moyenne mobile (wt=6h) avec un pas de 30 min dans le forage PH2 chambre 1 Période (22/01/2003-10/05/2003). ..... 167

Figure 97: Evolution du résidu de la pression relative dans le forage PH2 chambre 1 calculé par filtrage moyenne mobile (wt=6h) (Période 22/01/2003-10/05/2003). ..... 168

Figure 98: Spectre réduit du résidu de la pression relative en kPa avec Δt=30min. Délai de coupure M=125 pas de temps..... 168

Figure 99: fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative correspondante dans la chambre PH2(1) période (22/01/2003-10/05/2003)..... 169

Figure 100: Evolution de la pression atmosphérique avec un pas de 30 min pour la période du 10/05/2003 au 25/07/2003, *i.e.* pendant l'excavation. ..... 170

Figure 101: Chronique de la pression atmosphérique calculée par filtrage de type différenciation d'ordre 1. Période du 10/05/2003 au 25/07/2003. ..... 171

Figure 102: Spectre réduit du résidu de la pression atmosphérique ΔPatm(t) en kPa avec Δt=30min. Délai de coupure M=125 pas de temps. ..... 171

Figure 103: Evolution de la pression relative et sa moyenne mobile (Wt=6h) avec un pas de 30min dans la chambre 1 du forage PH2. Période du 10/05/2003 au 25/07/2003. ..... 172

Figure 104: Evolution du Résidu, calculé par filtrage moyenne mobile (wt=6h), de la pression relative de la chambre 1 du forage PH2 . Période du 10/05/2003 au 25/07/2003. ..... 172

Figure 105: Spectre réduit du résidu de la pression relative en kPa avec Δt=30min Délai de coupure M=125 pas de temps..... 172

Figure 106: fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative correspondante dans la chambre PH2(1) période du 10/05/2003 au 25/07/2003. ..... 173

Figure 107: Evolution de la pression atmosphérique avec un pas de 30 min. ..... 173

Période du 25/07/2003 au 21/02/2004 après excavation..... 173

Figure 108: Evolution de la pression relative et sa moyenne mobile (Wt=6h) avec un pas de 30 min dans la chambre 1 du forage PH2. Période du 25/07/2003 au 21/02/2004. ..... 174

Figure 109 :Evolution du Résidu, calculé par filtrage moyenne mobile (wt=6h), de la pression relative dans la chambre 1 du forage PH2. Période du 25/07/2003 au 21/02/2004. ..... 174

Figure 110: Spectre réduit du résidu de la pression relative en kPa (Δt=30min). ..... 174

Figure 111: fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative correspondant dans la chambre PH2(1) période du 25/07/2003 au 21/02/2004. ..... 175

Figure 112: Analyse multirésolution de la pression relative de la chambre 2 du forage PH2 entre le 07/02/06 et le 15/01/07 pour un pas de temps Δt=30min, k=1 ..... 177

Figure 113: Analyse multi résolution de la composante 12h entre 07/02/06 et 06/11/07 avec Δt=30 min de la pression relative de la chambre 2 du forage PH2. k=1, ΔH(Norm1)=0.031 m. ..... 178

Figure 114: Fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative dans PH2(2) période allant du 07/02/2006 au 06/11/2007. ..... 180

Figure 115: Chronique des pressions interstitielles absolues 'brutes' (sans pré-traitement) dans les trois chambres de mesure 1,5 et 11 du forage EST207..... 185

Figure 116: Evolution de la pression $P^*_{Corr}$ dans EST207 CH5, période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min. ..... 187

Figure 117: Evolution du résidu de la pression $P^*_{Corr}$ ΔPrel(kPa) dans EST207 chambre 5 période du 27/12/2004 au 13/07/2005. ..... 187

Figure 118: Spectre réduit de densité de variance de la pression $P^*_{Corr}$ après filtrage par différenciation d'ordre 1 avec Δt=30min, M=125 pas du temps..... 187

Figure 119: Analyse multirésolution de la pression relative dans EST207 CH5 période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min. ..... 188

Figure 120: Evolution de la pression corrigée dans EST207 CH5 pour les composantes dyadiques 8h et 16h , période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min ..... 189

Figure 121: Evolution de la pression corrigée dans EST207 CH5 pour la composante encadrée semi-diurne 12h période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min..... 189

Figure 122: Fonction de gain entre la pression atmosphérique et la pression corrigée dans EST207 CH5, période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min. ..... 191

Figure 123: Evolution de la pression $P^{*}_{Corr}$ dans EST207 CH1, période allant du 02/06/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min. ..... 192

Figure 124: Evolution de la pression atmosphérique (kPa) entre le 27/12/2004 et 13/07/2005 après prétraitement. au pas de temps 30 mn (prétraitment non satisfaisant). ..... 194

Figure 125: Evolution de la pression atmosphérique (kPa) entre 27/12/2004 et 13/07/2005 après prétraitement. au pas de temps 30 mn (nouveau prétraitement amélioré). ..... 194

Figure 126:Fonction de gain entre la pression atmosphérique et la pression corrigée dans EST207 CH5, période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min (prétraitement amélioré, zoom sur les fréquences (0 0.1). ..... 194

# *LISTE DES TABLEAUX*

**Tableau 1: Synthèse des caractéristiques de l'argile à Opalinus du Mont Terri (*d'après Pearson et al, 2003 ; Martin et al 2004 ; Van Loon et al, 2004*). ..... 32**

**Tableau 2: Composition minéralogique moyenne des argilites du Callovo-Oxfordien (IRSN, 2005 avait de l'institut de radioprotection sur le dossier 2005 Argile, Rapport DSUN°106 d'après le tableau 5 page 54/284.). ..... 43**

**Tableau 3: différentes valeurs du seuil testé en fonction des types des données ..... 49**

**Tableau 4: Moments statistiques pour chaque chronique de pression atmosphérique avec Δt=30 min période (28/05/2004-29/07/2004). ..... 64**

**Tableau 5: Liaison entre Patm(t) et Pabs(t). Méthode ACF2 : régression linéaire entre le résidu de Patm(t) et 'Pabs(t)' (*en fait le résidu par moyenne mobile*). Méthode ACF1: intercorrélation des composantes ondelettes à 24h des résidus de Patm(t) et 'Pabs(t)' (*en fait le résidu par moyenne mobile*). Méthode ACF: méthode utilisé dans la correction des effets de Patm. ..... 98**

**Tableau 6: Gain barométrique liant résidu Patm(t) et résidu Pabs(t). Méthode $ACF^{HF}2$ : régression linéaire entre ΔPatm(t) et 'ΔPabs(t)' (*en fait le résidu de par moyenne mobile*). Méthode $ACF^{HF}1$: intercorrélation des composantes ondelettes à 24h des résidus de Patm(t) et 'Pabs(t)' (*en fait le résidu par moyenne mobile).* ..... 99**

**Tableau 7: Comparaison des moments pour deux types de résidus. ..... 119**

**Tableau 8 : Synthèse des différentes porosités déterminées au Mont Terri dans le faciès argileux de l'Argile à Opalines. ..... 144**

**Tableau 9 : Synthèse des normes utilisées pour la détermination de l'amplitude des fluctuations de la composante 12 h. ..... 147**

**Tableau 10: Valeurs des emmagasinements spécifiques estimées pour différentes périodes dans la section de mesure PP1. ..... 148**

**Tableau 11: Valeurs des emmagasinements spécifiques estimées pour différentes périodes dans la section de mesure PP2. ..... 149**

**Tableau 12: Valeurs des porosités effectives calculées pour la section de mesure PP1. ..... 151**

**Tableau 13: Valeurs des porosités effectives calculées pour la section de mesure PP2. ..... 152**

**Tableau 14: Valeurs des emmagasinements spécifiques et de porosité dynamique déterminées à partir du modèle poroélastique de Biot pour la section de mesure PP1 ..... 157**

**Tableau 15 : Valeurs des emmagasinements spécifiques et de porosité dynamique déterminées à partir du modèle poroélastique de Biot pour la section de mesure PP2. ..... 158**

**Tableau 16: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 1 du forage PH2) ou PH2(1). ..... 179**

**Tableau 17: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 2 du forage PH2 ou forage PH2(2)) ..... 179**

**Tableau 18: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 3 du forage PH2 ou PH2(3) ..... 179**

**Tableau 19: Valeurs des porosités effectives dans la chambre 1 du forage PH2 ou PH2(1). ..... 180**

Tableau 20: Valeurs des porosités effectives dans la chambre de mesure 2 du forage PH2 ou PH2(2). ..... 181
Tableau 21: Valeurs des porosités effectives dans la chambre de mesure 3 du forage PH2 ou PH2(3). ..... 181
Tableau 22: Correction atmosphérique des mesures de pression du site de Meuse/Haute-Marne (d'après un extrait du rapport Andra D.RP.0HYN 07.001/A). ..... 186
Tableau 23: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 1 du Bathonien calcaire du forage EST207. ..... 190
Tableau 24: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 5 du Callovo-Oxfordien argileux du forage EST207. ..... 190
Tableau 25: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 11 de l'Oxfordien calcaire du forage EST207. ..... 190
Tableau 26: Valeurs des porosités effectives dans la chambre 1 du forage EST207 LSM/HM dans le Bathonien (Patm non filrée ; $P^*_{Corr}$ non filtrée) ..... 191
Tableau 27: Valeurs des porosités effectives dans la chambre 5 du forage EST207 LSM/HM dans le Callovo-Oxfordien (Patm non filrée ; $P^*_{Corr}$ non filtrée). ..... 191
Tableau 28: Valeurs des porosités effectives dans la chambre 11 du forage EST207 LSM/HM dans l'Oxfordien (Patm non filrée ; $P^*_{Corr}$ non filtrée) ..... 191
Tableau 29: Valeurs des porosités effectives et emmagasinement spécifique dans la chambre 1 du forage EST207 dans le Bathonien (test de sensibilité trois plages de mesure). Les valeurs marquées (*) sont particulèrement sujettes à caution (voir discussion dans le texte). ..... 192
Tableau 30 : Valeurs des porosités effectives et emmagasinement spécifique dans la chambre 11 du forage EST207 dans l'Oxfordien (prétraitement amélioré). ..... 193
Tableau 31: Valeurs des porosités effectives et emmagasinement spécifique dans la chambre 5 du forage EST207 dans l'Oxfordien (prétraitement amélioré). ..... 193

## *Nomenclature et unités*

| **Grandeur** | **Dimension** | **Symbole** |
|---|---|---|
| Temps | [T] | s |
| Longueur | [L] | m |
| Aire | $[L^2]$ | $m^2$ |
| Volume | $[L^3]$ | $m^3$ |
| Débit volumique | $[L^3][T^{-1}]$ | $m^3/s$ |
| Angle plan | [-] | rad |
| Quantité de matière | | mol |
| Concentration | | $mol/m^3$ |
| Masse | [M] | kg |
| Masse volumique | $[M][L^{-3}]$ | $kg/m^3$ |
| Volume massique | $[L^3][M^{-1}]$ | $m^3/kg$ |
| Débit massique | $[M][T^{-1}]$ | kg/s |
| Masse volumique de l'eau | $[M/L^3]$ | $kg/m^3$ |
| Module d'élasticité d'eau | $[M/LT^2]$ | $Kg/m.s^2$ |
| Accélération de la gravité | $[LT^{-2}]$ | $m/s^2$ |
| Concentration volumique | $[M][L^{-3}]$ | $kg/m^3$ |
| Vitesse | $[L][T^{-1}]$ | m/s |
| Accélération | $[L][T^{-2}]$ | $m/s^2$ |
| Taux de déformation | $[L^3/L^3]$ | $m^3/m^3$ |
| Vitesse angulaire | $[T^{-1}]$ | rad/s |
| Fréquence | $[T^{-1}]$ | Hz |
| Force | $[M][L][T^{-2}]$ | N |
| Moment d'une force | $[M][L^2][T^{-2}]$ | N.m |
| Contrainte et pression | $[M][L^{-1}][T^{-2}]$ | $Kg/m.s^2$ |
| Efficience barométrique | [l/l] ou [L/L] adim. | Pa/Pa |
| Viscosité cinématique | $[L^2][T^{-1}]$ | $m^2/s$ |
| Viscosité dynamique | $[M][L^{-1}][T^{-1}]$ | Kg/m.s |
| Perméabilité intrinsèque k | $[L^2]$ | $m^2$ |
| Transmissivité | $[L^2][T^{-1}]$ | $m^2/s$ |
| Coefficient d'emmagasinement spécifique Ss | $[L^{-1}]$ | $m^3/m^3/m$ |
| Coefficient d'emmagasinement S | [-] | $m^3/m^3$ |
| Porosité effective | $[L^3]/[L^3]$ | $m^3/m^3$ |
| Conductivité hydraulique K | $[L][T^{-1}]$ | m/s |
| Température | [ ] | °K |
| Diffusivité thermique | $[L^2][T^{-1}]$ | $m^2/s$ |

## *Lexique et conversions diverses*

*Lexique :*

- CEC : Capacité d'Echange Cationique
- De HTO : Coefficient de diffusion effectif de l'eau tritiée ($m^2.s^{-1}$)
- wt % : pourcentage pondéral (e.g. de minéraux)
- meq : milli-équivalent (1 mmol de charge électrique).
- Pa: Pascal
- rad: radian
- Hz: hertz
- Patm : pression atmosphérique
- Pabs : pression absolue
- Prel : pression relative
- HA : Hydrogeologic Analysis
- LP : Long term Pressure monitoring
- IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
- LSM/HM : Laboratoire Souterrain de Meuse /Haute Marne (Bure)
- BWG :Bundesamt fuhr Wasser under Geologie
- CH : Confédération Helvétique
- BPP : Borehole Pore Pressure
- ESS : extraction de sous-séquences continues
- D-ABER : Valeurs aberrantes
- M0 : moyenne constante globale
- MM : moyenne mobile
- AR1 : Modèle autorégressif d'ordre 1
- Ga98 : galerie 1998
- Ga2003 : galerie 2003
- PH2 : forage dans le site de Tournemire
- PP1 : chambre du forage BPP-1 dans le site de Mont Terri
- PP2 : chambre du forage BPP-1 dans le site de Mont Terri

*Conversions DIVERSES :*

- 1 bar =$10^5$ Pa
- 1Gpa=$10^9$Pa
- 1 bar =10 m de hauteur d'eau
- 1 jour = 86400 s =1440 min
- 1 ans ≈ (31 millions) s ≈ $3.1*10^7$ s

# *Partie 1 :Laboratoires souterrains de recherche de Tournemire, du Mont Terri et de Meuse/Haute-Marne*

# 1 Introduction

Ce mémoire de thèse intitulé « *Méthodologie d'analyse des signaux et caractérisation hydrogéologique : application aux chroniques de données obtenues aux laboratoires souterrains du Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute-Marne***»,** constitue également le rapport final d'une étude IRSN / IMFT initiée en mars 2005 sur les méthodes de pré-traitement, d'analyse statistique et d'interprétation des chroniques hydrogéologiques de massifs semi-perméables, les variables traitées étant la pression interstitielle et la pression atmosphérique, mais aussi, la température, et humidité de l'air.

Ce mémoire constitue, en particulier, la suite directe du premier rapport d'avancement, qui portait sur le pré-traitement et pré-filtrage des chroniques hydrogéo-météorologiques : problèmes de lacunes et d'aberrations, homogénéisation des pas de temps, problèmes afférents de séquençage et de synchronisation des chroniques disponibles pour l'analyse simple et croisée. Par souci de complétude, quelques éléments du rapport sur les « prétraitements » sont à nouveau illustrés ici (sans aller dans tous les détails). De plus, les techniques de filtrage utilisées en pré-traitement sont à nouveau développées ici, parfois plus systématiquement, dans le cadre de l'analyse et interprétation des signaux.

On présente ici, les résultats de l'analyse et de l'interprétation hydraulique des séries temporelles de pression absolu et atmosphérique, mesurées dans le site d'argile à Opalines du laboratoire de recherche souterrain du Mont Terri (Suisse). Les résultats de l'analyse et de l'interprétation hydrauliques des chroniques des pressions absolue (forage PH2) et atmosphérique dans le Laboratoire Souterrain de Tournemire et en fin les résultats de l'analyse des pressions interstitielles et atmosphérique dans le forage EST207 situé dans le Laboratoire Souterrain de Meuse /Haute Marne.

Les pressions absolues étudiées au Mont Terri sont celles mesurées dans les chambres de mesure PP-1 et PP-2 du forage BPP1 réalisé au niveau de la niche PP. Le forage BPP-1 a été sélectionné car il permettait d'accéder aux chroniques de pression interstitielle les plus longues (PP-1 et PP-2) mesurées entre le 17/12/1996 et le 30/06/2005. Cette période inclut la phase d'excavation de la galerie creusée en 1998, dont les effets seront étudiés plus particulièrement.

L'objectif du présent travail est de valoriser un ensemble des séries chronologiques de pression mesurée sur les trois sites d'argile compacte d'une sélection de forage en cherchant à terme :

- à évaluer les phénomènes (marées terrestres, pressions barométriques, précipitations, humidités…) affectant les mesures.
- à estimer les propriétés hydrauliques (coefficient d'emmagasinement spécifique, porosité effective…) de l'argile à Opalines autour de ce forage, puis de les comparer à celles estimées lors d'essais hydrauliques par pulse ou slug tests portant sur des périodes plus courtes.
- à analyser les effets du creusement des galeries et de l'évolution de la zone endommagée par l'excavation (ou 'EDZ') sur les pressions interstitielles.

Cependant, d'autres sites d'argilites ont été également analysés.

L'ensemble du mémoire est structuré comme suit.

Dans un premier temps sont présentés le contexte géologique et hydrogéologique des trois sites : (laboratoire souterrain du Mont Terri (Jura Suisse), laboratoire souterrain de Tournemire (Aveyron), et laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne (ANDRA).

On présente ensuite brièvement le forage BPP-1 et les chroniques de données exploitées. Les séquences les plus longues ont été obtenues à l'aide de prétraitements qui sont décrits plus en détail dans un rapport IRSN/IMFT précédent (Rapport N°1 Méthodologie de prétraitement et d'analyse du signal. Application aux chroniques de données multi-variées obtenues au Mont Terri). Parmi les pré-traitements mis au point on peut citer brièvement :

- Séquençages de chroniques lacunaires ;
- Reconstitution de lacunes ;
- Détection d'aberrations
- Homogénéisation des pas de temps.

Le chapitre suivant est consacré à une description relativement détaillée des outils mathématiques de traitement du signal utilisés dans ce rapport. Il s'agit d'un chapitre essentiellement méthodologique, même si les méthodes de traitement du signal décrites ici sont parfois illustrées directement sur les données du Mont Terri. Un certain nombre de méthodes de traitement et d'analyse des signaux exposées ici ont déjà été mises en œuvre sur le site de Tournemire (rapport IRSN DEI/SARG N° 04-24). Les méthodes exposées ici comprennent :

- l'analyse corrélatoire simple et croisée, la déconvolution et la fonction de transfert temporelle entre deux signaux dans l'espace des délais ;
- l'analyse spectrale (Fourier) simple et croisée dans l'espace des fréquences, le spectre de phase, le spectre de cohérence, et le gain fréquentiel ;
- l'analyse ondelette multi-résolution et ondelette continue (simple, croisée) ;
- divers procédés de transformation et filtrage des signaux étudiés (filtre différentiel, moyenne mobile);
- l'analyse de l'enveloppe d'un signal par transformée de Hilbert enveloppe de Cramer-Leadbetter.

Puis nous abordons l'exploitation systématique des séries chronologiques du Mont Terri (expérience HA). L'analyse des séries chronologiques du Mont Terri est séparée en deux parties par commodité :

- à court terme : séquences d'échelle de temps mensuelle (non prétraitées),
- à long terme : séquences d'échelle de temps annuelle ou multi-annuelle (obtenues moyennant certains prétraitements).

Dans ces analyses, on s'attache en particulier à mettre en évidence l'influence des fluctuations d'échelle de temps diurne et semi-diurne, ceci en vue de la caractérisation hydraulique du massif en relation (respectivement) avec :

- les effets barométriques (à dominante diurne), et
- les effets de marée terrestre (à dominante semi-diurne).

Un chapitre particulier est ensuite consacré à l'analyse de l'évolution de la pression interstitielle en relation avec le creusement de la galerie 1998, en différentes étapes :

- étape pré-excavation
- étape syn-excavation
- étape post-excavation

Il semble naturel, après ces différentes analyses de type « traitement du signal », de conclure par une interprétation hydraulique des signaux en vue de la caractérisation du comportement du massif d'argilite. Cependant, une telle interprétation repose en premier lieu sur un modèle mécaniste du massif d'argilite, modèle qui n'avait pas été suffisamment explicité jusqu'ici.

Le but du chapitre « *modèles équationnels et paramètres hydro-mécaniques* » est justement :

- d'expliciter les modèles simplifiés qui serviront à l'interprétation (concept d'emmagasinement spécifique, compressibilité volumique, etc.) ;
- mais aussi d'indiquer les limites de ces modèles simplifiés (perspectives : interprétation hydromécanique reposant sur des bases plus physiques).

La caractérisation hydraulique du massif du Mont Terri est ensuite présentée dans le chapitre suivant, à l'aide des concepts équationnels hydromécaniques. Les résultats obtenus *in fine* prennent essentiellement la forme de deux paramètres :

- le coefficient d'emmagasinement spécifique (élastique),
- la porosité effective (également élastique ou encore dynamique).

Ces deux paramètres sont déterminés grâce à l'analyse des signaux à partir des effets de marées terrestres et des effets barométriques, et ceci pour différentes plages temporelles *(ou même de façon évolutive).*

Ensuite un chapitre est dédié au prétraitement et à l'analyse des données de pression, mesurées dans trois chambres de test du forage PH2 situé dans la Station Expérimentale de Recherche de l'IRSN de Tournemire (Aveyron, France).

Un autre chapitre est dédié au prétraitement et à l'analyse des données de pression du forage EST207, situé au niveau du laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne (ANDRA France). On a choisi de traiter les pressions mesurées dans les chambres 1 et 11 qui coupent les aquifères carbonatés encaissants, et la chambre 5 situé dans l'argilite du Callovo-Oxfordien.

Enfin, le rapport est complété par :

- Une conclusion générale et perspective
- une liste de références bibliographiques, et
- plusieurs annexes techniques incluses à la fin du document.

Enfin un ensemble d'annexes complémentaires a été assemblé en un volume séparé (non inclus) pour compléter la documentation, rapport IRSN.

# 2 Présentation des trois sites de Mont Terri, de Tournemire et de Meuse / Haute-Marne

## 2.1 Le laboratoire de recherche souterrain du Mont Terri

Le laboratoire souterrain de recherche du Mont Terri est situé à côté de la galerie de reconnaissance (également appelée galerie de sécurité) du tunnel autoroutier (autoroute A16, Figure 1**)**, du Mont Terri, au nord ouest de la Suisse, près de la ville de St-Ursanne dans le Canton du Jura. Le tunnel long de 3962m traverse un anticlinal qui a été plissé au cours d'une période allant du Miocène terminal au Pliocène, c'est-à-dire entre 10 et 2Ma (Thury et Bossart, 1999).

Le laboratoire est situé dans les argiles à Opalinus (Aalénien inférieur), une formation mésozoïque constituée d'argilites ayant une épaisseur apparente d'environ 160m et affectée d'un recouvrement d'environ 300 mètres.

La galerie de reconnaissance recoupe sur une section de 243m de long, les Argiles à Opalinus qui ont un pendage de 20 à 60° vers le sud-ouest. Les premières expériences ont démarré en 1996, dans huit petites niches le long de la galerie de sécurité. En 1998, une galerie expérimentale était excavée puis aménagée pour la recherche. Cet ouvrage a été étendu en 2004. Une nouvelle galerie expérimentale a été réalisée en 2008.

Le laboratoire souterrain du Mont Terri est utilisé exclusivement à des fins de recherche. Le stockage de déchets nucléaires, même temporaire, y est prohibé. Les objectifs du laboratoire sont d'analyser les propriétés hydrogéologiques, géochimiques et géomécaniques d'une formation argileuse, ainsi que les modifications de ces propriétés induites par l'excavation de galeries, et d'évaluer et améliorer des méthodes d'investigations appropriées.

Le Laboratoire du Mont Terri, est géré par un consortium international composé en 2005 de 12 partenaires, dont l'IRSN. Ce consortium est supervisé (territorialement) par l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie / Bundesamt fuhr Wasser und Geologie (BWG) http://www.bwg.admin.ch de la Confédération Helvétique. Le Geotechnical Institute (CH) est chargé de la gestion du projet Mont Terri et de la supervision des travaux sur le site.

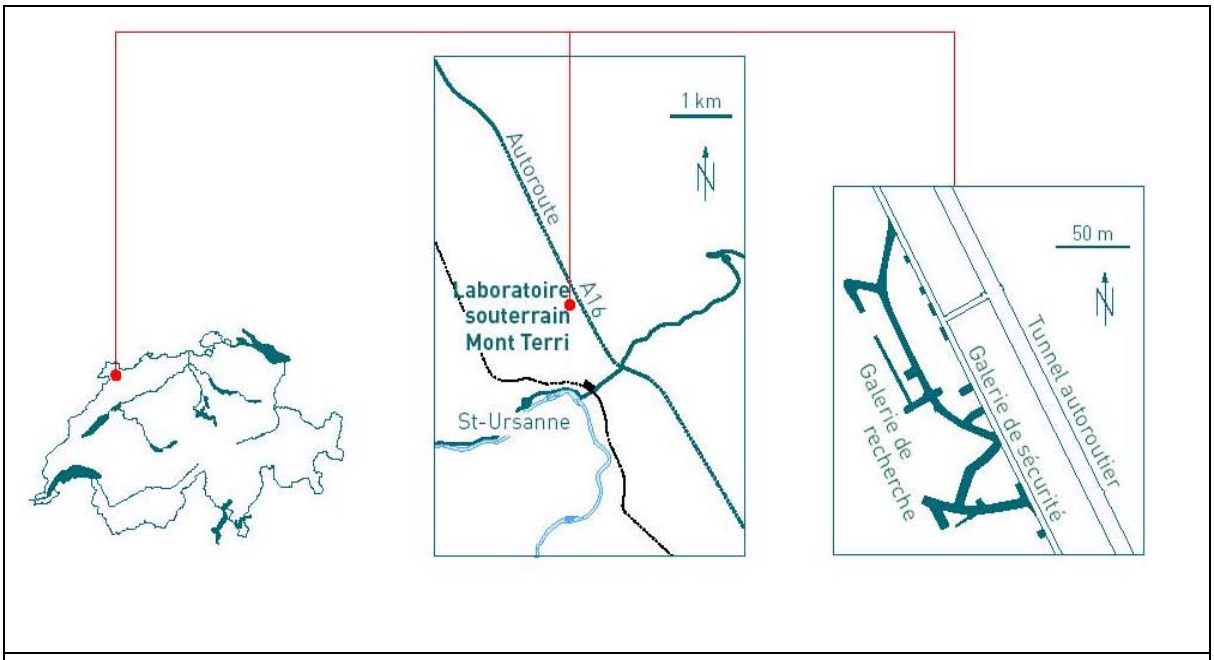



Figure 1: Emplacement du Laboratoires de Recherche souterrain du Mont terri et de ses galeries de recherche.

Le consortium décide chaque année d'un programme expérimental. Parmi les expériences de la phase 10, au démarrage de cette étude, on trouve HA (Hydrogeologic Analysis) qui était co-financée par 4 partenaires (NAGRA, BGR, **IRSN**, OBAYASHI). Cette expérience avait pour objectif le développement d'un modèle hydrogéologique conceptuel de l'argile à Opalinus à l'échelle du site.

Le modèle hydrogéologique devait inclure *in fine* tous les processus pertinents, les propriétés hydrauliques et hydromécaniques, et intégrer les conditions limites régionales. A ce titre, 'HA' était supposée analyser l'ensemble des données piézométriques acquises à ce jour par le biais des différentes expériences passées et en cours. Quelques traitements de séries temporelles ont été réalisés (*e.g.* analyse spectrale) et demandaient à être évalués. Mais dans l'ensemble, il existe encore de nombreuses données non exploitées.

En résumé, les méthodes et les objectifs proposés dans la présente étude sont tout à fait pertinents par rapport à l'expérience « HA » du Mont Terri.

Une sélection stricte des données disponibles a été faite eu égard au nombre important de forages instrumentés et suivis, pour certains, depuis des années. Il a été décidé de s'intéresser aux chroniques de pression absolue de l'eau interstitielle du forage BPP-1 (voir encadré ci-dessous).

**Le forage BPP-1.**

- Le forage BPP-1 a été réalisé le 9 Janvier 1997, en Phase 2 du projet Mont Terri.
- Position de la tête du forage : 579'363.66 / 247'693.40 / 515.63 m
- Position de la fin du forage : 579'346.00 / 247'684.01 / 515.63 m ;
- Position dans le laboratoire : SG 975.8 ; Longueur 20 m, Azimut : 242 ; Diamètre du forage : 101 mm.
- Technique de forage employée : « double core barrel » à l'air dans le faciès argileux de l'argile à Opalinus.

### 2.1.1 Contexte géologique

La coupe géologique simplifiée (Figure 2) montre le dôme asymétrique plissé de l'anticlinal du Mont Terri où affleurent les sédiments du Trias et du Jurassique. Trois faciès ont été identifiés au sein de l'Argile à Opalinus : 1) le faciès sableux, 2) le faciès sableux riche en carbonates et 3) le faciès argileux. L'argile à Opalinus (Freivogel, 2001 ; Schaeren et Norbert, 1989 ; Thury et Bossart, 1999) est encadrée par les marnes du Jurassique inférieur (Toarcien) en son mur, et elle est surmontée des carbonates du Dogger inférieur (Bajocien).

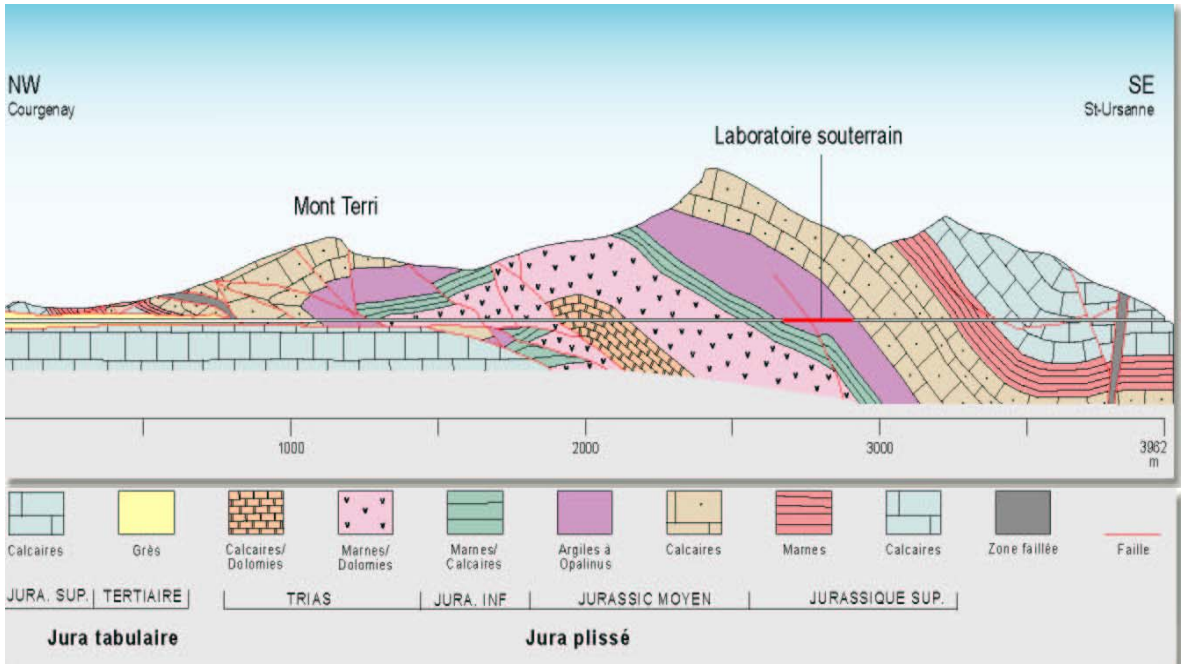



Figure 2: Coupe géologique, montrant la forme anticlinale du Mont Terri traversé par le tunnel autoroutier long de 4 km permettant un accès à la formation de l'Argile à Opalinus, ainsi que les principales structures tectoniques rencontrées (d'après Schaeren et Norbert, 1989).

### 2.1.2 Contexte tectonique

Les informations suivantes ne concernent que les principales zones fracturées reportées en Figure 2. Elles sont basées sur toutes les observations qui ont été faites lors des travaux d'excavation (orientation des plans de fractures, direction des stries de mouvement, rejets, etc.). On notera tout d'abord la complexité du secteur du point de vue tectonique, et l'interaction des différents accidents / chevauchements SW-NW, décrochements NE-SW, plongements axiaux qui ne permettent pas une représentation simple sur un seul profil. Cela dit l'anticlinal du Mont Terri peut être subdivisé en deux secteurs qui se distinguent par des degrés de fracturation très différents.

**Premier secteur** :

Le flanc sud est constitué d'une roche dans l'ensemble massive, il est recoupé par trois zones fracturées importantes :

- TM 3720 : Zone de brèche tectonique correspond à une réplique du décrochement du synclinal de St-Ursanne.
- TM 3340 à 3440 : Zone fracturée peu inclinée/ rétro-charriage en relation avec le redressement des couches de calcaires du Raubasine. Elle est la cause de la répétition des Couches de Liesberg au niveau des ouvrages.
- TM 2720 : Zone fracturée se situant dans les Argiles à Opalines. Elle correspond à des mouvements du type faille inverse. En direction du NW, elle évolue en chevauchement, ce qui explique l'augmentation d'épaisseur des Argiles à Opalinus.

**Deuxième secteur :**

Dès le Muschelkalk, le massif rocheux devient de plus en plus 'tectonique'. De nombreuses fractures de tension, échelonnées, ouvertes ou avec présence de gypse recristallisé, sont visibles. Le contact Nord entre les calcaires et dolomies du Muschelkalk et les Marnes à anhydrite du Keuper est d'origine tectonique. La présence d'accidents majeurs complexes, de type décrochement NE-SW au TM1925 et une série de chevauchements entre les TM 1850 et 1900, en sont la cause. L'ensemble de ces accidents a été représenté par une zone de brèche tectonique.

### 2.1.3 Caractéristiques de l'argile à Opalines (faciès argileux)

Il s'agit de roches argileuses formées, il y a 180 millions d'années, par sédimentation dans la mer jurassique. On y trouve de nombreux fossiles dont l'ammonite «Leioceras opalinum», qui tire son nom de sa coquille opalescente et qui a donné son nom à l'argile à Opalinus

Les principales propriétés du faciès argileux de l'argile à Opalinus peuvent être résumées dans le **Tableau 1** comme suit :

| | |
|---|---|
| Minéraux argileux (non gonflants) :<br>illite, chlorite, kaolinite | 55 wt % |
| Minéraux argileux gonflants : illite/smectite (interstratifié | 10 wt % |
| Quartz | 20 wt % |
| Calcite (principalement fragments de coquillages) | 10 wt % |
| Feldspath, siderite, dolomite, ankérite, pyrite | 5 wt % |
| Carbone organique | 0.2 wt % |
| Capacité d'Echange Cationique | 12 à 17meq /100g |
| Gonflement libre<br>(parallèle // et perpendiculaire ⊥ à la stratification) | 1%// ; 7 à 9 %⊥ |
| Retrait | 3-4 %⊥ |
| Minéralisation de l'eau de pore | 5-20 g/l |
| De HTO | $5.4\ 10^{-11} m^2 s^{-1}$ //<br>$1.4\ 10^{-11} m^2.s^{-1}$ ⊥ |
| **Tableau 1**: Synthèse des caractéristiques de l'argile à Opalinus du Mont Terri (*d'après Pearson et al, 2003 ; Martin et al 2004 ; Van Loon et al, 2004*). | |

L'argile à Opalinus, présente une très faible perméabilité ou conductivité hydraulique, de l'ordre de 1 à $5\times10^{-13}$ m/s (à ± 1 ordre de grandeur).

Elle présente de plus une capacité de rétention importante des radionucléides avec des CEC (Capacité d'échange cationique) élevées. La diffusion y est le mode de transport dominant avec des De HTO (coefficients de diffusion effectifs de l'eau tritiée) compris entre $5.4\ 10^{-11}$ et $1.4\ 10^{-11}$ $m^2.s^{-1}$, respectivement // et ⊥ à la stratification. Les radionucléides mobiles (e.g. tritium, iode-129, chlore-36…) diffusent plus rapidement que ceux présentant une capacité de sorption (e.g. césium, cobalt, strontium…). Ces radionucléides seraient effectivement libérés par les colis de déchet défectueux dans un stockage souterrain de déchets de haute activité à vie longue. La diffusion et la capacité de rétention sont étudiées dans le cadre d'expériences *in situ* et en laboratoire (e.g. DI-A, DI-B ou DR).

Cette formation géologique présente en outre une capacité d'auto-colmatage importante. En effet, les Argiles à Opalines gonflent en présence d'eau ou d'humidité. La conséquence de ce gonflement est la fermeture des fractures d'endommagement et de décompression liées à l'excavation des galeries et niches. Cet auto-colmatage réduit la perméabilité, rétablissant des propriétés proches de celles d'une roche saine. Ces processus font l'objet de plusieurs expériences depuis de nombreuses années.

Toutes ces propriétés favorables expliquent le choix de ce type de formation géologique par les autorités suisses comme objet d'étude en tant que roche hôte potentielle de leurs déchets radioactifs.

### 2.1.4 Contexte hydrogéologique des argiles à Opalines

Le projet du Mont Terri a fourni l'opportunité d'évaluer les procédures de test hydraulique de la formation des argiles à Opalines et de préciser le contexte hydrogéologique de la région du Mont Terri. Les méthodes d'investigation hydrogéologique appliquées entre 1996 et 2005 ont servi de base à l'élaboration d'une synthèse hydrogéologique du site (Marshal et al. 2004) avec 3 objectifs :

- évaluer les résultats des investigations hydrogéologiques à la fois en terme développement des techniques d'investigation et d'analyse des données ;
- développer un modèle conceptuel d'écoulement sur le site du Mont Terri ;
- développer un modèle conceptuel des mécanismes de migration des gaz dans l'argile à Opalines.

Le modèle hydrogéologique conceptuel préliminaire qui a été élaboré fait état de plusieurs unités hydrogéologiques d'intérêt pour le laboratoire souterrain du Mont Terri et son environnement. Parmi ces unités il faut citer :

- L'aquifère karstique du Dogger inférieur ;
- La formation des argiles à Opalinus qui représente un semi-perméable *a priori* très efficace contre l'écoulement ;
- Les marnes jurassiques et les argilites à Posidonie situées au nord, dont les propriétés hydrauliques ne sont pas encore bien établies.

La faille principale qui intercepte le laboratoire n'affecte en rien la fonction de barrière de l'Argile à Opalines.

La conductivité hydraulique (K) montre généralement de faibles variations spatiales et varie entre $2\ 10^{-14}$ et $2\ 10^{-12}$ m/s avec un emmagasinement spécifique (Ss) compris entre $2\ 10^{-7}$ et $3\ 10^{-5}$ $m^{-1}$ et les porosités totale entre 16% et 24% voir plus loin Tableau 8.

Des observations à long terme de la charge hydraulique montrent clairement un cône de dépression autour du système de galeries. Ainsi, l'aquifère du Dogger inférieur situé au sud (Figure 2) peut être considéré comme une limite à pression constante dans le système hydraulique du massif.

### 2.1.5 Présentation du forage BPP-1 et du système de mesure au Mont Terri (pression, humidité, température)

Dans cette section, on présente les principales chroniques étudiées dans ce rapport : il s'agit des pressions interstitielles dans le forage BPP-1, et de variables hydrométéorologiques mesurées dans la galerie de sécurité (pression, humidité et température de l'air).

Le forage BPP-1 (Figure 3) a été sélectionné car il permettait d'accéder à la chronique de pression la plus longue, c'est-à-dire entre le 17/12/1996 et le 22/05/2005.

Ce forage a été réalisé le 29/01/1997 en phase 2 du projet Mont Terri dans le but de développer et valider une technique et procédure de mesure de la pression de l'eau interstitielle dans des formations de très faible conductivité hydraulique et de très faible teneur en eau, et ce, au travers du système PP (Porewater Pressure).

Il s'agit d'un forage horizontal, de 101 mm de diamètre et foré à l'air au milieu de la niche PP. Le forage a été réalisé en 2 phases : 1ère phase jusqu'à 6 m de longueur pour

effectuer les tests préliminaires, puis jusqu'à 20 m de profondeur. Aucune indication de fissures n'était mentionnée, indiquant que le forage a été réalisé dans une zone saine.

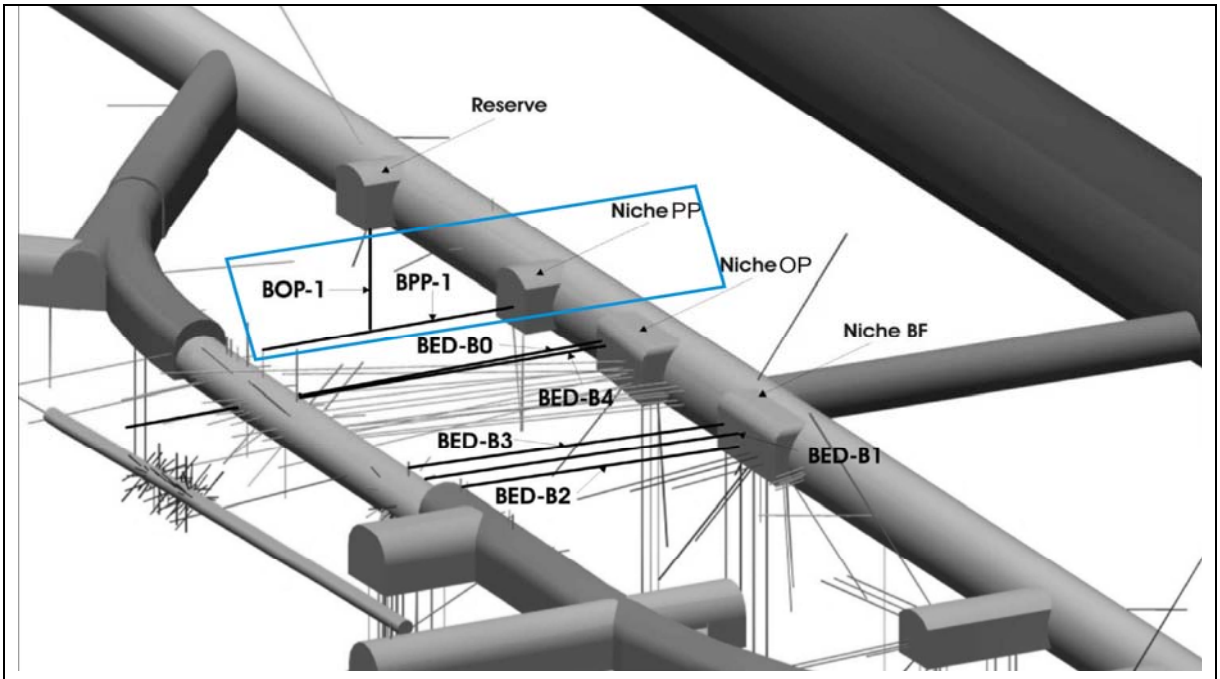



Figure 3: Situation du forage BPP-1 dans la niche PP excavée au niveau de la galerie de reconnaissance du laboratoire souterrain du Mont Terri URL (Underground Research Laboratory).

Le système PP qui équipe le forage BPP-1 a été développé lors des phases 1 et 2 (1996/1997) du projet Mont Terri (TN 97-01). Outre ce forage, ce système a été installé dans les forages BDI-1, BED-B1, BED-B2, BED-B3 et BGP-6. Ce système a permis d'isoler deux chambres de mesure :

- PP1 : située à 21.00 m par rapport à la tête du forage, pour une longueur et volume de la chambre de test de 0.152 m et 0.16 litre, respectivement.
- PP2 : située à 19.35 m par rapport à la tête du forage, pour une longueur et volume de la chambre de test de 0.23 m et 0.68 litre, respectivement.

Les chambres de mesure sont isolées au moyen d'obturateurs (ou '*packers*') mécaniques de taille 0.25 m (PP2) et 0.50 m (PP1). De la résine est injectée ensuite pour une meilleure isolation du dispositif, ce qui exclut toute possibilité d'enlever le système par la suite.

La Figure 4 montre le système PP tel qu'installé dans BPP-1.

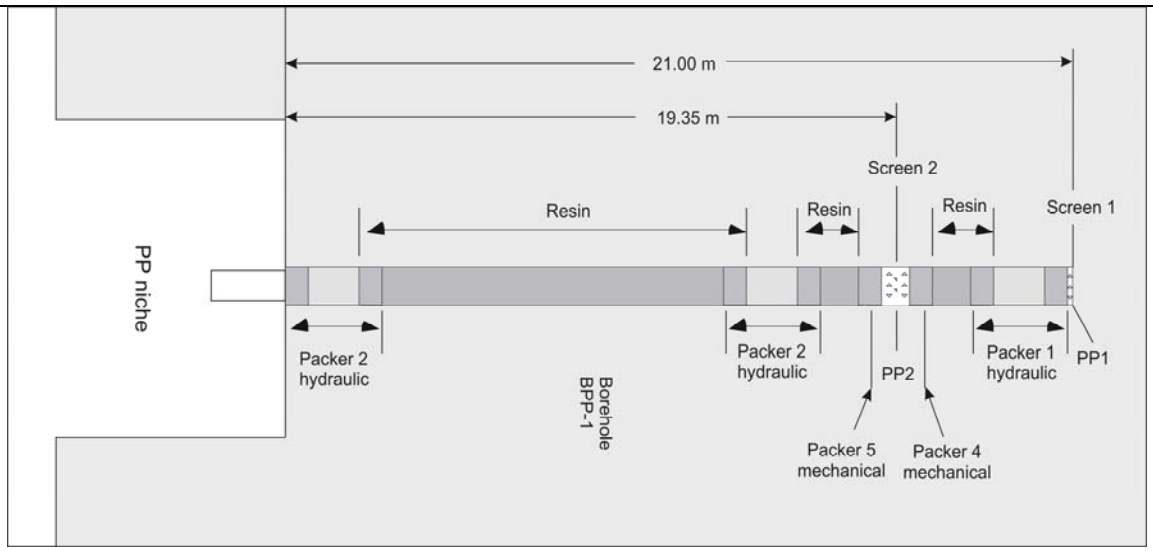



Figure 4: Schéma et photo du dispositif PP installé dans le forage BPP1 (Thury and Bossart, 1999).

Les lignes hydrauliques, situées dans l'intervalle de test, mais que l'on ne peut pas voir dans le schéma de la Figure 4, ont servi à saturer la chambre avec une eau synthétique de composition aussi proche que possible de l'eau interstitielle. Les capteurs de pression interstitielle sont localisés en tête de forage et sont reliés aux chambres de mesure PP1 et PP2 par des lignes hydrauliques. Il s'agit de capteurs de pression absolue (type KELLER PTX-510, gamme de mesure 0 – 30 bars, précision de ± 1kPa).

Enfin, on notera que, par rapport à la galerie creusée en 1998, les chambres de mesure PP1 et PP2 sont situées respectivement à 4.00 m et 5.65 m de la paroi sud de la future galerie 1998.

## *2.2 Le laboratoire de recherche souterrain du Tournemire*

### 2.2.1 Introduction

Dans le cadre de ses recherches sur le stockage souterrain de déchets radioactifs de haute activité à vie longue, l'IRSN a mis en place un programme expérimental destiné à acquérir des connaissances, évaluer et tester des méthodes et à former des experts. En effet, l'analyse des risques liés à la gestion des déchets nucléaires de haute activité et à vie longue (HAVL) et plus particulièrement, au projet de création d'une installation de stockage en couche géologique profonde, nécessite un effort important de développement des connaissances.

Le concept de sûreté d'un tel stockage repose notamment sur les propriétés de confinement durable des matières radioactives assuré par le milieu géologique, de manière à limiter leur transfert vers les écosystèmes et ainsi prévenir les risques à long terme pour l'homme et l'environnement.

En France, la responsabilité de concevoir et de réaliser un éventuel stockage géologique a été confiée à l'ANDRA. En application de la loi de programme du 28 juin 2006, l'instruction de la demande d'autorisation de création de l'installation est prévue en 2015 et sa mise en service en 2025. Au cours de ce processus, l'IRSN à la charge d'évaluer, pour le compte des autorités, la sûreté du projet qui sera proposé par l'ANDRA. Pour assurer cette mission et mener à bien une expertise techniquement crédible et indépendante, l'IRSN se doit d'acquérir des connaissances spécifiques et de développer et maintenir ses compétences. C'est dans ce but qu'il mène, depuis près de 20 ans, un programme de recherche sur son site expérimental du tunnel de la Boutinenque (également connu sous le nom de Station Expérimentale de Tournemire) dans le Sud Aveyron.

Ce tunnel ferroviaire de 1885 mètres, percé à la fin du 19$^{ème}$ siècle est situé en bordure du Massif Central (Sud Aveyron). Il donne accès à une roche argileuse compacte de 250 mètres d'épaisseur, surmontée de 250 mètres de calcaires. La roche est une marne silteuse compactée encore appelée argilite (Figure 5). Elle est principalement constituée d'argiles, de calcite et de quartz. Datant du Jurassique inférieur (Toarcien + Domérien), elle s'est formée en domaine marin il y a environ 180 millions d'années.

Du fait de leurs caractéristiques, les argilites de Tournemire présentent des analogies fortes avec les formations argileuses étudiées à Bure (Meuse/Haute-Marne) dans l'est de la France par l'ANDRA en vue de la création d'un stockage géologique de déchets nucléaires. Le tunnel offre ainsi à l'IRSN un terrain sur lequel ses équipes de recherche peuvent développer l'expertise nécessaire pour juger de la qualité et des fondements scientifiques des données acquises par l'ANDRA et des dossiers techniques soumis aux pouvoirs publics.

Depuis 1990, début des investigations, plusieurs forages ont été réalisés dans le but d'acquérir, entre autres, les caractéristiques hydrauliques de la couche argileuse et de son encaissant.

Six galeries totalisant plus de 285 m et plus de 160 forages ont été creusés dans le tunnel depuis 1990. Des instruments de mesure sont mis en place et des techniques d'observation sont mises en œuvre pour étudier la roche et son comportement, l'eau qu'elle contient et sa vitesse de déplacement. Parmi ces forages, 7 ouvrages équipés

d'une vingtaine de capteurs ont fait l'objet d'un suivi des pressions et des températures de l'eau interstitielle et du tunnel à raison d'une acquisition toutes les demi-heures par capteur pendant plus de 5 ans pour certains. Les galeries de 1996 ont également été équipées de capteurs d'humidité relative et de température, et l'ouverture de fissures observées plus particulièrement en hiver dans ces ouvrages a fait l'objet d'un suivi au moyen d'extensomètres de surface.

L'objectif du présent travail est principalement de valoriser l'ensemble des données acquises à ce jour, et plus particulièrement :

1. D'évaluer les propriétés hydrauliques des formations de Tournemire par l'analyse de pression et de comparer ces données à celles acquises par essais hydrauliques ;
2. D'analyser l'effet du creusement de la galerie 2003 sur l'évolution de la pression interstitielle dans les chambres 1, 2 et 3 (Mine-by-test).

Le traitement de ces chroniques a été réalisé à partir des méthodes décrites précédemment : analyses corrélatoire et spectrale, en ondelettes continues, par multirésolution simple et croisée. Ce traitement vise ainsi à valoriser l'ensemble des données acquises à ce jour.

Nous allons maintenant introduire le contexte géologique et hydrogéologique du site de Tournemire. On présentera par la suite dans ce rapport (Partie 5) des applications de prétraitements et d'analyse des données.

### 2.2.2 Cadre géologique, structural, mécanique et hydrogéologique

La Station Expérimentale de Tournemire (SET) est située dans un bassin marin mésozoïque à la frontière méridionale du Massif Central français et à la limite occidentale de la Causse du Larzac. La formation argileuse étudiée est de 250m d'épaisseur et correspond à la couche argileuse et marneuse datant du Toarcien et du Domérien (**Figure 5**). Cette formation est encadrée par deux formations aquifères et karstifiées (Cabrera *et al*, 2001 ; Patriarche *et al*, 2004).

Géologiquement, le massif de Tournemire présente une structure monoclinale avec un pendage d'environ 4° vers le nord. Les aquifères inférieur (Carixian et Hettangien) et supérieur (Aalenian et Bathonien) ont une épaisseur respective de 300m et 250m d'épaisseurs et sont composés essentiellement de calcaire et dolomite. La formation argileuse est constituée de 250m d'argile et marne bien compactées.

Peyaud *et al* (2005) ont suggéré sur la base des résultats obtenus à partir des traces de fission que la formation argileuse avait subi un enfouissement dans le passé supérieur de près de 1300 ± 400 m de sédiments à celui observé actuellement, expliquant de ce fait l'état de surconsolidation de la formation argileuse appelée de ce fait argilite. La fraction argileuse de cette roche varie entre 20 et 50%. Elle est constituée principalement d'illite (5-15%), d'interstratifiés illite/smectique (5-10%), de chlorite (1-5%) et de kaolinite (15-20%). La roche contient également 10 à 20% de grains de quartz, 10 à 40% de carbonates (calcite principalement avec des traces de dolomite et de sidérite) et 2 à 7% de pyrite (Cabrera *et al*, 2001; Savoye *et al*, 2001 ; Savoye *et al*, 2006).

Le Toarcien supérieur est traversé par un tunnel ferroviaire 1885m de long creusé entre 1882 et 1888. Ce tunnel présentait une excellente opportunité à l'IRSN (jadis IPSN) d'accéder à une formation argileuse compactée et de développer ses programmes de recherche indépendante lui permettant de former ses experts à l'évaluation des futurs

dossiers d'installation d'un éventuel stockage de déchets radioactifs de haute activité et à vie longue en couche géologique profonde.

Le massif de Tournemire est recoupé par la faille du Cernon qui est une faille inverse et extrêmement transmissive en particulier au milieu du tunnel (**Figure 5**). Cette structure d'extension plurikilométrique et d'orientation globalement Ouest-Est permet la communication entre les deux couches aquifères encaissantes. La formation argileuse est également affectée par failles décrochantes d'extension hectométrique et d'orientation N170-180°E (fig. 2), c'est-à-dire proche de la direction principale des contraintes horizontales $\sigma_H$ (N162 ± 15°E) pour une contrainte minimale horizontale $\sigma_h$ (N72 ± 15°E). Ces directions ont été déterminées par des essais de fracturation hydraulique en forage (Rejeb et Tijani, 2003). Les résultats suggèrent l'occurrence d'un champ de contrainte anisotrope avec $\sigma_v$ = 3.8MPa, $\sigma_h$ = 2.1 MPa et $\sigma_h$ = 4.0 MPa (Rejeb et Cabrera, 2006). Comme que la plupart des structures datent de la compression pyrénéenne (entre 53 et 33Ma), et que la faille du Cernon a joué pendant toute l'histoire géologique du massif, il est probable que les argilites aient acquis leur rigidité assez tôt dans l'histoire de massif (Patriarche *et al*, 2004).

Les failles secondaires sont en général partiellement scellées par de la calcite et donnent accès à des blocs non fracturés. Ces blocs non fracturés d'argilite sont caractérisées par des conductivités hydrauliques qui sont parmi les plus faibles au monde (entre $10^{-14}$ et $10^{-15}$ m/s) pour un emmagasinement spécifique de $10^{-6}$ $m^{-1}$ (Boisson *et al*, 1998 ; Cabrera *et al*, 2001, Fatmi *et al*, 2005) et une porosité totale autour de 9% (Matray et al., 2006). Cependant des cavités géodiques parfois trouvées à la jonction de failles secondaires sont supposées être à l'origine du transfert vertical des eaux au sein de la couche argileuse. Avec la faille du Cernon, ces structures sont les seules opportunités d'accéder à l'eau contenue dans la formation argileuse. Les essais hydrauliques réalisés au niveau de ces structures ont révélé des transmissivités relativement élevées (environ $10^{-10}$ $m^2/s$), soit 4 à 5 ordres de grandeur supérieures à celles des zones saines de l'argilite (Savoye *et al*, 2003).

Les pressions interstitielles ont été mesurées en zones saines soit avec des sondes scellées permanentes (forages PH1 et PH3) soit au moyen de dispositifs multi-obturateurs (forage PH2). Des tests ont également été effectués au niveau de fractures productrices d'eau à l'aide des dispositifs à doubles obturateurs (*e.g.* forages TN2, M2). La Figure 90 voir plus loin montre l'existence d'une dépression d'environ 30 à 40 m autour du tunnel par rapport au profil de charge dicté par les deux aquifères. Cette dépression peut être expliquée par l'occurrence d'une frange capillaire consécutive à l'excavation du tunnel et de sa ventilation naturelle depuis plus d'un siècle (Matray et al, 2007). En dehors de cette frange, les charges montrent également l'existence d'une probable surpression de plusieurs dizaines de mètres en équivalent hauteur d'eau, dont l'origine n'est pas encore bien connue.

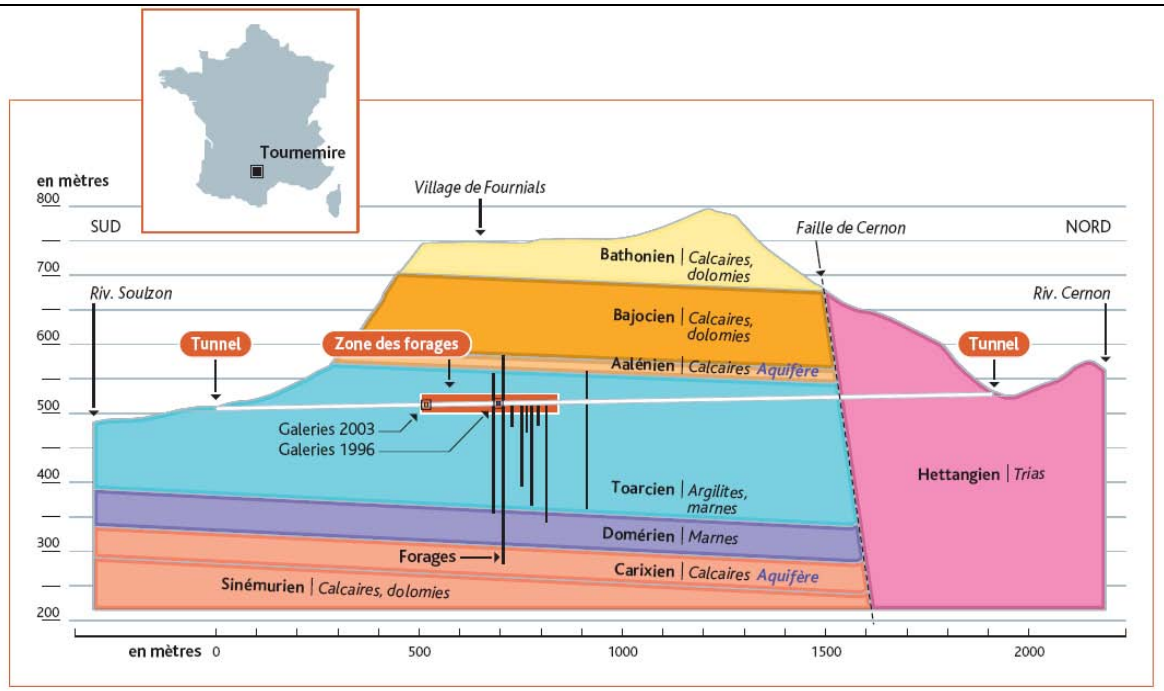



Figure 5: Coupe géologique générale de la station expérimentale IRSN de Tournemire avec la localisation des galeries.

Deux autres réseaux de faille existent, qui peuvent avoir joué un rôle important dans l'écoulement d'eau et le transport des espèces dissoutes. Ces réseaux sont essentiellement confinés autour du Tunnel.

Le premier réseau serait du à la redistribution du champ de contrainte suite à l'excavation des ouvrages et le second à la décompression de la roche autour des ouvrages. Ce comportement mécanique est régi par le caractère anisotrope de l'argilite. Les valeurs du module élastique, les coefficients de Poisson, le module de cisaillement et les efforts de compression uniaxiaux sont respectivement de E1 = 27680MPA, $\nu_1 =$ 0.17, $E_2$ = 9270 MPa, $\nu_2$ = 0.20 et $G_{12}$ = 3940 MPa, $\sigma_{C1}$ = 32MPa et $\sigma_{C2}$ = 13MPa, où 2 et 1 se réfèrent à des valeurs obtenues parallèlement ou perpendiculairement à la stratification (Rejeb et Cabrera, 2006).

Le second réseau de fissures est parallèle à la stratification et est attribué à de la désaturation Ce réseau est directement lié aux variations saisonnières de l'atmosphère du tunnel (hygrométrie et température). En effet, l'hygrométrie enregistrée depuis 1999 indique des variations saisonnières (température de 8°C et hygrométrie de 100% en hiver et pour une température et hygrométrie estivale de 14°C de 40%, respectivement) avec une hygrométrie moyenne annuelle de 77% conduisant à l'évaporation superficielle de l'eau interstitielle. Une corrélation nette a pu être mise en évidence entre ces ouvertures de fissures et l'hygrométrie avec un délai de réaction d'environ de 60h entre la variation d'humidité relative mesurée au moyen de thermo-hygromètres et l'ouverture des fissures enregistrée à l'aide d'extensomètres (Fatmi *et al*, 2005).

### 2.2.3 Objectifs et moyens mis en œuvre lors du test de creusement de la galerie principale de 2003

L'expérience de suivi du creusement de la galerie 2003 (*Mine-by test experiment*) visait à évaluer les perturbations (mécaniques, hydrauliques, physiques et chimiques) subies par l'argilite sous l'effet d'un stress mécanique induit par la création d'une galerie souterraine.

Cette expérience a nécessité la mise en place de mesures mécaniques de déformations et hydrauliques de pression interstitielles, enregistrées avant, pendant et après le passage du front d'excavation de la galerie, creusée à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle.

Avant le creusement, 3 forages ont été réalisés et équipés pour enregistrer les effets de l'excavation sur le massif rocheux autour de la galerie. Des extensomètres électriques installés dans deux forages (M4, M5) ont été utilisés pour suivre l'évolution du déplacement de part et d'autre de la galerie. Le troisième forage (PH2) a été consacré aux mesures de variation de pression interstitielle avant, pendant et après le creusement et fait l'objet de la présente étude. Une importante base de données expérimentale obtenue à partir de ces mesures est actuellement disponible. Les dispositifs expérimentaux mis en place pour effectuer un suivi en continu des paramètres hydrauliques et mécaniques sont donnés en Figure 6.

Le forage PH2 (Forage sub-horizontal à -2°), a été équipé d'un dispositif multi-obturateurs (Multi-Mini-Piezometer System MMPS de Solexperts, entreprise Suisse (Figure 6) et qui permet la mesure simultanée de pression et température en chambres de dimension réduite (10 cm de long pour un volume de quelques $cm^3$) pour obtenir au plus vite une valeur de pression stabilisée. Chacune des trois chambres de mesure est isolée au moyen de deux obturateurs de 1m de long et gonflés à l'eau. Ce système a été mis en place sur le forage PH2 réalisé à l'air en janvier 2003, 96 mm ∅, profondeur/tête de forage 35 m, chambre 1 entre 22,41 et 22,51m, chambre 2 entre 29,18 et 29, 28m et chambre 3 entre 34,90 et 35,0m). L'objectif de ce forage était le suivi des pressions interstitielles avant, pendant et après le creusement de la nouvelle galerie Ouest de 2003.

Tous les capteurs de pression associés à ce dispositif sont des capteurs de type Keller PAA-23 (gamme 0 à 20 bars abs., précision de ± 1 kPa) et ont été branchés à une centrale d'acquisition Géomonitor © de Solexperts AG (CH). Cette centrale dispose également d'un capteur de pression barométrique et de température situés dans la galerie est de 1996 (type Keller PAA-23/8465-1 gamme de mesure 0.85 à 1.15 bars abs. Précision rel. 0.1%). Un modem permet de transmettre directement les mesures enregistrées à l'aide du réseau téléphonique.

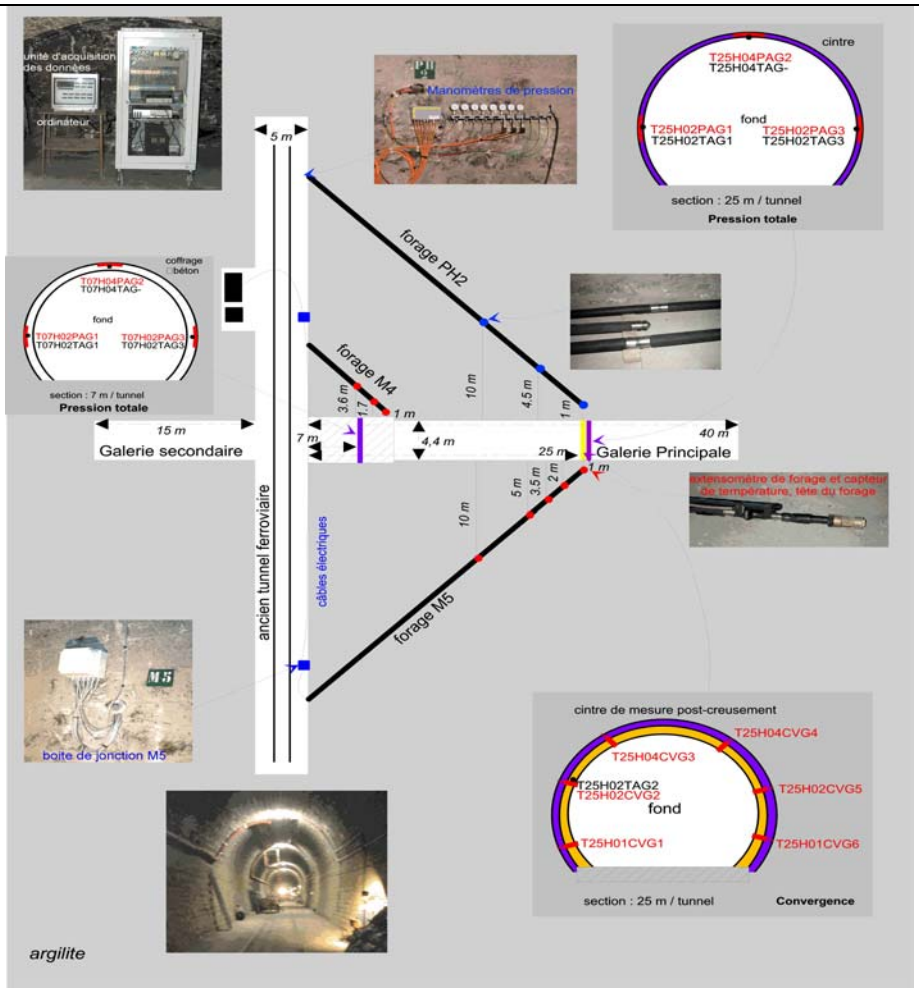



Figure 6: Détail de l'instrumentation hydraulique (forage PH2) et mécanique (sections de convergence et forages M4 et M5 dédiés aux mesures de déplacement) de la galerie principale de 2003. Les chambres de mesure de pression 1, 2 et 3 du forage PH2 sont situées respectivement à 1m, 4.5m et 10m de la paroi de la nouvelle galerie.les galeries et forages sont montrés en projection horizontale. Le forage PH2 est sub-orizontale à -2°.

## *2.3 Le laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne*

### 2.3.1 Introduction

1. Les informations présentées ici sont majoritairement issues du dossier Argile 2005 de l'Andra (Andra, 2005 Synthèse de la faisabilité du stockage gélogique en formation argileuse, Dossier argile 2005, 239 pp).

L'Andra mène, depuis 1991, un ensemble de recherches dans le but d'évaluer la faisabilité d'un stockage géologique de déchets de haute activité et à vie longue en formation argileuse. Un élément clé de ces recherches est l'étude du site de Meuse/Haute-Marne, comprenant une roche argileuse compactée et enfouie à environ 500m de profondeur.

La démarche de l'Andra est d'assurer la transposabilité des études du milieu géologique menées au laboratoire à une zone plus large appelée zone de transposition et dans laquelle une zone restreinte de recherche pourra être proposée pour un futur stockage. Cette transposabilité est le gage que les résultats des études ne sont pas dépendants des spécificités d'une localisation particulière. Ainsi, plus de 27 forages profonds ont été réalisés depuis 1994 dans le but de préciser entre autres les caractéristiques hydrauliques de l'argilite et de ses encaissants carbonatés.

### **2.3.2** *Le laboratoire de recherche de Meuse / Haute-Marne*

Un inventaire réalisé par l'Andra entre 1994 et 1996 a permis de :

1) confirmer l'intérêt des argilites du Callovo-Oxfordien, une roche argileuse de plus de 130 m d'épaisseur formée il y a 155 millions d'années enfouie à une profondeur comprise entre 400 et 600m,
2) sélectionner un site d'étude situé au sud de la Meuse et au nord de la Haute-Marne pour y installer un laboratoire de recherche souterrain. dénommé LSM/HM (Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute Marne).

Les travaux de 1995-1996 ont apporté des informations permettant de définir le programme expérimental du Laboratoire souterrain et d'en concevoir l'architecture. Les objectifs du laboratoire sont, d'après les documents ANDRA :

1) d'effectuer des mesures sur les roches en place ou sur des fluides aussi peu perturbés que possible par les conditions de l'expérience, afin d'améliorer la connaissance des paramètres de confinement déjà évalués en partie lors du programme de reconnaissance mené à partir de la surface ;

2) de déterminer, par des expériences à caractère plus global, le comportement des différentes roches et des fluides, en prenant en compte les phénomènes naturels et les modifications provoquées par la réalisation du stockage, ou son exploitation ;

3) de reconnaître le milieu, notamment sa variabilité dans l'espace, pour définir la zone où pourront être implantées les installations souterraines d'un stockage ;

4) de déterminer les méthodes de creusement, de rebouchage et de scellement des cavités.

C'est dans le cadre des travaux de caractérisation des propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien et de son encaissant que le forage EST207 a été réalisé dans l'emprise du laboratoire. Le but de ce forage est d'obtenir le profil de pression hydraulique sur toute la hauteur du Callovo-Oxfordien et aux interfaces avec les formations encaissantes (Figure 7 et Figure 8).

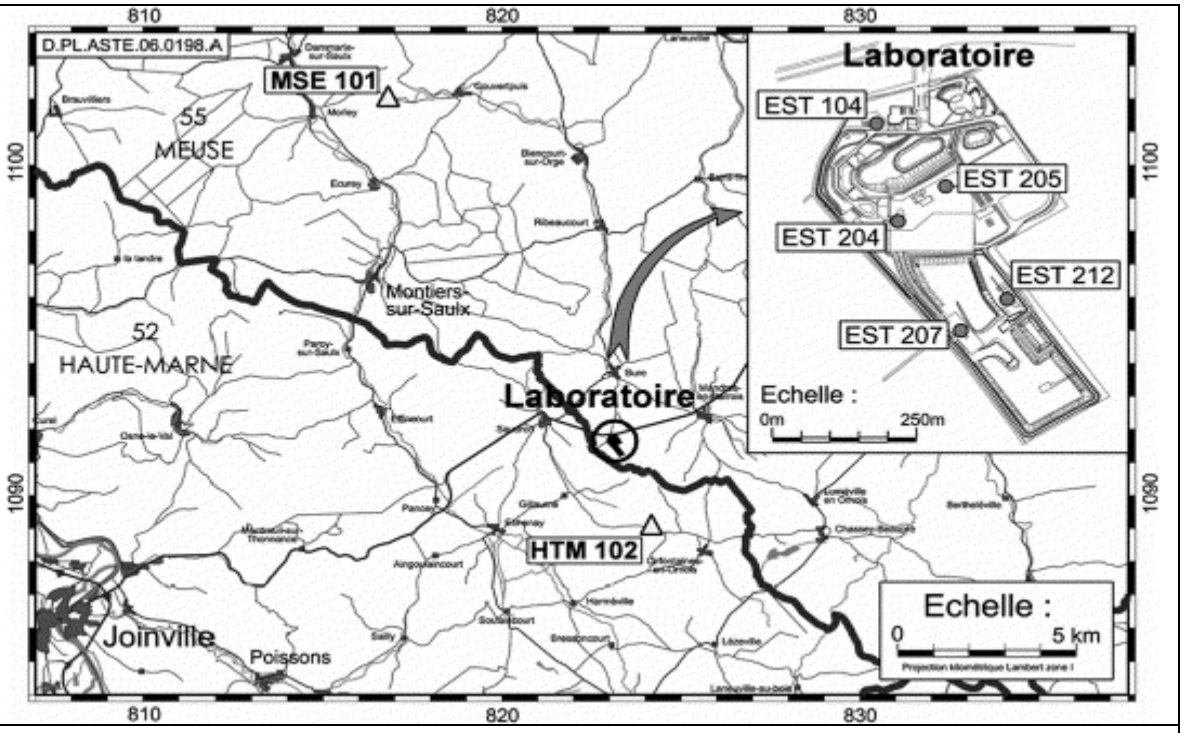



Figure 7: Localisation des forages de mesures dans les argilites du Callovo-Oxfordien et aquifer encaissant (Delay et al., 2006).

### 2.3.3 Propriétés du Callovo-Oxfordien et de son encaissant

La composition minéralogique et pétrophysique du Callovo-Oxfordien a été acquise sur un nombre important de forages. Sur la base de ces analyses, une composition moyenne semi-quantitative a été proposée par l'Andra. Elle est résumée dans le **Tableau** 2

| Composition minéralogique | Teneurs moyennes en % | | |
|---|---|---|---|
| Minéraux de la famille de l'Illite | 14 | 41 | Minéraux argileux |
| Interstratifiés désordonnés I/S R=0 | 14 | | |
| Interstratifiés ordonnés I/S R=1 | 8 | | |
| Kaolinite | 2 | | |
| Chlorite | 2 | | |
| Calcite | 27 | 31 | Carbonates |
| Dolomite/Ankérite | 4 | | |
| Quartz | 23 | 25 | Silicates (Q + Feldspaths) |
| Feldspaths K | 1 | | |
| Plagioclases | 1 | | |
| Pyrite | 1 | 3 | Minéraux accessoires |
| Minéraux ferrifères | 2 | | |
| Minéraux titanés | <1 | | |
| Minéraux phosphatés | <1 | | |

**Tableau** 2: Composition minéralogique moyenne des argilites du Callovo-Oxfordien (IRSN, 2005 avait de l'institut de radioprotection sur le dossier 2005 Argile, Rapport DSUN°106 d'après le tableau 5 page 54/284.).

L'Andra conclut dans le dossier argile 2005 que la variabilité minéralogique est très faible dans les unités inférieures (C2a et C2b) et légèrement plus marqué au sein des unités supérieures (C2c et C2d) (Figure 8). Les valeurs de porosité totale varieraient entre 15 et 18% selon la technique mise en œuvre (Gaucher et al., 2004). Les porosités accessibles aux anions seraient équivalentes au tiers de la porosité totale accessible à l'eau et aux espèces cationiques indiquant une répulsion anionique vraisemblable (Andra, 2005).

Les connaissances relatives aux caractéristiques hydrodynamiques des argilites du Callovo-Oxfordien proviennent principalement de l'interprétation des nombreux tests hydrauliques réalisés en forage, du suivi des pressions sur une longue durée et de mesures sur échantillons carottés. Pour ce qui concerne les perméabilités des argilites du Callovo-Oxfordien, les valeurs obtenues sont très faibles avec une faible anisotropie et majoritairement comprises entre $5\ 10^{-14}$ et $5\ 10^{-13}$ m/s (Delay et al., 2006 ; Distinguin et Lavanchy, 2007).

Pour ce qui concerne le coefficient d'emmagasinement spécifique, les valeurs seraient comprises entre $10^{-7}$ et $10^{-4}$ $m^{-1}$, d'après les essais effectués par chocs hydrauliques sur éprouvettes sous chargement triaxial (75% des essais entre $10^{-6}$ et $3\ 10^{-5}$ $m^{-1}$) avec une valeur médiane à $2\ 10^{-5}$ $m^{-1}$ (Delay et al., 2006). D'après l'Andra, ces valeurs présentent sans doute une incertitude « sans doute supérieure à 50% ». Cette valeur est à comparer avec celles évaluées à partir des modules de Biot mesurés également sur échantillons (Ozanam et al., 2002) à savoir entre $4\ 10^{-7}$ et $1\ 10^{-6}$ $m^{-1}$ et les valeurs retenues dans la modélisation des tests in situ, proches de $10^{-6}$ $m^{-1}$ (Delay et al., 2006).

Le Callovo-Oxfordien est encadré de deux formations carbonatées. L'Oxfordien qui constitue l'encaissant supérieur présente des horizons poreux ayant produit de l'eau lors de tests hydrauliques avec des porosités pourrant excéder les 18% et des perméabilités comprises entre $5.6\ 10^{-10}$ et $10^{-9}$ $m.s^{-1}$ (Cruchaudet et al.,2007). Les valeurs d'emmagasinement spécifique ne sont pas spécifiées dans ce document ni dans les documents publics du Dossier Argile 2005. Le Dogger est la formation sous-jacente de la formation hôte. A l'échelle du laboratoire cette formation géologique n'avait pas encore fait l'objet d'étude lors de l'analyse du dossier 2005. Il existe cependant quelques estimations de perméabilités sur forages réalisés dans le secteur du site avec des valeurs de perméabilités centrées autour de $10^{-9}$ $m.s^{-1}$ (Cruchaudet et al., 2007). Là encore, aucune valeur d'emmagasinement spécifique n'était disponible.

### 2.3.4 L'équipement et coupe géologique du forage EST207

Ce forage recoupe l'ensemble du Callovo-Oxfordien et une partie de son encaissant carbonaté (Figure 8), d'après la note technique Andra D PL ADPE 05-0187A transmise par courrier LS/SS/08-0808 du (3/10/08). Il est actuellement équipé d'un dispositif multi-obturateurs de type Westbay pour la mesure des pressions et températures à long-terme. Cet équipement a permis d'isoler au moins 11 chambres de mesures de pressions et températures situées entre le Bathonien supérieur et l'Oxfordien calcaire et d'acquérir ces données au pas de temps $\Delta t(i)$ de 30mn et ce, depuis son installation (Delay et al., 2006; Distinguin et Lavanchy, 2007). Une demande a été formulée auprès de l'Andra pour disposer d'une chronique de pression sur ce forage. Les données ont été transmises par l'Andra le 10 Août 2005 (courrier DP/EST/SS/05-0577). Les chroniques de pression correspondantes (Pression atmosphérique, pression interstitielle dans les chambres 1, 11 et 5) sont analysées plus loin dans ce rapport : voir la partie 6 consacrée à l'analyse des pressions au LSM/HM (Bure).

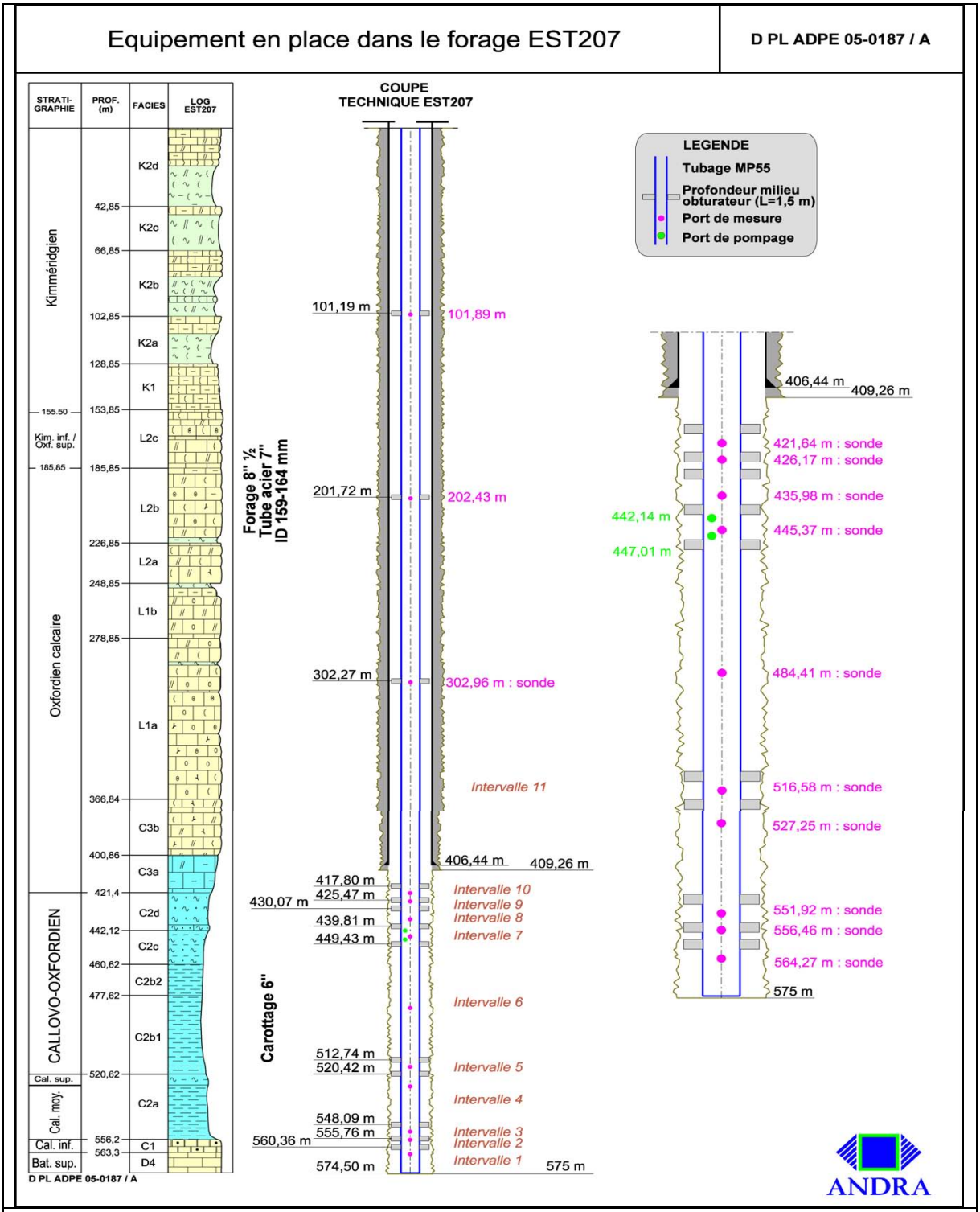



Figure 8: Présentation de l'équipement mis en place dans EST207 et de la formation géologique associée (d'après Note technique Andra D PL ADPE 05-0187/A.).

Intervalle 1 : encaissant calcaire inferieur
Intervalle 11 : encaissant calcaire supérieur.
Intervalle 5 : Callovo-Oxfordien.

# *Partie 2 : Méthodes de prétraitement et d'analyse des signaux*

# 3 Méthodes de prétraitement des chroniques atmosphériques et piézomètriques

## 3.1 Introduction au prétraitement - position du problème

Comme de nombreuses séries chronologiques, les chroniques du Mont Terri ($P_{ATM}(t_i)$, $P_1(t_i)$, $P_2(t_i)$ ...) sont affectées par un certain nombre de problèmes communs à bien des banques de données chronologiques (Fatmi et al., 2008), tels que :

- Lacunes de taille variable (exemples : lacunes isolées, mais aussi, lacunes comportant une centaine de pas de temps ou même plus) ;
- Pas de temps variables $\Delta t(i)$ (exemple : $\Delta t$ = 1 min, 30 min, 4 jours…) ;
- Données aberrantes ou affectées par des interventions humaines (e.g, certaines mesures font apparaître des pressions absolues…négatives).

Les problèmes de lacunes et les problèmes de pas de temps variable peuvent être vus comme équivalents dans certains cas : dans les deux cas il y a nécessité de reconstitution ou d'interpolation.

Notons que les données brutes fournies contiennent des marqueurs explicites de lacunes. En même temps, les données sont fournies avec un pas de temps inhomogène, variable. Seule une interprétation de type statistique, portant sur la variabilité des pas de temps, peut permettre de réinterpréter les $\Delta t(i)$ longs comme des lacunes supplémentaires.

Les données aberrantes posent, elles, deux types de problèmes : d'abord leur détection (décision d'interpréter une donnée comme aberrante ou non) puis le cas échéant, leur reconstitution (comme pour une lacune).

**L'ANNEXE (1)** détaille l'organigramme des opérations de pré-traitement qui ont été mises en œuvre pour la détection des anomalies et leur réparation. Cet ensemble d'opérations peut se résumer comme suit.

- Une première analyse des données brutes des chroniques est effectuée dans le but de détecter les éventuelles anomalies (lacunes, valeurs aberrantes et variations du pas d'acquisition $\Delta t$ (i)).
- Selon les anomalies détectées, sont alors appliquées différentes méthodes de prétraitement dans le but de permettre l'exploitation de ces chroniques. Parmi les méthodes de traitement nous pouvons citer : les moyennes globales et mobiles, l'interpolation linéaire et les modèles autorégressifs dans le cas des chroniques supposées statistiquement stationnaires voir plus loin paragraphe (**3.6**)
- Le problème du fractionnement des fichiers dans le cas où les tronçons de lacunes seraient très grands est également abordé (ce qui rendrait inapplicables les méthodes de reconstitution). Certains algorithmes permettent de sélectionner et de tronquer des chroniques deux à deux afin qu'elles coïncident lors d'analyses croisées.
- Enfin, si le pas de temps est modérément variable, une « homogénéisation » des pas de temps $\Delta t(i)$ de la chronique X(i) est effectuée (même si, dans le cas de très grands pas de temps, la meilleure décision peut consister à les considérer comme des lacunes non reconstituables).

Il est clair que, sans prétraitement, on ne disposerait pour l'analyse des chroniques du Mont Terri, que de chroniques très courtes - de l'ordre du mois – alors que la durée totale réelle d'observation est d'une dizaine d'années à ce jour.

Les informations sur les comportements à long terme seraient perdues s'il fallait se restreindre aux seuls séquences communes à toutes les variables ($p_1(t)$, $p_{ATM}(t)$,...) et ne contenant ni lacunes, ni pas de temps variables, ni aberrations.

On verra en outre que certaines des techniques mises en œuvre en mode de 'pré-traitement' vont également servir en 'analyse' proprement dite, par exemple la technique de filtrage ou dé-moyennage ('*detrending*') par moyenne mobile.

## *3.2 Opérations de troncation et d'extraction*

Dans cette partie nous développons les premières étapes de prétraitement. On commence par marquer les lacunes par la valeur $10^{101}$ afin de ne pas créer d'interférence entre les lacunes et les données réelles. Dans un premier temps nous avons effectué une troncature à droite et à gauche de la chronique à fin de se débarrasser des lacunes présentes au début et à la fin de la chronique car des valeurs aberrantes peuvent y être détectées.

Dans la deuxième étape nous avons utilisé l'extraction (ESS) automatique de sous séquences continues d'une chronique comportant des lacunes voir Figure 9 ceci étant faisable avant application de méthodes de reconstitution (par contre si des données aberrantes sont détectées : l'extraction est à refaire).

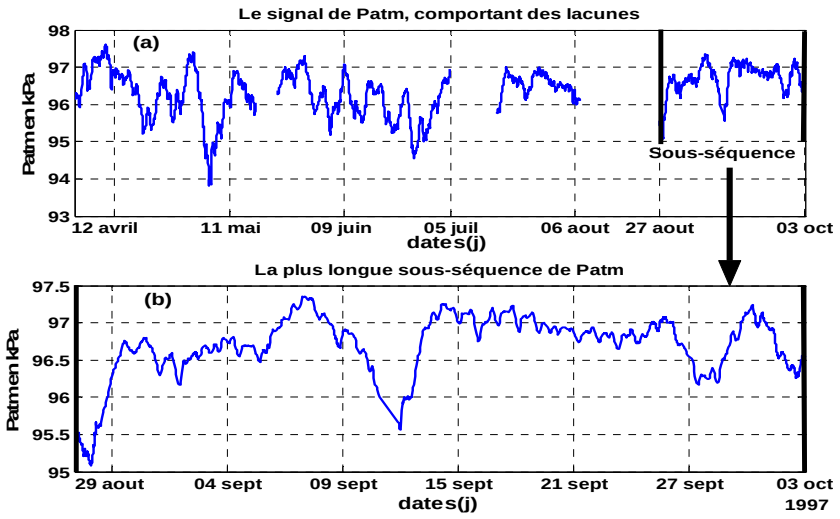



Figure 9: Extraction de la sous séquence continue la plus longue (b) à partir de la chronique de Patm au Mont Terri comportant des lacunes (a), avec Δt variable, pour la période 02/04/1997-03/10/1997.

## *3.3 Reconstitution préliminaire et interpolation linéaire*

La reconstitution d'ordre 0 est faite à titre préliminaire pour raisons suivantes :

- La détection des valeurs aberrantes ;
- La reconstitution par interpolation linéaire ou par processus AR1 détaillés plus loin, il s'agit d'un comblement de lacunes par la moyenne globale (M0) constante, par la moyenne mobile (MM), par interpolation linéaire ou par AR1.

Pour détecter les données aberrantes (D-ABER) qui deviennent ainsi des nouvelles lacunes nous avons utilisé des critères statistiques indiqués ci-dessous :

- Critère du seuil entre deux valeurs successives :

  $\left|\frac{X(i+1)-X(i)}{2\sigma_X}\right| > Seuil_1$ où « seuil » est adim O(1), par ex : $Seuil \approx 0.7$

- Critère du seuil basé sur la distance à la moyenne globale :

  $\left|\frac{X(i)-\overline{X}}{2\sigma_X}\right| > Seuil_2$ où « seuil » est adim O(1), par ex : $Seuil \approx 0.7$

- Critère du seuil basé sur la distance à la moyenne mobile (locale) avec $\sigma_{\widetilde{X}}$ l'écart type de la moyenne mobile $\widetilde{X}(i)$ :

  $\left|\frac{X(i)-\widetilde{X}(i)}{2\sigma_{\widetilde{X}}}\right| > Seuil_3$ où « seuil » est adim O(1), par ex : $Seuil \approx 0.7$

Critère du seuil basé sur la distance à la moyenne mobile (locale) avec $\widetilde{\sigma}_X$ l'écart type, défini comme la racine carrée de la variance, de X(t) autour de sa moyenne mobile

- :

  $\left|\frac{X(i)-\widetilde{X}(i)}{2\widetilde{\sigma}_X}\right| > Seuil_4$ où « seuil » est adim O(1), par ex : $Seuil \approx 0.7$

**N.B** le choix du seuil S qui permet de balayer les valeurs extrêmes (valeurs aberrantes), doit être testé et choisi par l'utilisateur en fonction du type de données à analyser (exemple pour $P_{atm}$ du site de Mont Terri, S ~ 0.7).

Le Tableau 3, ci-après, résume les différentes valeurs du seuil en fonction des données disponibles du Mont Terri.

| | Patm dans le Tunnel du Mont Terri | Pabs(kPa) Dans PP1 | Pabs(kPa) Dans PP2 | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Seuil | 0.7 | 0.3-0.4 | 0.3-0.4 | 2.2 | 2.2 |

Tableau 3: différentes valeurs du seuil testé en fonction des types des données

Les figures Figure 10 et Figure 11 montrent les chroniques de Patm avant et après détection des valeurs aberrantes.

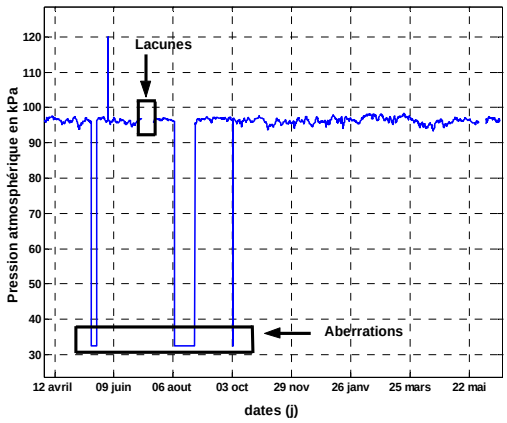



Figure 10: Chronique de Patm du Mont Terri, avec Δt variable, avant détection des valeurs aberrantes, pour la période 02/04/1997-30/06/1998.

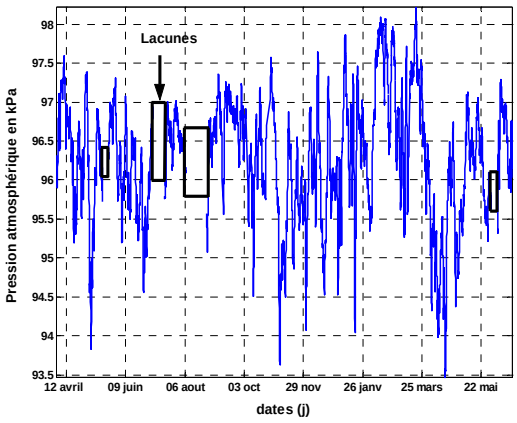



Figure 11: Chronique de Patm avec Δt variable, après détection des valeurs aberrantes remplacées par des lacunes pour la période 02/04/1997-30/06/1998

Une fois que les valeurs aberrantes sont détectées et remplacées par des lacunes nous effectuons une reconstitution par l'un des modèles suivants :

- Reconstitution par modèle HYDRAT (valeur antérieure et postérieure) :

$$\begin{cases} Xnew = X(i-1) \\ Xnew = X(i+1) \end{cases} \quad \textbf{(3.1)}$$

Le modèle HYDRAT est un modèle empirique

- Reconstitution par interpolation modèle 1 (lacunes isolées) :

$$Xnew(i) = X(i-1) + \big(t(i) - t(i-1)\big) \times \frac{\big(X(i+1) - X(i-1)\big)}{\big(t(i+1) - t(i-1)\big)} \quad \textbf{(3.2)}$$

- Reconstitution par interpolation modèle 2 (groupe de lacunes) :

$$Xnew(i) = X(idebut-1) + \big(t(i) - t(idebut-1)\big) \times \frac{\big(X(ifin+1) - X(idebut-1)\big)}{\big(t(ifin+1) - t(idebut-1)\big)} \quad \textbf{(3.3)}$$

Le modèle 2 est équivalent à la fonction interp1 de Matlab, ce modèle est appliqué pour la reconstitution d'un groupe limité de lacunes. La limite de ce modèle est conditionnée par les moments (variance écart type…..) de la chronique avant et après la reconstitution.

En effet, si les moments statistiques de la chronique dont les lacunes sont reconstituées avec le Modèle 2, et celles de la subséquence la plus longue continue extraite de la chronique d'origine donnent des incohérences. A ce stade la décision prise est le fractionnement par dichotomie voir plus loin (paragraphe 3.4).

**Avec :**

**idebut** - indice de la première lacune (de cette plage de lacunes)

**ifin** - indice de la dernière lacune (de cette plage de lacunes)

**i ∈ {idebut, … , ifin}**

**X(i)** - la chronique à reconstituer

**$X_{new}(i)$** - la chronique reconstituée
**t(i)** - le temps absolue
Le schéma illustré par la Figure 12 montre l'algorithme utilisé pour le modèle 2 :

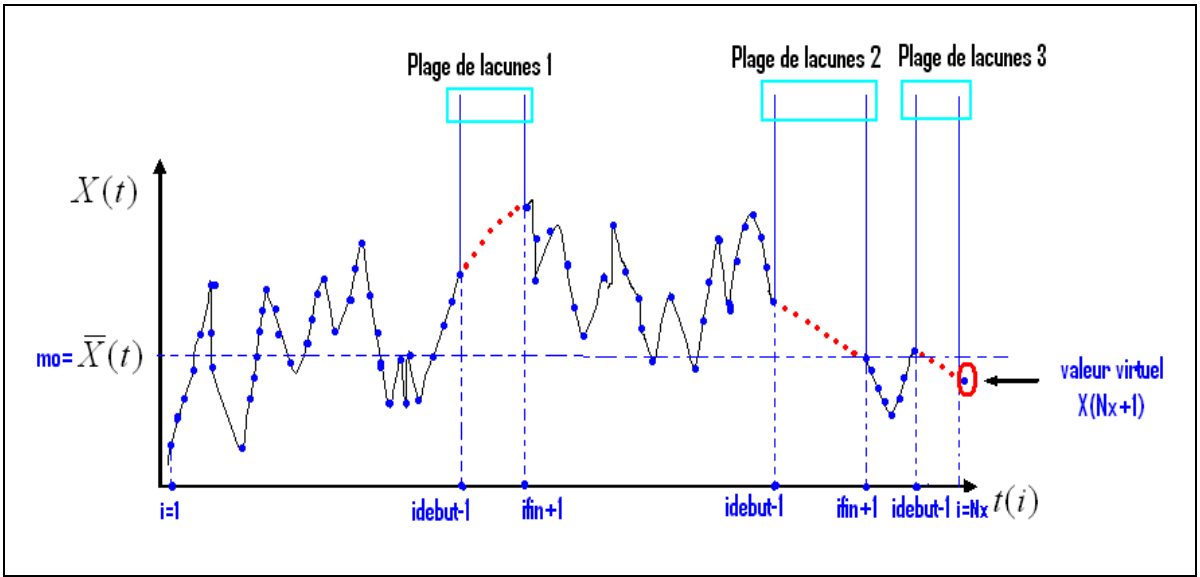



Figure 12: Courbe schématique montrant l'algorithme utilisé pour la reconstitution des lacunes par interpolation linéaire avec le modèle 2.

Nous allons détailler ensuite le modèle autorégressif AR1 et faire un test de validation ainsi qu'une application de reconstitution sur des données réelles.

## *3.4 Fractionnement des chroniques*

Si les méthodes de reconstitution illustrées ci-dessus, ne permettent pas efficacement de faire le comblement des lacunes, alors on aborde une autre étape qui permet de fractionner la chronique en deux séquences notées (x1, x2). Ce fractionnement est basé soit sur le nombre de lacunes manquantes, soit sur le nombre de pas de temps correspondant au nombre de lacunes. La Figure 13 montre un algorithme de fractionnement. Le fractionnement en 2 signaux s'accompagne d'une élimination totale de la lacune (en général : longue lacunes).

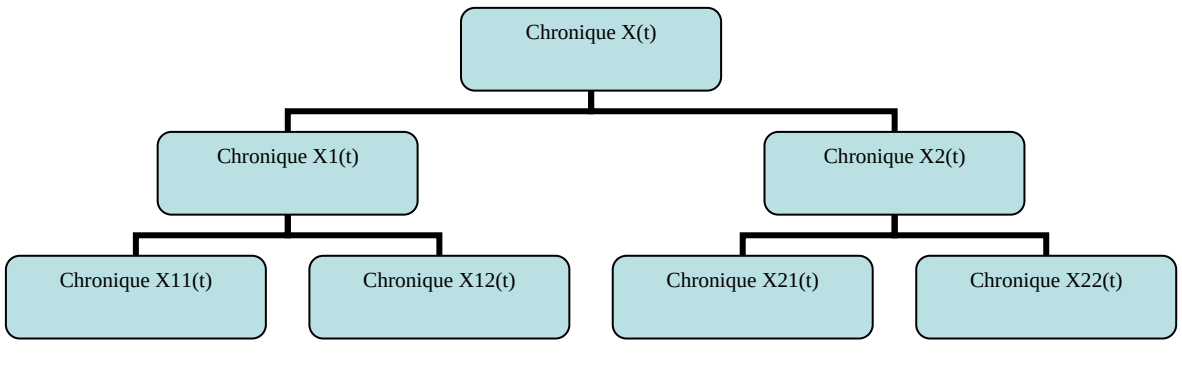



Figure 13: Algorithme de fractionnement de la chronique X(t) : par dichotomie, sur la base de la plus longue plage de lacune

NB : Cet algorithme est applicable itérativement, au plus 2×N fichiers après N itérations (arrêt basé sur un critère de longueur max de lacune et de l'écart type de la chronique reconstitué par différentes méthodes).

## *3.5 Homogénéisation des pas de temps*

L'homogénéisation des pas de temps Δt variable d'une chronique X(t), permet de ramener la chronique à un pas de temps constant noté Δt0, par des opérations de sélection et d'interpolation/extrapolation.

Par conséquence on observe que lorsque le pas du temps variable Δt(i) de la chronique d'origine est diviseur exact-du pas de temps homogénéisé (Δt0) (c à d divisible par Δt0), il suffit d'utiliser une simple sélection des données.

Quand Δt(i) n'est pas diviseur exact de Δt0, on utilise l'interpolation linéaire. On distingue alors deux cas possibles :

- Δt(i)> Δt0 alors on crée des points par interpolation avec un pas Δt0 dans l'intervalle de temps Δt(i) ;
- Δt(i)< Δt0 on supprime des points avec des pas Δt(i).

La Figure 14 illustre ce type de prétraitement par l'homogénéisation des pas de temps Δt(i) lorsqu'ils sont modérément variables. Elle montre l'existence de pas de temps variables (points noirs). Les cercles rouges évidés représentent les points de mesure recalculés pour un pas de temps homogène. Les deux courbes coïncident parfaitement et montrent ainsi la qualité du prétraitement par homogénéisation des pas de temps Δt(i).

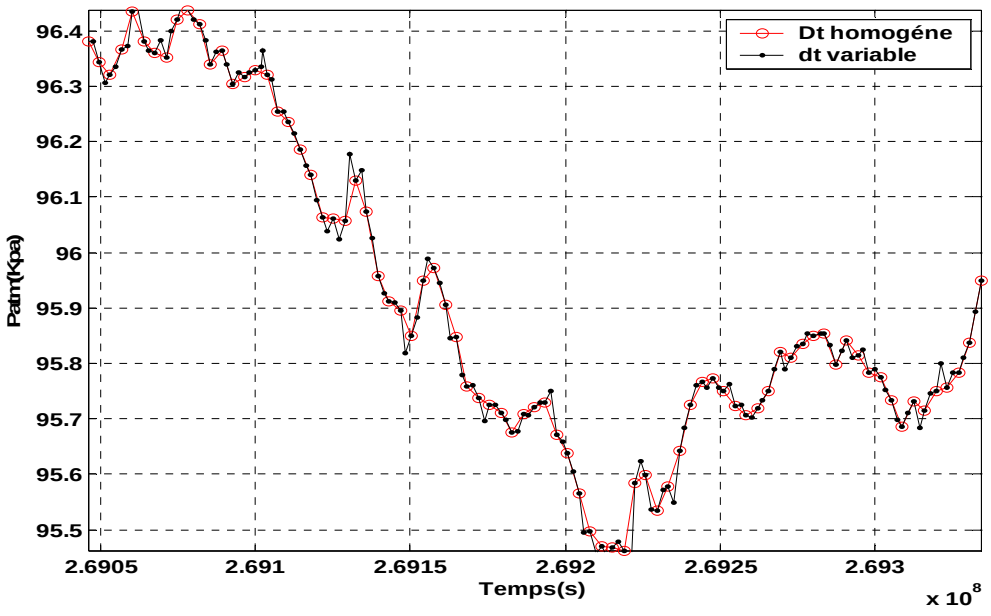



Figure 14 : Exemple de prétraitement d'un tronçon de 3 jours de la chronique PATM(t) du Mont Terri pour la période du 27/06/2005-30/06/2005 : comparaison de la chronique brute à Δt(i) variable avec la chronique « homogénéisée » à Δt0 constant (choix Δt0=3600 s).

## *3.6 Reconstitution de lacunes à l'aide d'un processus autorégressif*

### 3.6.1 Etude du modèle de processus Auto-Régressif d'ordre 1 (AR1)

#### *3.6.1.1 Présentation du modèle AR1*

Dans le cas de plages de lacunes relativement longues, les méthodes d'interpolation linéaire sont inadéquates. On développe ici une méthode alternative basée sur un modèle de processus aléatoire ('AR1').

Le modèle auto-régressif d'ordre 1 (AR1) suppose que le processus étudié (par exemple une chronique de Pression atmosphérique ou de hauteur d'eau) est régi en temps discret par une équation de la forme :

$$X_{n+1} = \rho_1 X_n + s\varepsilon_{n+1} \qquad \textbf{(3.1)}$$

avec n le nombre de pas de temps

ou encore selon la notation de *Box et Jenkins* reprise par *Bras et Rodriguez-Iturbe* :

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + a_t \qquad \textbf{(3.2)}$$

t étant alors le temps discret.

Ce modèle génère un processus Zt qui peut être stationnaire ou non. Cependant, il existe une condition initiale pour que le processus soit stationnaire. Dans ce cas, la variance du processus est nécessairement constante et égale à :

$$\sigma_Z^2 = \frac{\sigma_a^2}{1-\phi_1^2} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Et de plus, on montre également que le paramètre $\phi_1$ est égal à l'autocorrélation $\rho_1$ du processus pour un délai unitaire ($\tau = 1\times\Delta t$) :

$$\phi_1 = \rho_1$$

Où, par définition :

$$\rho_1 = \frac{Cov\big(Z(t+\Delta t), Z(t)\big)}{\sigma_Z^2} = \frac{C_{ZZ}(\Delta t)}{\sigma_Z^2} = \rho_{ZZ}(\Delta t) \qquad \textbf{(3.4)}$$

Noter que $\rho_1$ peut encore être appelé « one-lag corrélation ».

#### *3.6.1.2 Relation entre temps discret (AR1) et temps continu (Langevin)*

Rappelons que le modèle auto-régressif d'ordre 1 (AR1) est en temps discret ($t_n = n\Delta t$).

On peut montrer **(3.5)** en passant à la limite $\Delta t \to 0$, que le processus AR1 est équivalent au modèle de Langevin, selon lequel le processus X(t) est régi en temps continu par l'équation différentielle stochastique :

$$\frac{dX}{dt} + \lambda_0 X(t) = \sigma_0 f(t) \qquad \textbf{(3.5)}$$

Pour $t \geq 0$ et $X(0) = 0$.

Le forçage f(t) est un *bruit blanc* unitaire gaussien d'auto-covariance : $C_{ff}(\tau) = \delta(\tau)$.

Et g(t)=$\sigma_0$ f(t) est un *bruit blanc* non-unitaire *d'intensité* $\mathbf{c_0 = \sigma_0^2}$ : $C_{gg}(\tau) = c_0\,\delta(\tau)$.

La condition initiale déterministe X(0) = Xo = 0 fait que X(t) n'est pas stationnaire aux temps courts ; mais pour $t \to \infty$, X(t) tend quand même vers un processus stationnaire de moyenne nulle et de covariance :

$$C_{XX}(t,t+\tau) \approx \left( \sigma_0^2 \Big/ 2\lambda_0 \right) \exp(-\lambda_0 . |\tau|) \qquad \textbf{(3.6)}$$

si $t >> \tau_0$ avec $\tau_0 = 1/\lambda_0$ ,

où $\tau_0 = 1/\lambda_0$ est le temps d'autocorrélation du processus de Langevin X(t).

Si l'on prend comme condition initiale une variable aléatoire $X_0$ de moyenne nulle et de variance $(\sigma_0^2 / 2\lambda_0)$, le processus de Langevin est alors stationnaire ($\forall$t). Ceci est tout à fait analogue au cas du processus AR1 en temps discret.

Partons d'un processus de Langevin en temps continu, et voyons ce qu'il devient après discrétisation temporelle (intégration de Langevin sur des pas de temps $\Delta$t finis) :

$$\frac{dX}{dt} + \lambda_0 X(t) = \sigma_0 f(t) \;\Rightarrow\; X_{n+1} = \rho_1 X_n + s\varepsilon_{n+1} \qquad \textbf{(3.7)}$$

Processus de LANGEVIN Processus AR1

En intégrant l'équation de Langevin entre t(n) et t(n+1), on aboutit à un schéma de type différences finies explicites (schéma d'Euler « avant »).

On peut calculer la variance du 2nd membre de cette équation discrète (le 2nd membre est le bruit blanc intégré entre t(n) et t(n+1)). Cette variance est égale $c_0/\Delta$t.

En remaniant l'équation aux différences obtenues, on voit finalement qu'elle est bien de la forme de l'équation autorégressive AR1 en temps discret, avec les paramètres :

$$s = \sqrt{c_0 \Delta t} \qquad \textbf{(3.8)}$$

$$\rho_1 = \frac{1 - \left( \lambda \Delta t \Big/ 2 \right)}{1 + \left( \lambda \Delta t \Big/ 2 \right)} \qquad \textbf{(3.9)}$$

**Remarques** : ($\forall\Delta$t) le paramètre $\rho_1$ est toujours compris dans l'intervalle [-1,+1]. Ainsi, $\rho_1$ peut être interprété comme un « lag-one corrélation » ($\forall\Delta$t) ; de plus, cette corrélation $\rho_1$ peut être positive ou négative, selon le pas de temps $\Delta$t utilisé.

A l'inverse, en faisant tendre $\Delta t \to 0$, on voit que le processus AR1 tend bien vers un processus de Langevin (*C.Q.F.D.*).

### 3.6.1.3 *Formulation modèle AR1 et Thomas-Fiering.*

Le modèle de Thomas-Fiering est, simplement, le modèle AR1 formulé comme suit (formulation équivalente aux précédentes, sauf que le processus peut avoir plus généralement une moyenne $\mu$ non nulle) :

$$X_t - \mu = \rho_1\left(X_{t-1} - \mu\right) + \sigma_X \sqrt{1-\rho_1^2} W_t \qquad \textbf{(3.10)}$$

où 't' représente le temps discret.

*Modèle non-stationnaire saisonnier de Thomas-Fiering*. Cette généralisation du modèle AR1 consiste à rendre la moyenne, la variance et la corrélation lag-one ($\rho_1$) dépendantes de la « saison » : le modèle est alors non-stationnaire de type saisonnier. L'autocorrélation du processus dépend non seulement du délai $\tau$ (lag-one : $\tau = 1\times\Delta t$) mais aussi de la saison (j-*ème* saison de l'année). Ce modèle AR1-saisonnier s'écrit :

$$X_{t,j} - m_j = \rho_{1,j}\left(X_{t,j-1} - m_{j-1}\right) + \sigma_j \sqrt{1-\rho_{1,j}^2} W_{t,j} \left[\begin{array}{l} t = n\Delta t \\ j = 1,\ldots J \end{array}\right] \qquad \textbf{(3.11)}$$

- Le paramètre ($\rho_{1,j}$) est l'autocorrélation « lag-one » entre saisons (j-1) et (j).
- Le processus ($X_{t,j}$) représente le débit au temps discret (t) dans la saison (j).
- Si J est la dernière saison de l'année (J=4), on pose : $X_{t,J+1} = X_{t+1,1}$.

| Année (t-1) | | | | Année (t) | | | | … |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Saison j=1 | Saison j=2 | Saison j=3 | Saison j=4 | Saison j=1 | Saison j=2 | Saison j=3 | Saison j=4 | … |

### *3.6.1.4 Caractérisation et identification statistique du processus autorégressif AR1*

On étudie ici les propriétés statistiques du modèle auto-régressif d'ordre 1 (AR1), ce qui mène à démontrer une condition de stationnarité et à obtenir ses propriétés stationnaires (variance, autocovariance). Une fois cette caractérisation théorique connue l'identification d'une chronique hydrologique réelle à un processus de type AR1 devient possible, par comparaison/ajustement.

Equation du processus AR1 :

$$\begin{cases} X_{n+1} = \rho_1 X_n + s\varepsilon_{n+1} \\ t = 0, X = X_0 \end{cases} \qquad \textbf{(3.12)}$$

Notations :

$$X_n = X(t_n); \varepsilon_n = \varepsilon(t_n); t_n = n.\Delta t \qquad \textbf{(3.13)}$$

*a) Moyenne :*

$$\langle X_{n+1}\rangle = \rho_1\langle X_n\rangle + s\langle \varepsilon_{n+1}\rangle$$

$$\langle X_{n+1}\rangle = \rho_1\langle X_n\rangle + 0 \qquad \textbf{(3.14)}$$

$$\langle X_{n+1}\rangle = (\rho_1)^{n+1}\langle X_0\rangle$$

$$\langle X_0\rangle = 0 \;\Rightarrow\; \langle X_n\rangle = 0 \;\; (\forall n) \qquad \textbf{(3.15)}$$

*b) Covariance :*

$$\langle X_n X_m\rangle = ....$$

Si m > n, posons m = n+k avec k = m-n > 0 :

$$\langle X_n X_m\rangle = \langle X_n X_{n+k}\rangle$$

Calcul auxiliaire donne :

$$X_{n+k} = \rho^k X_n + s\sum_{j=1}^{j=k}\rho^{j-1}\varepsilon_{n+k-j+1} \qquad \textbf{(3.16)}$$

$$\langle X_n X_{n+k}\rangle = \left\langle X_n\left(\rho^k X_n + s\sum_{j=1}^{j=k}\rho^{j-1}\varepsilon_{n+k-j+1}\right)\right\rangle \qquad \textbf{(3.17)}$$

$$\langle X_n X_{n+k}\rangle = \rho^k\langle X_n X_n\rangle + s\sum_{j=1}^{j=k}\rho^{j-1}\langle X_n\varepsilon_{n+k-j+1}\rangle$$

$$\langle X_n\varepsilon_{n+k-j+1}\rangle = 0 \;\; \forall(k-j+1)\geq 1 \qquad \textbf{(3.18)}$$

En effet, les $X_n$ ne dépendent pas des $\varepsilon_m$ futurs (m>n)

$$\langle X_n X_{n+k}\rangle = \rho^k\langle X_n X_n\rangle \Rightarrow \langle X_n X_m\rangle = \rho^{m-n}\langle X_n X_n\rangle \;\; \forall m \succ n \qquad \textbf{(3.19)}$$

Si m < n, posons m = n-k avec k = n-m > 0 :

On obtient de même après calcul :

$$\langle X_n X_{n+k}\rangle = \rho^k\langle X_n X_n\rangle \Rightarrow \langle X_n X_m\rangle = \rho^{m-n}\langle X_n X_n\rangle \;\; \forall m \prec n \qquad \textbf{(3.20)}$$

On obtient finalement :

$$\langle X_n X_m\rangle = \rho^{|n-m|}\times Var\left(X\left(\min(t_n,t_m)\right)\right) \qquad \textbf{(3.21)}$$

*c) Variance.*

Il reste encore à calculer la variance de Xn.

Réutilisons la formule :

$$X_n = \rho^k X_0 + s\sum_{j=1}^{j=n}\rho^{j-1}\varepsilon_{n-j+1} \qquad \textbf{(3.22)}$$

$$Var(X_n) = \langle X_n X_n \rangle = \left\langle \left( \rho^k X_0 + s\sum_{j=1}^{j=n} \rho^{j-1} \varepsilon_{n-j+1} \right)^2 \right\rangle$$
$$= \rho^{2k} \langle X_0 X_0 \rangle + 2\rho^k s \sum_{j=1}^{j=n} \rho^{j-1} \langle X_0 \varepsilon_{n-j+1} \rangle + s^2 \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} \rho^{i-1} \rho^{j-1} \langle \varepsilon_{n-i+1} \varepsilon_{n-j+1} \rangle \quad \textbf{(3.23)}$$

Avec :

$$\sigma_{X_0}^2 = \langle X_0 X_0 \rangle$$

$$\langle X_0 \varepsilon_{n-j+1} \rangle = 0$$

Car $X_0$ ne dépend pas des $\varepsilon$ futurs

$$\langle \varepsilon_{n-i+1} \varepsilon_{n-j+1} \rangle = \delta_{i,j} \quad \textbf{(3.24)}$$

Par construction ($\delta_{ij}$ = symbole de Kronecker)

Avec $\langle \varepsilon_{n-i+1} \varepsilon_{n-j+1} \rangle = \delta_{i,j}$ **(3.25)**

La double somme se réduit à une simple somme (série géométrique) et tous les autres termes disparaissent.

En utilisant alors l'identité :

$$\sum_{i=1}^{i=n} \rho^{2i} = \rho^2 \frac{1-\rho^{2n}}{1-\rho^2} \quad \textbf{(3.26)}$$

On obtient :

$$Var(X_n) = \rho^{2n} \sigma_{X_0}^2 + s^2 \frac{1-\rho^{2n}}{1-\rho^2} \quad \textbf{(3.27)}$$

*Condition de stationnarité sur la variance.*

On voit que la variance du processus AR1 est en général non stationnaire sauf si l'on choisit la variance initiale ($\sigma_{X0}^2$) pour que le processus soit stationnaire. Ce choix existe ; on peut le voir en cherchant à annuler le terme qui dépend de ($\rho^{2n}$) :

$$Var(X_n) = \rho^{2n} \times \left( \sigma_{X_0}^2 - s^2 \frac{1}{1-\rho^2} \right) + s^2 \frac{1}{1-\rho^2} \quad \textbf{(3.28)}$$

$$\Rightarrow \sigma_{X_0}^2 = \frac{s^2}{1-\rho^2} \quad \textbf{(3.29)}$$

La variance du processus est alors bien constante :

$$Var(X_n) = \sigma_{X_0}^2 = \frac{s^2}{1-\rho^2} \quad \textbf{(3.30)}$$

## 3.6.2 Tests de reconstitution de lacunes avec modèle AR1 (Δt constant)

### *3.6.2.1 Introduction*

Dans cette partie nous utilisons le modèle autorégressif (AR1), soit pour générer des chroniques synthétiques, soit plus concrètement, pour reconstituer des données manquantes, c'est-à-dire, reconstruire une partie d'un signal. La chronique à traiter (pression interstitielle, atmosphérique, ou autre) sera désignée génériquement par « X(t) ».

Pour illustrer le problème de reconstruction nous utilisons une chronique de pression atmosphérique qui semble a priori 'stationnaire' sur une échelle de temps pluri mensuelle (3 mois). Dans un premier temps nous créons des lacunes artificielles sur une période de 4 jours en supprimant des données réelles, puis nous procédons à une reconstitution préliminaire (moyenne globale), afin de calculer un résidu (signal résiduel) que nous utilisons par la suite pour la reconstitution finale des lacunes par le modèle autorégressif AR1.

Le processus AR1 est décrit dans de nombreux ouvrages, tels que Bras & Rodriguez-Iturbe (1985), et Box & Jenkins (1976), entre autres. Cependant, la plupart des développements théoriques ci-dessous ont été empruntés à Ababou 2007 (Cours d'Hydrologie Statistique, Polycopié), dans lequel une relation entre temps continu et temps discret est également présentée. A partir de cette théorie, nous définissons plus loin une méthode d'estimation, ainsi qu'une symétrisassions du processus AR1, qui semble utiles en pratique pour une reconstitution 'opérationnelle' d'un signal présentant des lacunes.

L'équation (3.31) du processus AR1 en temps discret $t_n$ s'écrit :

$$\begin{cases} X_{n+1} = \rho_1 X_n + s\varepsilon_{n+1} \\ t = 0; X = X_0 \\ X_n = X(t_n); \varepsilon_n = \varepsilon(t_n); t_n = n\Delta t \end{cases} \qquad \textbf{(3.31)}$$

n : étant le nombre de pas de temps

$X_0$ : est un variable aléatoire

$\varepsilon_{n+1}$ : est un processus purement aléatoire et la moyenne de $\varepsilon_n$ vaut 0($\langle \varepsilon_n \rangle = 0 \ \ \forall n$)

$$\mathrm{cov}(\varepsilon_n, \varepsilon_m) = \begin{cases} 0 & si \quad m \neq n \\ {\sigma_\varepsilon}^2 & \quad m = n \end{cases} \qquad \textbf{(3.32)}$$

La première étape indispensable est l'identification des paramètres du modèle AR1

D'une autre façon calculer les deux constantes ($\rho_1$, s).

$\rho_1$ : est l'auto corrélation au délai ($\tau_1$=1 Δt )

$$\rho_1 = \rho_{xx}(\tau_1) = \rho_{xx}(\Delta t) \qquad -1 \leq \rho_1 \leq 1$$

$\varepsilon_{n+1}$ :terme aléatoire (N(0,1) loi normal gaussienne

Pour déterminer $\rho_1$ et s il existe deux méthodes, voir paragraphe **(3.6.2.2)**

L'auto covariance de $X_n$ donne :

Cov(X ($t_n$), X($t_m$)) =$C_{xx}$($t_m$-$t_n$) =$C_{xx}$ (τ)

$$Cov\big(X(t_n), X(t_m)\big) = C_{xx}(t_m - t_n) = C_{xx}(\tau) \quad \textbf{(3.33)}$$

Avec: délai $\tau_{m-n}=t_m-t_n=(m-n)\,\Delta t$

$$C_{xx}(t_n, t_m) = \rho_1^{|n-m|} \times Var(X_n) \quad \textbf{(3.34)}$$

L'autocorrélation de Xn s'écrit pour Var($X_n$)=constante.

$$\rho_{xx}(\tau_{n-m}) = R_{xx}(\tau_{n-m}) = \rho_1^{|n-m|} \quad \textbf{(3.35)}$$

On peut écrire d'une autre façon

$$\rho_{xx}(\tau_{n-m}) = R_{xx}(\tau_{n-m}) = \rho 1^{\frac{|m-n|\times\Delta t}{\Delta t}} = \rho 1^{\frac{|\tau_{m-n}|}{\Delta t}} \quad \textbf{(3.36)}$$

On pose k=m-n délai discret

$$\rho_{xx}(\tau_k) = R_{xx}(\tau_k) = \rho 1^{\frac{|\tau_k|}{\Delta t}} \quad \textbf{(3.37)}$$

Si $\rho_1>0$

Équivalent à :

$$R_{xx}(\tau_k) = \exp\left[\frac{|\tau_k|}{\Delta t}\ln\rho_1\right] = \exp\left[-\frac{|\tau_k|}{\Delta t}\ln\frac{1}{\rho_1}\right] \quad \textbf{(3.38)}$$

Où

$$R_{xx}(\tau_k) = \exp\left[-\frac{|\tau_k|}{\tau_{car}}\right] \quad \textbf{(3.39)}$$

Avec

$$\tau_{car} = \frac{\Delta t}{\ln\frac{1}{\rho_1}} \quad \textbf{(3.40)}$$

Ou bien

$$R_{xx}(k) = \exp\left[-|k|\ln\left(\frac{1}{\rho_1}\right)\right] \quad \textbf{(3.41)}$$

Avec $\tau_k=k\times\Delta t$

Si $\rho_1<0$

$$R_{xx}(k) = (-1)^k \exp\left[-|k|\ln\left(\left|\frac{1}{\rho_1}\right|\right)\right] \quad \textbf{(3.42)}$$

### *3.6.2.2 Méthodes d'identification du modèle AR1*

La première méthode consiste à tracer la droite log($R_{xx}$(k), d'où l'équation :

$$\log|R_{xx}(k)| = \log\left(\exp\left[-|k|\ln\left(\frac{1}{\rho_1}\right)\right]\right) \quad \textbf{(3.43)}$$

ce qui donne :

$$\log|R_{xx}(k)| = -|k|\ln\left(\frac{1}{\rho_1}\right) \quad \textbf{(3.44)}$$

Il suffit de calculer la pente de la courbe log($R_{xx}$(k)) par régression linéaire :

$$Pente = -\ln\left(\frac{1}{\rho_1}\right), \quad \textbf{(3.45)}$$

puis de déduire les paramètres (ρ1, s) ainsi que la variance de X(t).

La deuxième méthode consiste à calculer l'autocorrélation au délai k=1

$$R_{xx}(1) = \rho_1$$

Apres avoir calculé ρ1 on calcule le coefficient 's' ; pour cela on écrit la relation qui lie l'autocovariance et l'autocorrélation comme suit :

$$Rxx(\tau) = \frac{Cxx(\tau)}{\sigma x^2} \quad \textbf{(3.46)}$$

$$\sigma_x^2 = Var(x) = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{i=N} \left(x_i - \langle x \rangle\right)^2 \quad \textbf{(3.47)}$$

$$\sigma_x = \sqrt{Var(x)}$$

$R_{xx}$ : l'autocorrélation au délai k

$C_{xx}$ : l'autocovariance au délai k

$\sigma_x$: l'écart type ou *Standard deviation*

Le modèle AR1 génère un processus $X_{n+1}$ stationnaire de moyenne nulle et de variance constant quelque soit le temps c'est-à-dire Var($X_{n+1}$)=Var($X_n$)=constante ($\forall$ t).

$$Var(X_{n+1}) = Var(\rho_1 \times X_n) + Var(s + \varepsilon_{n+1}) \quad \textbf{(3.48)}$$

$$\sigma_{Xn}^2 = \rho_1^2 \times \sigma_{Xn}^2 + s^2 \times \sigma_\varepsilon^2$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = 1$$

Ceci donne la condition de stationnarité de $x_n$ :

$$\sigma_{xn}{}^2 = \sigma_{x0}^2 = \frac{s^2}{1-\rho_1^2} \; ; |\rho_1| \prec 1 \quad \textbf{(3.49)}$$

d'où :

$$s^2 = (1-\rho_1^2)\sigma_x^2 \quad \textbf{(3.50)}$$

On obtient la valeur de 's' grâce à l'estimation précédente de l'autocorrélation de X(t) au délai '1' (voir $\rho_1$ ci-dessus), et de la variance ($C_{xx}(0)$). On en déduit 's' par :

$$s = \sqrt{(1-\rho_1^2)}\sigma_x \qquad \textbf{(3.51)}$$

### *3.6.2.3 Test de validation sur une chronique de Patm avec lacunes artificielles*

Dans cette partie nous implémentons un test de validation sur une chronique de pression atmosphérique (Patm). Le test consiste à reconstituer des lacunes artificielles dont nous connaissons les valeurs. Nous utilisons la deuxième méthode d'identification (par l'autocorrélation au délai k=1). Pour cela, nous utilisons la chronique de pression atmosphérique montrée dans la Figure 15.

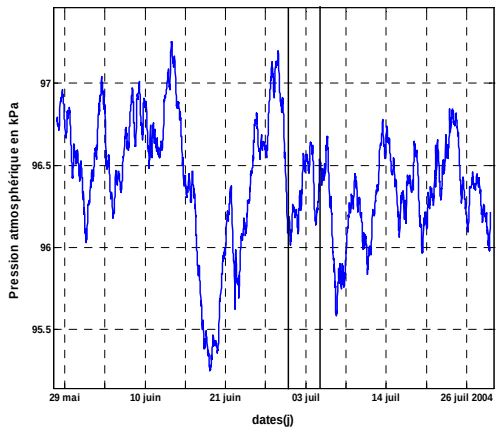



Figure 15 : Chronique de pression atmosphérique au Mont Terri, avec Δt=30min, pour la période 28/05/2004-29/07/2004.

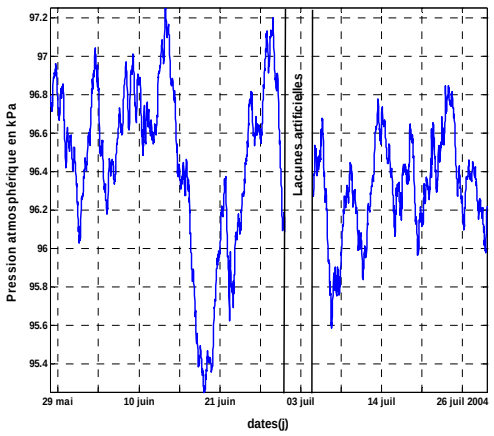



Figure 16: Chronique de pression atmosphérique montrant la plage des lacunes artificielles (Nlac=192), avec Δt=30min, pour la période 28/05/2004-29/07/2004.

On crée des lacunes artificielles dans l'intervalle [1614,1805] en nombre de valeur ce qui correspond au dates [01/07/2004-05/07/2004] ce qui donne 192 valeurs manquantes soit 4 jours en échelle temporelle voir Figure 16.

L'objectif est de reconstituer ces lacunes artificielles grâce au modèle autorégressif. Dans un premier temps, nous faisons une reconstitution préliminaire $X_0(t)$ avec moyenne constante globale, afin de calculer le résidu $X_R(t)$ de $X_0(t)$ : voir Figure 17. Ensuite, nous déterminons la fonction d'autocorrélation Rxx(k) de $X_R(t)$ montrée en Figure 18.

On pourrait utiliser aussi la moyenne mobile au lieu de la moyenne constante globale, pour calculer le résidu $X_R(t)$ utilisé dans la reconstitution. Ici le résidu est égal au signal X(t) à une constante près ($m_o$).

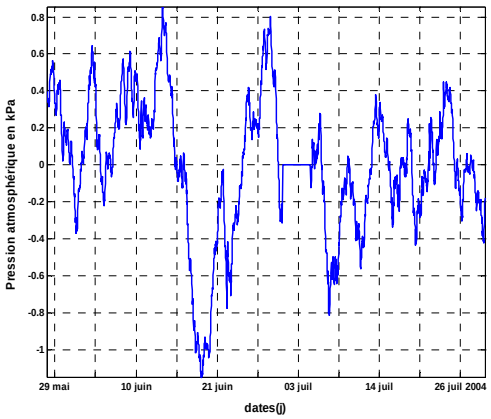



Figure 17: Résidu $X_R(t)$ de la chronique de pression atmosphérique avec lacunes reconstituées par la moyenne X0(t) et Δt=30min, pour la période 28/05/2004-29/07/2004.

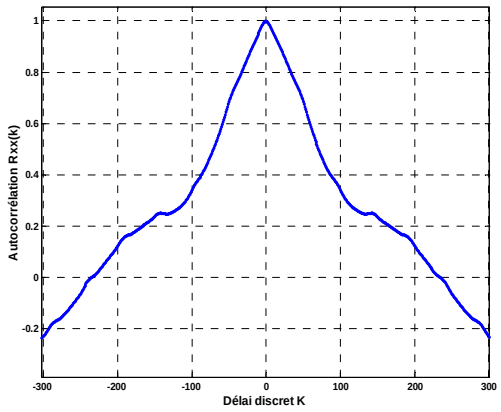



Figure 18: Fonction d'autocorrélation Rxx(k) du résidu $X_R(t)$ de la pression atmosphérique avec Δt=30min, et M=±300Δt.

La deuxième étape consiste à générer les données manquantes par le modèle AR1,

$$\begin{cases} X_{n+1} = \rho_1 X_n + s\varepsilon_{n+1} \\ t = 0; X = X_0 \\ X_n = X(t_n); \varepsilon_n = \varepsilon(t_n); t_n = n\Delta t \end{cases} \quad \textbf{(3.31bis)}$$

$\varepsilon_{n+1}$ : générateur du signal (pseudo) aléatoire à distribution normale ou gaussienne (N(0,1) équivalent à randn de Matlab).

A partir des figures Figure 17 et Figure 18 nous calculons la variance de Xr(t) et l'autocorrélation au délai k=1 (Rxx(k=1)) ensuite nous déduisons les coefficients.

$$s = \sqrt{(1-\rho_1^2)}\sigma_x \quad \textbf{(3.51bis)}$$

$$s = 0.052$$

$$\rho_1 = 0{,}99$$

Après avoir déterminé les deux coefficients ($\rho_1$,s), on applique le modèle autorégressif sous forme modifiée « bidirectionnelle » au signal de la Figure 16, et nous obtenons ainsi la chronique avec les lacunes reconstituées par AR1. Le résultat est montré dans la Figure 19.

La version modifiée « bidirectionnelle » du modèle autorégressif consiste à appliquer le modèle de l'équation **3.31bis** pour le résidu du signal d'origine X(t) dont les lacunes sont déjà reconstituées au préalable par la moyenne constante globale (mo) ou la moyenne mobile (MM), de gauche à droite (Xgd(n))et de droite à gauche(Xdg(n)) de la plage de lacunes. Cela consiste ensuite à calculer la moyenne de Xgd(t) et Xdg(t). La version modifiée « bidirectionnelle » du modèle autorégressif permet enfin d'ajouter soit la moyen mobile du signal d'origine X(t) ou sa moyenne globale constante $m_0$.

Cette reconstitution « bidirectionnelle » satisfait les deux valeurs à gauche et droite de la plage de lacunes.

NB : le signal Xdg(n) est obtenu par une simple conversion de l'équation **(3.31bis)** comme suit :

$$X_{dg}(n) = \frac{\left(X_{dg}(n+1) - s\varepsilon_{n+1}\right)}{\rho_1} \qquad \textbf{(3.32bis)}$$

Le résidu calculé à partir des équations (3.31bis) et (3.32bis) est :

$$X_r(n) = \frac{X_{gd}(n) + X_{dg}(n)}{2} \qquad \textbf{(3.33bis)}$$

Finalement le signal reconstitué par AR1 avec moyenne constante globale (m0) ou moyenne mobile glissante (MM) est donné respectivement par les deux équations (3.34bis) et (3.35bis) comme suit :

$$X_{AR1}(t) = X_r(t) + m_0) \qquad \textbf{(3.34bis)}$$

$$X_{AR1}(t) = X_r(t) + MM \qquad \textbf{(3.35bis)}$$

N.B Xr(t) est différent de XR(t)(Figure 17). En effet Xr(t) est calculé à partir du modèle autorégressif (**3.33bis**) tandis que XR(t) est calculé par une simple soustraction (X(t)-m0 ou X(t)-MM).

Nous avons appliqué cette méthode pour la reconstitution des signaux stationnaire

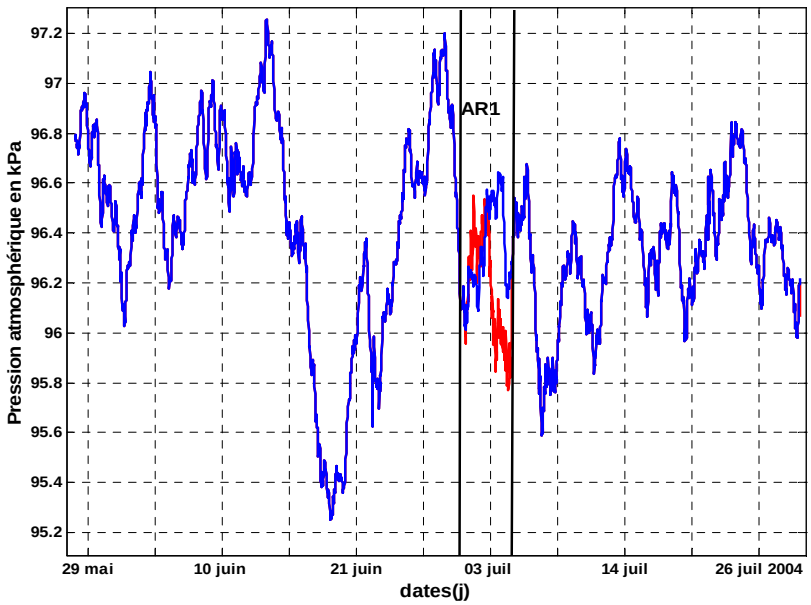



Figure 19: Comparaison du signal reconstitué (XAR1(t)en rouge) et du signal d'origine (X(t)en bleu) (zoom sur la plage de lacunes : voir figure précédente).

Pour valider cette reconstitution statistiquement, nous avons calculé les moments avant, et après reconstitution des lacunes artificielles. Le **Tableau 4** montre les valeurs calculées pour chaque chronique.

| Patm en kPa | Chronique d'origine X(t) | Résidu $X_R(t)$ | Chronique reconstitué $X_{AR1}(t)$ |
|---|---|---|---|
| Moyenne (mo) | 96.39 | 0 | 96.38 |
| Ecart type(σ) | 0.37 | 0.38 | 0.38 |
| Variance (var) | 0.14 | 0.14 | 0.14 |

Tableau 4: Moments statistiques pour chaque chronique de pression atmosphérique avec Δt=30 min période (28/05/2004-29/07/2004).

X(t) : le signal originale sans lacune
$X_R(t)$ : le résidu du signal $X_0(t)$
$X_{AR1}(t)$ : le signal dont les lacunes artificielles sont reconstitués par AR1

Le signal $X_0(t)$ dont les lacunes sont reconstituées par la moyenne constante globale (les statistiques de $X_0(t)$ sont cohérentes à celle de X(t).

**L'annexe (1)** montre un exemple d'application de reconstitution des lacunes réelles dans la chronique de pression atmosphérique mesurée dans la galerie de reconnaissance du site de Mont Terri. Il y avait quatre plages de lacunes dont la plus longue et de durée 1 mois et la plus petite et de durée ½ jours par rapport à une durée totale de la chronique de 2 ans. Dans ce cas on voit que l'écart type du signal originel est de 0.76 alors que l'écart type du signal reconstitué est de 0.71.

#### *3.6.2.4 Conclusion partielle*

Le modèle autorégressif AR1 est une méthode de reconstitution des lacunes parmi d'autres (interpolation linéaire,…). Les méthodes de type interpolation linéaire ne sont pas satisfaisantes quand les lacunes sont longues (en nombres de pas de temps). Dans ces cas, la méthode d'autorégression peut fournir une alternative. Notre test de validation montre que le signal $X_{AR1}(t)$ possède presque les mêmes statistiques que le signal d'origine X(t).

Pour le future on pourra chercher différentes techniques de pré-filtrage (moyenne mobile, régression non linéaire) suivi d'une étape de reconstitution du résidu, par un modèle de type AR1 ou plus général modèle Bayesien.

Dans cette partie nous avons effectués des tests partiels de l'influence des paramètres de prétraitements et d'analyse sur les résultats des analyses statistiques. Cependant il n'y a pas un test systématique pour toute la chaine de traitement d'analyse. Pour cela, il faudrait donc, peut être générer par modélisations hydromécaniques une réalité virtuelle complète (ε(t), P(t), Patm(t), g(t), perturbations,…..).

*Modèle bayésienne :*

L'objectif de cette méthode et l'utilisation de XIMUL en deux étapes pour testes synthétiques de reconstitutions des lacunes par méthode d'estimation et simulation conditionnelle BAYESIENNE (méthode non paramétrique), puis l'ajustement du modèle à la fonction d'autocorrélation par paramétrisation.

La méthode s'appuis sur la probabilité conditionnelle. Pour puisse faire une meilleure estimation des valeurs manquantes en se basant sur des données connues dites conditionnelles.

# *4 Méthodes d'analyses statistiques des séries temporelles*

## *4.1 Méthodes d'analyse statistique (vue d'ensemble)*

Certaines méthodes d'analyse statistique ont été développées partiellement dans le **Rapport Technique N°.1** intitulé **«** *Méthodologie de prétraitement et d'analyse du signal. Application aux chroniques de données multi variées obtenues au Mont Terri* **».**

Dans ces analyses, on cherche en particulier à mettre en évidence l'influence des fluctuations d'échelle de temps diurne et semi-diurne, ceci en vue de la caractérisation hydraulique du massif en relation (respectivement) avec :

- les effets barométriques (à dominante diurne), et
- les effets de marée terrestre (à dominante semi-diurne).

Dans ces analyses nous utilisons aussi certains filtres (moyenne mobile, différenciation,….)

Le filtre moyenne mobile isole la tendance, absorbe les structure périodiques et atténue la variance instantanée aléatoire, Il élimine les périodicités égales ou sous-multiples de l'amplitude du filtre choisi, tandis que le filtre différenciation permet d'éliminer la tendance de manière à rendre visible les phénomènes de courtes périodicités.

Cependant, par souci de complétude, nous exposons ici l'ensemble des techniques d'analyse, certaines étant reprises de l'ancien rapport, mais complétées ici, et d'autres entièrement nouvelles et non exposées précédemment, telles que :

- Analyse corrélatoire et spectrale univariée ;
- Analyse croisée spectrale (spectre de phase et de cohérence) ;
- Analyse en ondelette continue de Morlet (scalogramme) ;
- Identification de fonctions de transferts temporelles (croisée) ;
- Analyse croisée multi-résolution (composante par composante) ;
- Analyse des Enveloppes par méthode de Hilbert.

L'analyse corrélatoire étudie l'évolution des événements entre eux dans le domaine temporel. L'analyse spectrale traduit les structures du signal à partir des fonctions périodiques en décomposant la variance de la variable étudiée dans le domaine fréquentiel. L'analyse univariée correspond au traitement d'une seule chronique et l'analyse croisée traite simultanément deux chroniques, l'une étant considérée comme la cause de l'autre. A la fin de ce rapport **l'annexe 1** montre la boite à outil d'analyse des séries temporelles programmées sous Matlab.

## *4.2 Filtrages temporels (moyenne mobile, différenciation)*

### 4.2.1 Moyenne mobile temporelle (filtre intégrateur linéaire)

On dispose d'une chronique aléatoire avec un pas de temps variable Δt (i), Pour calculer la moyenne mobile à fenêtre glissante Δtw (i) à travers des valeurs de la chronique, Voici ci-dessous le schéma montré dans la Figure 20 qui explique en détail l'algorithme simplifié du programme. La valeur de Wt et Wmax est choisie par l'utilisateur en

fonction des pas de temps variable Δt (i), et s'écrit en fonction de l'indice i sous la forme suivante équation (4.1) :

$$\Delta tw(i) = \frac{\left(t(i+1) - t(i-1)\right)}{2} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Notation :

$\Delta t_w$ (i) : Est le pas du temps pondéré centré autour de l'instant $t_i$ ;

$w_t$ : Est la taille de demi fenêtre en secondes ;

Wmax : Estimation de la taille maximale de cette demi-fenêtre en nombre de pas de temps ;

Δt(i) : Le pas du temps variable de la chronique en secondes ;

t(i) : Le temps absolu en secondes ;

$w_t$ : Doit vérifier la condition suivante, $w_t \geq \Delta t(i)$.

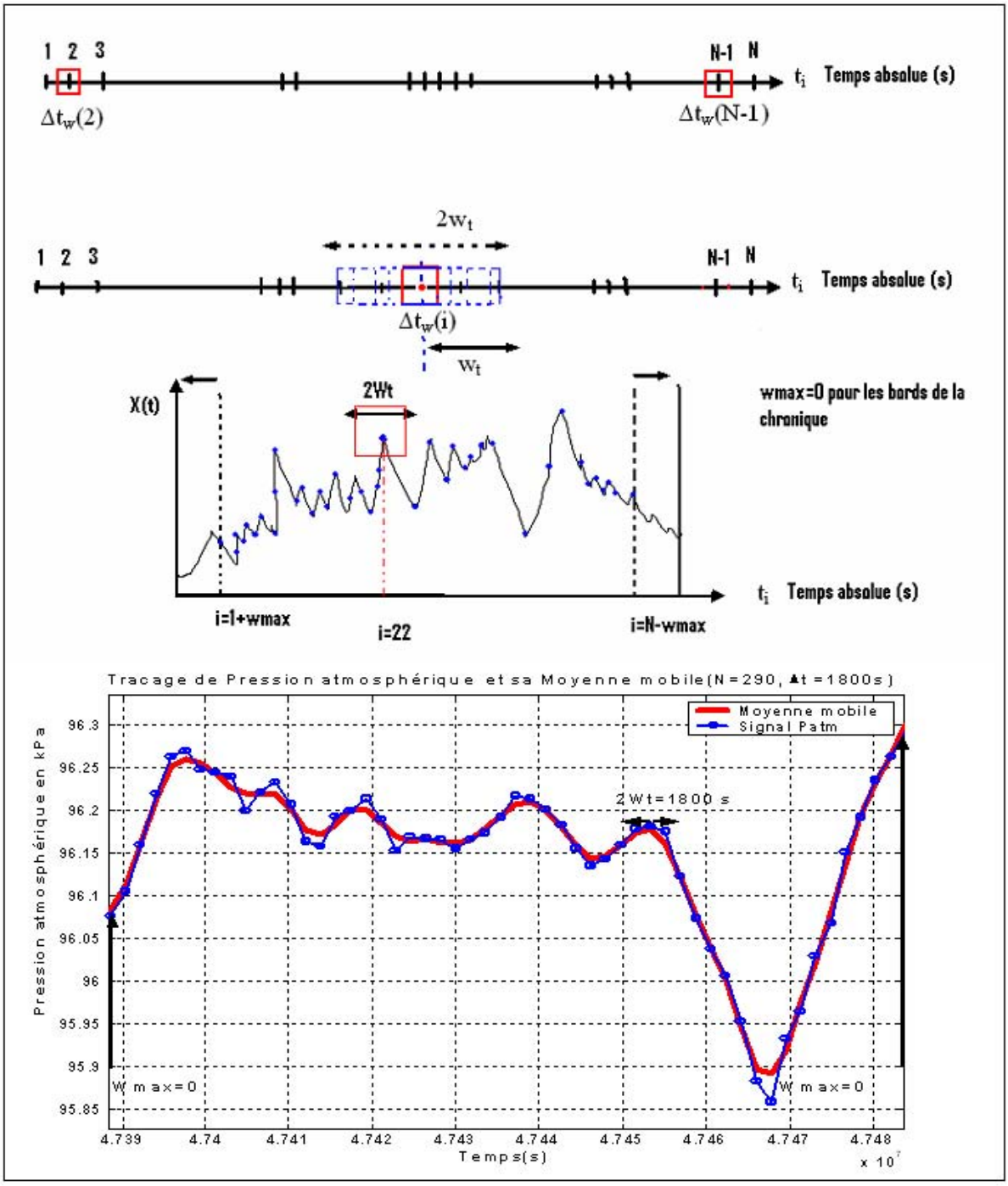



Figure 20: Calcul de la moyenne mobile pour une chronique aléatoire de pression atmosphérique de pas de temps Δt (i).

### 4.2.2 Filtre de différenciation temporelle d'ordre 1

Ce filtre permet d'éliminer la tendance en procédant au calcul de l'accroissement ponctuel de la chronique.

Soit X (t) une chronique, la chronique différenciée ΔY(t) est donnée par l'équation **(4.2).**

$$\Delta Y(t) = X(n+1) - X(n) \qquad \textbf{(4.2)}$$

Note : dans le cas où le pas du temps est variable, la dérivée de la fonction X(t) s'écrit sous la forme :

$$\Delta Y(t) = \frac{X(n+1) - X(n)}{t(n+1) - t(n)} \qquad \textbf{(4.3)}$$

Par la suite nous avons utilisé la dérivée première de l'équation **(4.2)** plutôt que la dérivée de l'équation **(4.3)**, la distinction n'est pas importante lorsque Δt est constante.

Cette méthode conserve la structure et l'amplitude des phénomènes tout en éliminant la tendance (dessaisonalisation). De ce fait, l'emploi de ce deuxième mode de filtrage concorde parfaitement avec la théorie des fonctions aléatoires à laquelle se réfèrent les analyses corrélatoires et spectrales (Mangin, 1984).

## *4.3 Méthodes d'analyse corrélatoire (univariée et croisée) et fonction de transfert temporelle*

### 4.3.1 Fonction de corrélation

L'analyse corrélatoire permet d'étudier l'évolution des événements dans le domaine temporel, de façon univariée ou croisée (bivariée).

La structure temporelle du signal X(t), ou des deux signaux X(t) et Y(t) conjointement, est « capturée » par des fonctions de structure temporelle en deux points (t, t+τ), qui ne dépendent que du délai (τ) dans l'hypothèse de processus statistiquement stationnaires.

L'estimation biaisée :

$$C_{XY}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N-j} \left( X(t_i) - \bar{X} \right) \left( Y(t_{i+j}) - \bar{Y} \right) \qquad \textbf{(4.4)}$$

ou l'estimation non biaisée :

$$C_{XY}(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{i=N-j} \left( X(t_i) - \bar{X} \right) \left( Y(t_{i+j}) - \bar{Y} \right) \qquad \textbf{(4.5)}$$

et

$$R_{XY}(j) = \frac{C_{XY}(j)}{\sigma_X . \sigma_Y} \qquad \textbf{(4.6)}$$

- RXY(j) : intercorrélation 1, fonction du délai discret
- CXY(j) : intercovariance 2, fonction du délai discret
- τj : délai temporel (si $k_0$=1) : τj = jΔt [unité de temps]
  Délai temporel général : τj=j×$k_0$×Δt [unité de temps].
- $k_0$ : pas d'échantillonnage ($k_0$ = 1, ou éventuellement 2 ou 3 ou…M).
- N : nombre total d'observations de la chronique.
- j : le « délai discret » (adimensionnel). Si $k_0$=1 alors « j »=0,1,2,…,M

[1] *Terminologie.* L'*inter-covariance* s'appelle aussi *covariance croisée* ; la fonction de *corrélation* désigne une fonction de *covariance* normalisée (comme le coefficient de corrélation classique).

N.B : Dans le cas présent, nous choisissons le pas d'échantillonnage le plus fin ($k_0$=1) pour balayer toutes les données de la chronique. Sinon, pour des chroniques très longues et/ou à petits pas de temps, on pourra éventuellement procéder à un sous-échantillonnage ($k_0 \geq 2$).

Dans le cas d'une analyse simple univariée, il suffit de poser Y(t)=X(t) ci-dessus pour obtenir la définition des auto-covariances du signal X(t), en fonction du délai « $\tau$ ». Dans le cas de l'analyse croisée, le concept de covariance croisée est utilisé plus généralement pour obtenir la fonction de transfert temporelle X(t)$\rightarrow$Y(t), causale ou non causale décrit ci-dessous.

Dans la pratique nous avons utilisé l'estimation biaisée pour calculer le spectre (équation **4 .4**).

### 4.3.2 Déconvolution temporelle (causale, non causale)

La méthode résumée ici est basée sur un modèle de convolution linéaire input/output **causal** ou **non-causal** (exemple : relation causale pluie-débit) :

$$Q(t) = \int_0^t h(t-s)P(s)ds + \varepsilon(t) = \hat{Q}(t) + \varepsilon(t) \qquad \textbf{(4.7)}$$

Dans cette approche statistique, la fonction de transfert h($\tau$) est solution d'un problème de minimisation de variance d'erreur ε :

$$Var(\varepsilon(t)) = E\left\{\left[Q(t) - \hat{Q}(t)\right]^2\right\} \qquad \textbf{(4.8)}$$

$\Rightarrow$ Noyau "optimal" h(t).

Ce qui mène finalement à une relation de la forme :

0<$\tau$<T (Version causale: *Wiener-Hopf*):

$$R_{PQ}(\tau) = \int_0^T h(s)R_{PP}(\tau - s)ds \qquad \textbf{(4.9)}$$

-T<$\tau$<+T (version non-causale : *R.A et al.*) :

$$R_{PQ}(\tau) = \int_{-T}^{+T} h(s)R_{PP}(\tau - s)ds \qquad \textbf{(4.10)}$$

Ce modèle est applicable à tous processus temporels tels que la relation entre la pression atmosphérique et les niveaux piézométriques. Ce modèle de déconvolution a été programmé en Matlab (communication personnelle R. Ababou) et a été inséré dans notre boite à outil d'analyse Matlab. Pour les détails théoriques sur ce type de déconvolution, voir aussi Labat et al. (2000).

On démontre par le théorème de convolution, que le gain fréquentiel s'écrit :

$$g_{XY}(\omega) = \frac{S_{XY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)} \qquad \textbf{(4.11)}$$

D'après (Ababou et al 2000)

On fait tendre le domaine d'observation vers l'infini pour le Modèle non causal ci-dessous :

On écrit : $T = -\infty, T = +\infty$

$$R_{PQ}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(s) R_{PP}(\tau - s) ds \qquad \textbf{(4.12)}$$

On applique la transformée de Fourier dans les deux cotés de l'équation **(4.12)** on trouve :

$$S_{PQ}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{PQ}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = TdF(h(\tau)) * TdF(R_{PP}(\tau)) \qquad \textbf{(4.13)}$$

$$S_{PQ}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau * \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{PP}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \qquad \textbf{(4.14)}$$

$$S_{PQ}(\omega) = H_{PQ} * S_{PP}(\omega) \qquad \textbf{(4.15)}$$

Donc on trouve :

$$H_{PQ}(\omega) = \frac{S_{PQ}(\omega)}{S_{PP}(\omega)} \qquad \textbf{(4.16)}$$

Dans le cas général pour une entrée X et sortie Y on a :

$$H_{XY}(\omega) = \frac{S_{XY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)} = g_{XY}(\omega) \qquad \textbf{(4.17)}$$

Où $g_{XY}$ représente le gain entre X et Y ou bien d'une autre façon la régression de X par rapport à Y.

## *4.4 Analyse spectrale par transformée de Fourier univariée et croisée, gain fréquentiel.*

L'analyse spectrale traduit la structure du signal à partir d'une décomposition du signal étudié (ou de sa fonction de structure) en fonctions périodiques, c'est-à-dire, en passant en domaine fréquentiel (Transformée de Fourier (TdF) temps-fréquence). Nous détaillerons plus loin les analyses spectrales univariées et croisées, développées d'abord en temps continu, puis en temps discret et de durée d'observation finie.

Dans ce cadre, l'analyse univariée revient à étudier le spectre fréquentiel d'une seule chronique (auto-spectre $S_{XX}$), tandis que l'analyse croisée traite simultanément les deux chroniques et aboutit à une étude croisée en fréquence (spectre croisé $S_{XY}$).

De plus, si l'un des deux signaux X(t) ou Y(t) est considéré comme la « cause » de l'autre signal, on sait définir un gain fréquentiel, qui correspond à la version fréquentielle de la fonction de transfert temporelle entre X(t) et Y(t) qui peut s'interpréter comme une « pente » de régression entre les deux signaux temporels.

### 4.4.1 Analyse spectrale univariée (estimation de spectre avec filtrage)

Le spectre (auto-spectre) d'un signal X(t) peut être défini de diverses manières ; par exemple en temps discret et sur une fenêtre temporelle finie, le spectre réduit de X(ti) est défini plus loin dans le paragraphe **(4.4.1.6).**

#### *4.4.1.1 TdF directe complexe d'un signal réel en temps continu*

Il permet de décomposer le signal (analysé) :

$$\hat{X}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} X(t)dt \;\; ; X(t) \in \Re \qquad \textbf{(4.18)}$$

avec : $e^{-i\omega t} = \cos(\omega t) - i\sin(\omega t)$

$$\hat{X}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} [\cos(\omega t) - i\sin(\omega t)]X(t)dt \qquad \textbf{(4.18a)}$$

On démontre que :

$$\hat{X}(\omega) = X_R(\omega) + iX_{\mathrm{Im}}(\omega) \;\; ; \hat{X}(\omega) \in C$$

avec:

$$\hat{X}_R(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega.t)X(t)dt \qquad \textbf{(4.18b)}$$

$$\hat{X}_{\mathrm{Im}}(\omega) = -\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \sin(\omega.t)X(t)dt \qquad \textbf{(4.18c)}$$

#### *4.4.1.2 TdF-1 inverse d'un signal réel en temps continu*

Il permet de reconstituer le signal (synthèse).

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t}\hat{X}(\omega)d\omega \qquad \textbf{(4.19)}$$

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [\cos(\omega t) + i\sin(\omega t)]\hat{X}(\omega)d\omega \qquad \textbf{(4.19a)}$$

Avec

$$\hat{X}(\omega) = X_R(\omega) + iX_{\mathrm{Im}}(\omega) \qquad \textbf{(4.19b)}$$

Donc on trouve X (t) sous la forme suivante :

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [\cos(\omega t) + i\sin(\omega t)]\hat{X}(\omega)dt$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} [\cos(\omega t) + i\sin(\omega t)][X_R(\omega) + iX_{\mathrm{Im}}(\omega)]d\omega \qquad \textbf{(4.19c)}$$

$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} [X_R(\omega)\cos(\omega t) - X_{\mathrm{Im}}(\omega)\sin(\omega t)]d\omega + i\int_{-\infty}^{+\infty} [X_R(\omega)\sin(\omega t) + X_{\mathrm{Im}}(\omega)\cos(\omega t)]d\omega$ On peut écrire X (t)=A+iB tel que :

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} [X_R(\omega)\cos(\omega t) - X_{\mathrm{Im}}(\omega)\sin(\omega t)]d\omega \qquad \textbf{(4.19d)}$$

$$B = \int_{-\infty}^{+\infty} [X_R(\omega)\sin(\omega t) + X_{\mathrm{Im}}(\omega)\cos(\omega t)]d\omega \qquad \textbf{(4.19e)}$$

X (t) est décomposé en partie réelle et imaginaire, or d'après l'hypothèse de transformée de Fourrier directe dans le paragraphe **(4.4.1.1)**, X (t) est réel ce qui implique deux conditions :

B=0 c'est –à-dire :

$$\begin{cases} X_R(\omega)\sin(\omega t) = 0 \\ X_{\mathrm{Im}}(\omega)\cos(\omega t) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} X_R(\omega) = X_R(-\omega) \\ X_{\mathrm{Im}}(\omega) = -X_{\mathrm{Im}}(-\omega) \end{cases}$$

Synthèse :

Pour un signal réel X (t) sa Transformée de fourrier complexe $\hat{X}(\omega)$ est telle que :

$$\begin{cases} X_R(\omega) = X_R(-\omega) \\ X_{\mathrm{Im}}(\omega) = -X_{\mathrm{Im}}(-\omega) \end{cases} \quad \forall \omega \in [-\infty, +\infty]$$

$\mathrm{Re}\left(\hat{X}(\omega)\right)$ : est paire $\qquad$ $\mathrm{Im}\left(\hat{X}(\omega)\right)$ : est impaire

### *4.4.1.3 TdF de l'autocorrélation «W-K en temps continu »*

Transformée de Fourrier de la fonction d'autocorrélation d'après le théorème de Wiener-Kinchine.

$$S_{XX}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} R_{XX}(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \qquad \textbf{(4.20)}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_{XX}(\omega)d\omega = \begin{cases} \sigma_X^2 \\ 1 \end{cases} \qquad \textbf{(4.21)}$$

$R_{XX}$ est la fonction d'autocorrélation liée à la fonction d'autocovariance par la relation:

$$R_{XX}(\tau) = \frac{C_{XX}(\tau)}{\sigma_x^2} = \frac{C_{XX}(\tau)}{Var(X)} \qquad \textbf{(4.22)}$$

$\sigma_x$ : est l'écart type de X (t)

or l'autocorrélation est une fonction paire de (τ) telle que :

$R_{xx}(-\tau) = R_{xx}(\tau)$

L'autocovariance aussi est paire :

$C_{xx}(-\tau) = C_{xx}(\tau)$

- La densité spectrale $S_{xx}(\omega)$ d'un signale X(t) (Rxx(τ)) réel est toujours réelle : $S_{xx}$ € R
- La densité spectrale est symétrique (paire) : $S_{xx}(-\omega) = S_{xx}(\omega)$
- La partie imaginaire de $S_{xx}(\omega)$ est nulle.

$$\mathrm{Im}(S_{xx}(\omega)) = -\frac{i}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau)\sin(\omega t)d\tau = 0 \qquad \textbf{(4.23)}$$

N.B Estimation directe de $S_{xx}(\omega)$ :

$$\hat{S}_{xx}(\omega) = \left|\hat{X}(\omega)\right|^2 = X_R^2(\omega) + X_{IM}^2(\omega) \qquad \textbf{(4.24)}$$

#### *4.4.1.4 TdF de l'autocorrélation «W-K en temps discret »*

Nous passons du cas continu au cas discret (Temps continu➔Temps discret)

Par définition :

$$\begin{cases} S_{XX}^{(2)}(\omega) = \dfrac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \exp^{(-i\omega\tau)} C_{XX}(\tau) d\tau \\ C_{XX}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp^{(+i\omega\tau)} S_{XX}^{(2)}(\omega) d\omega \end{cases} \qquad \textbf{(4.25)}$$

(Temps continu et durée infini: $t_{\max} = \infty$ )

Avec $C_{XX}$ : fonction d'autocovariance

$S_{XX}^{(2)}$ : La densité spectrale continue bilatérale (*2-sided*).

$$\begin{cases} S_{XX}^{(2)}(\omega_k) = \sum_{j=-N}^{j=+N} \exp^{(-i(k\Delta\omega j\Delta t))} C_{XX}(\tau_j)\Delta t \\ C_{XX}(\tau_j) = \dfrac{1}{N}\sum_{k=-N}^{k=+N} \exp^{(+i(k\Delta\omega j\Delta t))} S_{XX}^{(2)}(\omega_k)\Delta\omega \end{cases} \qquad \textbf{(4.26)}$$

(Temps discret et durée fini : $t_{\max} = N\Delta t$ )

On note :

$\omega_k = k\Delta\omega$
$\tau_j = j\Delta t$ et par commodité on écrit : $C_{XX}(\tau_j) = C_{XX}(j)$

On définit le spectre discret bilatéral (*2-sided*) dimensionnel par l'équation suivante :

$$S_{XX}^{(2)}(\omega_k) = \sum_{j=-N}^{j=+N} \exp^{\left(-i\left(\omega_k\tau_j\right)\right)} C_{XX}(j)\times\Delta t \qquad \textbf{(4.27)}$$

$$\exp^{\left(-i\left(\omega_k\tau_j\right)\right)} = \cos\left(\omega_k\tau_j\right) - i\sin\left(\omega_k\tau_j\right) \qquad \textbf{(4.28)}$$

En remplaçant **(4.28)** dans l'équation **(4.27)** on trouve :

$$S_{XX}^{(2)}(\omega_k) = \sum_{j=-N}^{j=+N}\left[\cos\left(\omega_k\tau_j\right) - i\sin\left(\omega_k\tau_j\right)\right] C_{XX}(j)\times\Delta t = \sum_{j=-N}^{j=+N}\left[\cos\left(\omega_k\tau_j\right)\right] C_{XX}(j)\times\Delta t \qquad \textbf{(4.29)}$$

Nous avons La fonction sin(x) antisymétrique et cos(x) symétrique donc :

$$S_{XX}^{(2)}(\omega_k) = \left[\left(\sum_{j=-N}^{j=-1}\left[\cos\left(\omega_k\tau_j\right)\right] + \sum_{j=1}^{j=N}\left[\cos\left(\omega_k\tau_j\right)\right]\right) C_{XX}(j) + C_{XX}(0)\right]\times\Delta t \qquad \textbf{(4.29a)}$$

$$S_{XX}^{(2)}(\omega_k) = \left[\left(2\sum_{j=1}^{j=N}\left[\cos\left(\omega_k\tau_j\right)\right]\right) C_{XX}(j) + C_{XX}(0)\right]\times\Delta t \qquad \textbf{(4.29b)}$$

Or la relation entre l'autocovariance et l'autocorrélation est donnée par :

$$R_{XX}(\tau_j) = \frac{C_{XX}(\tau_j)}{\sigma_x^2} = \frac{C_{XX}(\tau_j)}{Var(X)} \qquad \textbf{(4.29c)}$$

On obtient :

$$S_{XX}^{(2)}(\omega_k) = \left[\left(2\sum_{j=1}^{j=N}\left[R_{XX}(\tau_j)\cos\left(\omega_k\tau_j\right)\right]\right) + R_{XX}(0)\right] \times \Delta t \times \sigma_X^2 \qquad \textbf{(4.29d)}$$

Le spectre discret bilatéral (*2-sided*) dimensionnel s'écrit :

$$S_{XX}^{(2)}(\omega_k) = \sigma_X^2 \Delta t\left(1 + 2\sum_{j=1}^{j=N}\left[R_{XX}(j)\cos\left(\omega_k\tau_j\right)\right]\right) \qquad \textbf{(4.29e)}$$

$S_{XX}^{(2)}(\omega_k)$ : Spectre bilatéral (*2-sided*) dimensionnel

Avec :

$\omega_k = 2\pi f_k$

$\tau_j = j\Delta t$

Le spectre discret bilatéral (*2-sided*) réduit par rapport à la variance de X en fonction de la fréquence adimensionnelle $\hat{f}$ s'écrit sous la forme suivante :

$$\tilde{s}_{XX}^{(2)}(\hat{f}_k) = \left(1 + 2\sum_{j=1}^{j=N}\left[R_{XX}(j)\cos\left(2\pi\hat{f}_k j\right)\right]\right) \qquad \textbf{(4.29f)}$$

Avec :

$\hat{f}_k = f_k \times \Delta t$

Par convention la relation entre le spectre unilatéral (*1-sided*) $S_{XX}^{(1)}(\omega)$ et le spectre bilatéral (*2-sided*) $S_{XX}{}^{(2)}(\omega)$ s'écrit :

$$\sigma_x^2 = \int_0^{+\infty} S_{XX}{}^{(1)}(\omega)d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{XX}{}^{(2)}(\omega)d\omega \qquad \textbf{(4.30)}$$

$$S_{XX}{}^{(1)}(\omega) = 2 \times S_{XX}{}^{(2)}(\omega) \qquad \textbf{(4.31)}$$

Le spectre discret unilatéral (*1-sided*) réduit s'écrit :

$$\tilde{s}_{XX}^{(1)}(\hat{f}_k) = 2\tilde{s}_{XX}^{(2)}(\hat{f}_k) = 2\left(1 + 2\sum_{j=1}^{j=N}\left[R_{XX}(j)\cos\left(2\pi\hat{f}_k j\right)\right]\right) \qquad \textbf{(4.32)}$$

Le spectre discret unilatéral (*1-sided*) dimensionnel s'écrit :

$$S_{XX}^{(1)}(\omega_k) = 2S_{XX}^{(2)}(\omega_k) = \sigma_X^2 \Delta t \times 2\left(1 + 2\sum_{j=1}^{j=N}\left[R_{XX}(j)\cos\left(\omega_k\tau_j\right)\right]\right) \qquad \textbf{(4.33)}$$

#### *4.4.1.5 TdF de l'autocorrélation dans le cas d'une durée finie (fréquence discrète)*

Le spectre $S_{XX}^{(2)}(\omega)$ bilatéral (*2-sided*) doit vérifier :

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{XX}{}^{(2)}(\omega) d\omega$$

En discrétisant $(\omega \to \omega_i)$ on trouve :

$$\sigma_X^2 = \left( 2\sum_{i=1}^{i=N} \left[ S_{XX}^{(2)}(\omega_i) \right] + 1 \times S_{XX}^2(0) \right) \times \Delta\omega \qquad \textbf{(4.34)}$$

Avec $\Delta\omega = 2\pi\Delta f = \dfrac{\pi}{N\Delta t}$ et $\Delta f = f_{\min} = \dfrac{1}{T_{\max}}$

Pour le spectre unilatéral (*1-sided*), $S_{XX}^{(1)}(\omega)$ :

$$\sigma_X^2 = \left( \sum_{i=1}^{i=N} \left[ S_{XX}^{(1)}(\omega_i) \right] + \frac{1}{2} \times S_{XX}^1(0) \right) \times \Delta\omega \qquad \textbf{(4.35)}$$

La densité spectrale discrète réduite unilatérale (*1-sided*) s'écrit :

$$s_{XX}^{(1)}(\omega_i) = \frac{S_{XX}^{(1)}(\omega_i)}{\sigma_X^2} \times \Delta\omega = \frac{S_{XX}^{(1)}(\omega_i)}{\sigma_X^2} \times \frac{\pi}{N\Delta t} \qquad \textbf{(4.36)}$$

$$s_{XX}{}^{(1)}(\omega) = 2 \times s_{XX}{}^{(2)}(\omega)$$

$$1 = 2 \times \left( 2\sum_{i=1}^{i=N} \left[ s_{XX}^{(2)}(\omega_i) \right] + s_{XX}^2(0) \right) \qquad \textbf{(4.37)}$$

Remarque**.**

La transformée de Fourier que nous utilisons est discrète à la fois en temps et en fréquence, ce qui s'explique comme suit :

- Le temps est discret (ti = i*$\Delta$t) car les observations sont discrètes la conséquence du $\Delta$t est l'existence d'une fréquence maximum fMAX (fréquence de Nyquist, théorème de Shannon).
- La fréquence est discrète car la taille de la fenêtre temporelle d'observation est finie, il existe donc une plus basse fréquence fmin qui fournit l'incrément discret de fréquences : $\Delta$f = fmin.

#### *4.4.1.6 Filtres temporels pour l'estimation du spectre (filtre de Tukey)*

Nous n'utiliserons pas le spectre bilatéral (*2-sided*) dans notre étude. Nous avons choisi de travailler avec le spectre unilatéral (*1-sided*) réduit temporairement (EQ 19) qui est défini dans l'intervalle des fréquences de Shannon en appliquant le théorème de Shannon et en introduisant le filtre de Tukey.

En effet, pour obtenir la fonction d'autocorrection, on discrétise la chronique au pas j en respectant le théorème d'échantillonnage de Shannon.

La troncature M (valeur maximale à prendre) doit répondre à l'inégalité suivante :

( $M \leq N/3$ ), où N désigne le nombre total d'observation.

Si j est le nombre de pas discrets en terme de délai (lag), l'information est utilisable entre 2j et M. Cet intervalle s'appelle la fenêtre d'observation. La TdF est de $-\infty$ à $+\infty$ et dans notre problème la fonction d'autocorrélation est limitée entre 0 et M (troncature), d'où la nécessité d'un filtrage d'autant que l'autocorrélation est discrète et que la TdF ne l'est pas ; il est donc nécessaire de lisser cette fonction.

Plusieurs filtres temporels ont été considérés dans la littérature, la Figure 21 en montre quelques uns. Le filtre rectangulaire (non montré dans la Figure 21) pourrait permettre de résoudre le problème évoqué ci-dessus (problème de bruit du spectre estimé).

Cependant, il est conseillé d'utiliser des filtres temporels moins abrupts que la fenêtre rectangulaire (effets de coïncidence...). Le filtre de Parzen (2) élimine trop d'information, tandis que le filtre de Tukey (2) semble conserver le maximum d'information tout en conservant sa fonction de lissage du spectre estimé (de façon optimale..), [Voir Blackman and Tukey (1958), Papoulis and Pillai (2002), Priestley (1981) et Yevjevich (1972)]. On montre que la variance de l'erreur de l'estimation sur $Rxx(\tau)$ augmente avec l'augmentation du délai ($\tau$) (Fatmi et al., 2008 et les références citées). Pour toutes ces raisons c'est le filtre de Tukey que nous choisissons d'utiliser dans la suite de ce travail.

Noter que ce type de filtre est nécessaire pour obtenir une bonne estimation spectrale à partir d'un signal de durée finie en temps discret.

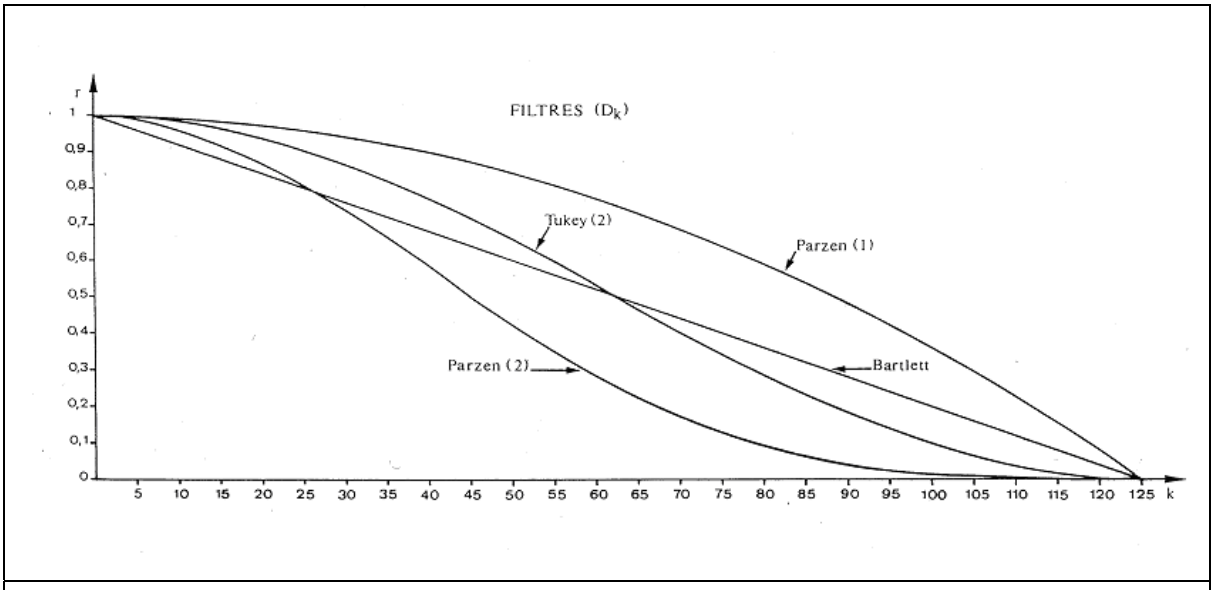



Figure 21: Formes de filtre D(j) dans l'espace temporel des délais discrets (j)( A. Mangin, comunication personnelle).

Soit D(j) la fonction de filtre temporel de Tukey par la transformée de Fourier due à la taille finie du domaine [0,M].

*Filtre (Dj) :*

La transformée de Fourier s'applique :

- A une fonction continue ;
- Et de support infini.

D'où nécessité :

- D'un lissage en raison de la discrétisation ;

- De rendre nulles les valeurs au delà de la troncature M.

Deux possibilités :

- Pré-filtrage de $R_{xx}$ (j) correspond à D (j) ;
- Post-filtrage du spectre obtenu.

Dans notre cas nous utilisons le pré-filtrage D (j) à partir de différents filtres, les solutions retenues sont :

- Bartlett : $D_j = 1 - \frac{j}{m}$ **(4.38)**

- Parzen (1) : $D_j = 1 - \frac{j^2}{M^2}$ **(4.39)**

- Parzen (2) : $D_j = 1 - \frac{6j^2}{M^2\left(1 - \frac{j}{M}\right)}$ pour $0 \le j \le \frac{M}{2}$ **(4.39a)**

- Parzen (3) : $D_j = 2\left(1 - \frac{j}{M}\right)^3$ pour $M/2 \le j \le M$ **(4.39b)**

- Tukey (1) : $D_j = 1 - 0{,}46 + 0{,}46\cos\left(\frac{\pi j}{M}\right)$ **(4.40)**

- Tukey (2) : $D_j = \frac{\left(1 + \cos(\pi j / M)\right)}{2}$ ou **(4.40a)**

- Tukey (2) : $D_j = \frac{\left(1 + \cos(2\pi j \Delta t / 2M\Delta t)\right)}{2}$ **(4.40b)**

<u>Remarque :</u>

Noter que Le filtre de Tukey s'applique à la fonction d'autocorrélation et non pas aux données elles mêmes contrairement à la moyenne mobile par exemple.

<u>Estimation spectrale avec le filtre de Tukey :</u>

Finalement le spectre s'écrit :

$$s(\hat{f}_i) = 2\left[1 + 2\sum_{j=1}^{M} D_j . R_{XX}(j).\cos(2\pi \hat{f}_i . j)\right] \quad \textbf{(4.41)}$$

Avec $\hat{f}_i = \frac{i}{2 \times M \times k_0}$

i=0,1,2,.....M ;

$$C_{XX}(j) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N-j}\left(X(t_i) - \bar{X}\right)\left(X(t_{i+j}) - \bar{X}\right) \quad \textbf{(4.42)}$$

$$R_{XX}(j) = C_{XX}(j) / \sigma_X^2 \qquad \textbf{(4.42a)}$$

L'équation **(4.41)** représente le spectre réduit adimensionnel - normalisé par la variance du signal X(t) - en fonction de la fréquence adimensionnelle ($\hat{f}_i$) définie plus loin. Commençons par définir la fréquence dimensionnelle :

$f_i$ : la fréquence « hertzienne » (1 Hz=1 $s^{-1}$): $\quad f_i = \frac{1}{T_i}[Hz]$

La Figure 22 illustre quelques notions d'échantillonnage des signaux. En utilisant les définitions de cette figure, nous avons par le théorème d'échantillonnage de Shannon :

$$f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}}\,[\mathrm{Hz}] \Rightarrow \; f_{\max} = \frac{1}{2\Delta t}\,[\mathrm{Hz}] \text{ et } f_{\min} = \frac{1}{T_{\max}} = \frac{1}{2t_{\max}}\,[\mathrm{Hz}]$$

Or : $\quad t_{\max} = M\Delta t \;\Rightarrow\; f_{\min} = \frac{1}{2M\Delta t}\,[\mathrm{Hz}] \quad (T_{\max} \geq 2T_{\min})$

On peut alors en déduire une fréquence adimensionnelle $\hat{f}_i$, définie par :

$$\hat{f}_i = f_i \times \Delta t \;\Rightarrow\; \hat{f}_i = \frac{i}{2 \times M \times k_0} \qquad \textbf{(4.43)}$$

NB : Nous prenons ici $k_o$=1 (plus généralement, $k_o \geq 1$ représente le pas d'échantillonnage temporel utilisé dans la transformée de Fourier).[1]

*Note interne.* On peut remplacer le délai de coupure M par la durée totale de la chronique N, ce qui correspondrait à l'application du théorème de Shannon en l'absence de filtrage. Notre approche ici (avec M au lieu de N) revient à diminuer le nombre de fréquence discrète et a augmenté l'incrément de fréquence Δf.
Exemple : Δt=1000s ; N=500 ; M=50.

- Avec N on obtient Δf=1/(1000000s) = $10^{-6}$ Hz.
- Avec M on obtient Δf=1/(100000s) = $10^{-5}$ Hz.

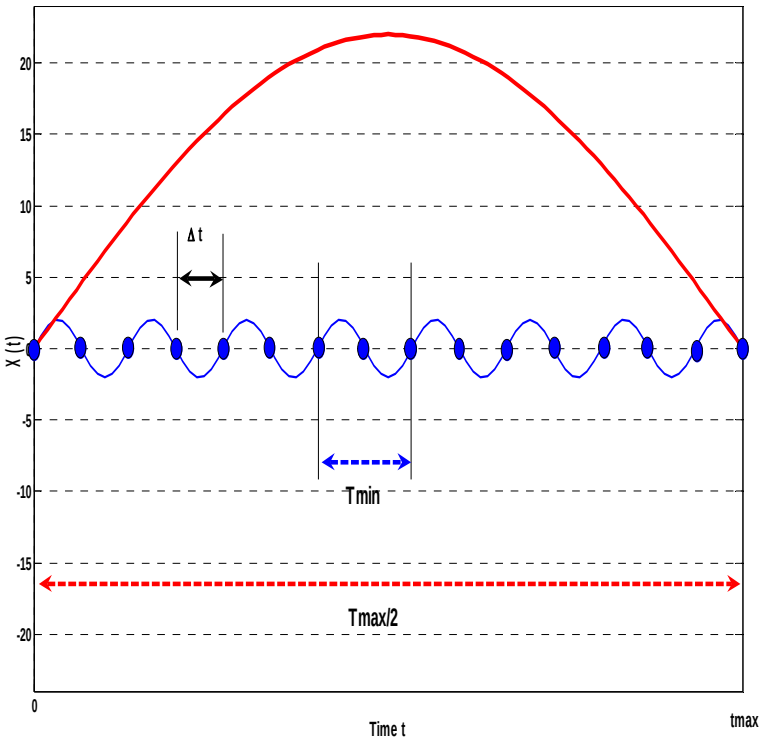



Figure 22 : Ce schéma illustre certains aspects de l'échantillonnage d'un signal en temps discret sur une fenêtre d'observation temporelle de taille finie.

$T_{\min}$ : période minimale susceptible d'être échantillonnée

$T_{\max}$ : période maximale susceptible d'être échantillonnée

$\Delta t$ : pas de temps (secondes)

$N$ : nombre d'observations discrètes

$t_{\max}$ : délai maximal possible (secondes) : $t_{\max} = M\Delta t$

$t_{\max} = M\Delta t$ : le délai de coupure que l'on peut choisir par commodité avec une coupure $M \leq N$, par exemple $M \approx N/3$.

La fréquence réduite $\hat{f}_i$ appartient à l'intervalle : $0 \leq \hat{f}_i \leq 0.5$ (adimensionnel)

Pour $k_0$=1, on a : $\hat{f}_0 = 0$ , et $\hat{f}_N = 0.5$

Enfin, le terme Dj représente un filtre (Temporel), le choix effectué ici étant le filtre de Tukey (2) :

$$D_j = \frac{\left(1 + \cos\left(\frac{\pi j}{M}\right)\right)}{2} \qquad \textbf{(4.44)}$$

Où j est un nombre de pas temporels défini comme suit :

j=1,2,…, M ≤ N/3 (ou, au plus, M=N) ;

M : taille de la fenêtre de coupure (*cut-off*, troncature en nombre de Δt) ;

N : nombre total de données de la séquence ;

Δt : pas de temps de mesure.

La fonction de pondération D(j) est un filtre de $R_{XX}(j)$. Utilisé par le théorème de W-K pour l'estimation du spectre d'un signal. En effet, pour différentes raisons d'application de la transformée de Fourier, il est nécessaire de procéder à un lissage. On utilise les filtres de Tukey, qui permettent de mieux filtrer les longues périodes (basses fréquences). L'expérience montre que l'utilisation du filtre de Tukey est celle qui biaise le moins la valeur de la variance, il surestime la variance totale de 8% (Mangin, 1984). La bande passante du filtre doit être supérieure à celle du signal pour que l'échantillonnage n'interfère pas dans la reconstitution du signal et laisse passer toute l'information qu'il contient.

## 4.4.2 Analyse spectrale croisée

### *4.4.2.1 TdF de la fonction de corrélation croisée «W-K en temps continu»*

La densité spectrale croisée de X(t) et Y(t) est décomposée dans le domaine fréquentiel par la transformée de Fourier en un nombre complexe de la fonction d'intercorrélation croisée :

$$S_{XY}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} R_{XY}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \qquad \textbf{(4.45)}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_{XY}(\omega) d\omega = \begin{cases} C_{XY}(0) \\ R_{XY}(0) \end{cases} \qquad \textbf{(4.46)}$$

Remarque 1.

La fonction d'intercorrélation Rxy est asymétrique.

$R_{XY}(-\tau) \neq R_{XY}(\tau)$ ou $R_{XY}(-\tau) = R_{YX}(\tau)$

On déduit automatiquement que la densité spectrale croisée est complexe

$S_{XY}(\omega)$ € C

Alors

$$S_{XY}(\omega) = S_R(\omega) - iS_{\mathrm{Im}}(\omega) \quad \text{Ou} \quad S_{XY}(\omega) = \left|S_{XY}(\omega)\right| e^{\left(-i\theta_{xy}(\omega)\right)} \qquad \textbf{(4.47)}$$

$S_R(\omega)$ : cospectre

$S_{Im}$ : spectre de quadrature

Spectre de densité d'amplitude :

$$\left|S_{XY}(\omega)\right| = \sqrt{S_R^2(\omega) + \quad S_{\mathrm{Im}}^2(\omega)} \qquad \textbf{(4.48)}$$

Spectre de densité de phase :

$$\theta_{XY}(\omega) = \arctan g\left(\frac{S_{\mathrm{Im}}(\omega)}{S_R(\omega)}\right) \qquad \textbf{(4.49)}$$

*4.4.2.2 TdF de la fonction de corrélation croisée «W-K en temps discret»*

La fonction d'intercovariance en temps discret s'écrit sous la forme :

$$C_{XY}(j)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N-j}\left(X(t_i)-\bar{X}\right)\left(Y(t_{i+j})-\bar{Y}\right)\ ;\ j\succ 0 \qquad \textbf{(4.50)}$$

avec

$$R_{XY}(j)=\frac{C_{XY}(j)}{\sigma_X.\sigma_Y}$$

$$C_{YX}(j)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N-j}\left(Y(t_i)-\bar{Y}\right)\left(X(t_{i+j})-\bar{X}\right)\ ;\ j\prec 0 \qquad \textbf{(4.51)}$$

avec

$$R_{YX}(j)=\frac{C_{YX}(j)}{\sigma_X.\sigma_Y}$$

et

$$s_X^2=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N-j}\left(X(t_i)-\bar{X}\right)^2 \qquad \textbf{(4.52)}$$

et

$$s_Y^2=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N-j}\left(Y(t_i)-\bar{Y}\right)^2 \qquad \textbf{(4.53)}$$

La fonction d'intercorrélation n'étant pas symétrique pour des valeurs de –j et de +j, le spectre est exprimé par un nombre complexe. D'où les deux expressions représentées par la partie imaginaire et la partie réelle :

- spectre croisé

$$S_{XY}(\omega)=S_R(\omega)-iS_{\mathrm{Im}}(\omega)$$

$$S_R(\omega)=2\left\{R_{XY}(0)+\sum_{j=1}^{j=M}\left(R_{XY}(j)+R_{YX}(j)\right)D_{(j)}\cos(2\pi\hat{f}_i j)\right\} \qquad \textbf{(4.54)}$$

$$S_{\mathrm{Im}}(\omega)=2\sum_{j=1}^{j=M}\left(R_{XY}(j)-R_{YX}(j)\right)D_{(j)}\sin(2\pi\hat{f}_i j) \qquad \textbf{(4.55)}$$

- spectre croisé

$$S_{XY}(\omega)=\left|S_{XY}(\omega)\right|e^{\left(-i\theta_{xy}(\omega)\right)} \qquad \textbf{(4.56)}$$

- spectre croisé

$$S_{XY}(\omega)=\left|S_{XY}(\omega)\right|e^{\left(i\theta_{xy}(\omega)\right)} \text{ (R.Ababou)} \qquad \textbf{(4.57)}$$

avec $|S_{XY}(\omega)|$ la fonction d'amplitude

- Combinaison de l'analyse simple et croisée

La fonction de cohérence s'écrit :

$$Coh_{XY}(\omega) = \frac{|S_{XY}(\omega)|}{\sqrt{S_{XX}(\omega).S_{YY}(\omega)}} \qquad \textbf{(4.58)}$$

La fonction de phase (phase spectrum rad/s) s'écrit :

$$\theta_{xy}(\omega) = \arctan\left(-\frac{Q(\omega)}{Co(\omega)}\right) \text{ (R.Ababou)} \qquad \textbf{(4.59)}$$

On définit le spectre de cohérence (Réel) comme suit :

$$Coh_{XY}(\omega) = \frac{|S_{XY}(\omega)|}{\sqrt{S_{XX}(\omega).S_{YY}(\omega)}} \qquad \textbf{(4.60)}$$

Finalement :

$$Coh_{XY}(\omega) = \frac{|S_{XY}(\omega)|}{\sqrt{S_{XX}(\omega).S_{YY}(\omega)}} = Coh(\omega)\exp(i\theta_{xy}(\omega)) \qquad \textbf{(4.61)}$$

La fonction de gain réduit (ADIM) s'écrit :

$$g_{XY}(\omega) = \frac{|s_{XY}(\omega)|}{s_{XX}(\omega)} \qquad \textbf{(4.62)}$$

- Nous allons appliquer ce gain pour le calcul de l'efficience barométrique ;
- Nous reverrons la notion de gain à partir d'un modèle de convolution entre X (t) et Y (t) au paragraphe suivant.

N.B. la relation entre le gain brut (dim [Y/X]) et le gain réduit (ADIM) est s'écrit :

$$G_{XY}(\omega) = \frac{|S_{XY}(\omega)|}{S_{XX}(\omega)} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_X}.g(\omega)$$
$$\frac{|s_{XY}(\omega)|}{s_{XX}(\omega)} = g(\omega) \qquad \textbf{(4.63)}$$

<u>Terminologie :</u>

$S_R(\omega) = Co(\omega)$ : co-spectre ;

$S_{\mathrm{Im}}(\omega) = Q(\omega)$ : Spectre de quadrature (quadrature spectrum);

Dans la pratique nous utiliserons plus loin le gain normalisé (ou réduit) g(ω), équivalent à l'efficience barométrique BE(rapport entre les fluctuations de la pression relative et pression atmosphérique) qui varie entre 0 et 1 d'où la normalisation du gain a travers la normalisation des spectres croise $s_{xy}$ et simple $s_{xx}$.

## *4.5 Méthode d'analyse en ondelettes multirésolution*

L'objectif principal de la transformée en ondelettes est de permettre une relation de type temps-échelle de phénomènes localisés temporellement ou transitoires dont l'influence s'étend sur une gamme d'échelles plus ou moins étendue. Cette décomposition permet une décomposition plus satisfaisante que la transformée temps-fréquence donnée par les transformées de Fourier de type fenêtre glissante ou de type Gabor.

L'analyse en ondelette multirésolution utilise une base orthogonale ($\psi_{j,k}(t)$) où « j » représente la dilatation ou contraction et « k » la translation temporelle, avec une discrétisation dyadique du signal X(t).

La base étant orthogonale, les composantes des différents « échelles » sont indépendantes les unes des autres. De plus, chaque composante d'échelle peut être tracée en fonction du paramètre « temps » ou « position temporelle ».

Ceci est à comparer à l'analyse de Fourier classique, où chaque coefficient de Fourier « c(f) » représente globalement le contenu en fréquence « f » de l'ensemble du signal sans possibilité d'examiner la localisation temporelle du contenu fréquentiel.

Par contre, l'approche en « ondelette orthogonale » permet de mettre clairement en évidence les non stationnarités. Elle permet aussi de suivre les liens entres les différents niveaux d'échelles en fonction du temps, et d'isoler chaque composante indépendante pour en étudier l'évolution propre. En ce sens, ces analyses peuvent conduire à une meilleure identification des processus responsables des variations observées.

Nous choisissons ici l'analyse en ondelettes orthogonales discrètes multirésolution (bases de Daubechies). Les logiciels employés pour ces analyses sont ceux proposés et mis en ligne par l'Université de Stanford (Wavelab802) en utilisant le logiciel Matlab (qui contient lui-même par ailleurs sa propre boite à outils et ses propres fonctions d'analyses ondelettes dont certaines sont utilisées par Wavelab (http://www-stat.stanford.edu/~wavelab/).

### 4.5.1 Décomposition d'un signal

Le signal X(t) en temps continu est représenté en fonction des coefficients ($C^X_{j,k}$) sous la forme :

$$X(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} C^X_{j,k}(t)\psi_{j,k}(t)dt \qquad \textbf{(4.64)}$$

Dans cette équation, les coefficients de la transformée en ondelette discrète orthogonale $C^X_{j,k}$ sont donnés par le produit de convolution :

$$C^X_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)\psi_{j,k}(t)dt \qquad \textbf{(4.65)}$$

Avec : $\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2}\psi\left(2^j.t - k\right)$ (j>0 : compression, j<0 : dilatation) **(4.66)**

Ou : $\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{2^{-j/2}}\psi\left(\frac{t - 2^{-j}.k}{2^{-j}}\right)$ **(4.67)**

Dans une telle base orthonormale, les ondelettes de base ψj,k(t) sont ortho-normales à leurs images obtenues par translations et dilatations. On a donc :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{m,n}(t)\psi_{m',n'}(t)dt = \delta_{m,m'}\delta_{n,n'} \qquad \textbf{(4.68)}$$

Ou δ est le symbole de Kronecker défini par : δi, j=1 si i=j et δi,j=0 si i≠j.

Il est possible de construire une base complète orthogonale telle que le signal en temps discret d'énergie finie X(i) puisse être décomposé en une combinaison linéaire de translations et de dilatations des fonctions de base avec des coefficients adéquats :

$$X(i) = \sum_{j=0}^{j=+\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} C_{j,k}^{X}(i)\psi_{j,k}(i) \qquad \textbf{(4.69)}$$

Tel que i peut être remplacé par ti=iΔt.

La relation **(4.69)** correspond à la discrétisation de l'équation en temps continu correspondant à la synthèse d'un signal à partir de ces coefficients en ondelettes. Ceci peut aussi être interprété comme une succession d'approximations du signal discret X(i) (au sens des moindres carrés) par une suite {Xn(i)} n=1,…..N définie par l'équation (4.58):

$$X_n(i) = \sum_{j=0}^{j=n-1} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} C_{j,k}^{X}(i)\psi_{j,k}(i) \qquad \textbf{(4.70)}$$

Les équations qui précèdent constituent la base conceptuelle de l'analyse multirésolution. Pour plus de détails sur la théorie, voir Mallat (1989).

### 4.5.2 Approximation et détail d'un signal

On a vu que l'analyse en ondelette, multirésolution permet la décomposition d'un signal dyadique en une succession d'approximations correspondant à des échelles croissantes «j». La différence entre le signal mesuré et son approximation à l'ordre n est appelée «résidu». La différence entre les approximations d'ordre (n+1) et (n) est appelée « détail » d'ordre (n). Intuitivement, l'approximation correspond donc aux phénomènes à grande échelle de temps, tandis que le détail rend compte plus spécifiquement des phénomènes à une échelle plus petite d'un ordre d'approximation. Ou bien d'une autre façon, l'approximation correspond à une image lissée du signal, tandis que le détail met en évidence les irrégularités du signal à une certaine échelle.

L'approximation $A_m$ d'un signal discret X(i) à la résolution « m », et le détail $D_m$ du même signal discret X(i) à la résolution « m », sont donnés par :

$$A_X^m(i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \langle X, \varphi_{m,k} \rangle . \varphi_{m,k}(i) \qquad \textbf{(4.71)}$$

$$D_X^m(i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \langle X, \psi_{m,k} \rangle . \psi_{m,k}(i) \qquad \textbf{(4.72)}$$

Mais a la base l'approximation $A_m$(ti) correspond à une somme de composantes ondelettes successives $X_m$(ti) des échelles longues k=M jusqu'à l'échelle de coupure m ; et le détail $D_m$(ti) est juste la composante suivante, d'échelle plus courte $X_{m+1}$(ti).

Attention :

- Plusieurs conventions différentes sont utilisées dans la littérature ; les échelles dyadiques (dyadic scales) peuvent être croissantes ou bien décroissantes avec l'indice « m » (ici elles décroissent : « m » grandes ⇔ échelles courtes).
- Certains auteurs choisissent de tracer 1/scale ou bien –log(scale) sur l'axe des échelles (en ordonnée) : avec ce choix, les échelles les plus courtes (et les résidus) sont donc placés en haut du graphe, les échelles les plus longues et (les approximations), en bas du graphe.

**Remarque :**

Une composante ondelette d'échelle dyadique « j » est souvent notée $C_x^j(i)$

(à ne pas confondre avec les coefficients d'ondelettes, parfois notés pareil)

$$C_x^j(t_i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left\langle x, \psi_{m,k} \right\rangle \cdot \psi_{m,k}(i) \qquad \textbf{(4.73}$$

$$X(i) = A_X^m(i) + \sum_{j=m+1}^{j=M} D_X^j(i) = A_X^m(i) + R_X^m(i) \qquad \textbf{(4.74)}$$

**avec** $Ndyadic = 2^M \leq Ntotal$

Où $R_X^m$ représente le résidu à l'échelle d'approximation m (filtre passe-haut/high pass)

Et $A_X^m$ représente l'approximation (filtre passe-bas/low pass)

On peut donc résumer tout ce qui précède dans le tableau équationnel suivant :

| | |
|---|---|
| $X(i) = \sum_{j=0}^{j=+\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} C_{j,k}^X(i)\psi_{j,k}(i) \Rightarrow \begin{cases} A_X^m(i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left\langle X, \varphi_{m,k} \right\rangle . \varphi_{m,k}(i) \\ D_X^m(i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left\langle X, \psi_{m,k} \right\rangle . \psi_{m,k}(i \end{cases}$ | $\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j \times t - k)$ |

Dans l'équation (**4.71**), φ est appelée fonction d'échelle, et dans l'équation (**4.72**), ψ est nommée fonction d'ondelette (ondelette mère).

### 4.5.3 Utilisation de l'analyse en ondelette multirésolution

On peut grâce à cette analyse étudier le détail de n'importe quelle échelle dyadique « m » donnée. Cela permet de comparer les signaux correspondants aux différentes composantes d'échelle de temps $2^m \times \Delta t$ (et leurs statistiques, par exemple l'amplitude quadratique moyenne). Cela permet aussi d'étudier par analyse statistique croisée, composante par composante à une échelle choisie, la corrélation entre Patm et Pinterstitielle (entre autres).

Dans ce rapport nous avons utilisé la multirésolution de type Daubechies 20, parce qu'elle est dissymétrique et s'adapte mieux à nos réponses qui précisément sont non symétriques, sinon on pourra utiliser d'autres analyses multirésolution de type D1 D2….

## *4.6 Analyse en ondelette continue de Morlet (scalogramme)*

Dans cette section nous développons la décomposition en ondelette continue de type Morlet. Cette décomposition, contrairement à la multirésolution n'est pas orthogonale mais elle présente l'avantage de permettre l'analyse à n'importe quelle échelle de temps choisie (par exemple 12 h) et non pas seulement des échelles discrètes dyadiques (par exemple 8 h, 16 h, 32 h,…..) comme en multirésolution.

Nous appliquerons la méthode d'analyse avec ondelette de Morlet dans le paragraphe (5.3.2) pour les chroniques de Pression.

La première étape consiste à changer la base de projection. En temps continu mais sur un intervalle fini [0, T], la base de la transformée de Fourier orthogonale est composée des fonctions complexes à un paramètre :

$e^{-i2\pi\nu_n t}$ Avec $\nu_n$ : la fréquence discret

Cette base est remplacée par une base à deux paramètres de la forme :

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right), (a,\tau) \in (\Re^*, \Re) \qquad \textbf{(4.75)}$$

et permet une discrimination temps-échelle des phénomènes.

Par conséquent, les coefficients de la transformée en ondelettes d'un signal à temps continu de carré intégrable noté x(t) sont donnés par l'opérateur linéaire intégral(4.62) suivant correspondant au classique produit scalaire dans L2(R) :

$$C_x(a,\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi^*_{a,\tau}(t)dt \qquad \textbf{(4.76)}$$

Ou * correspond au complexe conjugué. La fonction ψ(t) qui joue le rôle d'un noyau de convolution est appelée ondelette. Le paramètre « a » peut être interprété comme un facteur de dilatation (a<1) ou de contraction (a>1) de l'ondelette correspondant à diverses échelles d'observation. Le paramètre « τ » s'interprète comme un facteur de translation temporelle ou de décalage fréquentiel de la fonction ψ(t), permettant ainsi l'étude du signal x(t) auteur du temps « τ ». Une interprétation fréquentielle de l'équation ci-dessus est aussi possible. En effet, en utilisant la propriété fondamentale du théorème de Parseval (le produit de convolution temporel de deux fonctions est égal au produit de leur transformée de Fourier), les coefficients d'ondelettes du signal continu x(t) sont aussi donnés par la relation :

$$C_x(a,\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\hat{x}(\omega)\sqrt{a}\hat{\psi}(a\omega)e^{i\omega\tau}d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\hat{x}(\omega)\psi_{a,\tau}(\omega)d\omega \qquad \textbf{(4.77)}$$

Cette formulation indique que les coefficients en ondelettes peuvent aussi s'interpréter par le filtrage de x (transformée de Fourier de x(t) ) par un blanc de filtres notée $\psi_{a,\tau}(\omega)$ reliés à la transformée de Fourier de la fonction ondelette ψ(t) via la relation :

$$\psi_{a,\tau}(\omega) = \sqrt{a}\hat{\psi}(a\omega)e^{i\omega\tau} \qquad \textbf{(4.78)}$$

Dans ce cas, le paramètre «a» peut s'interpréter comme un facteur de dilatation (a<0) ou de contraction (a>0) du filtre $\hat{\psi}$ correspond à des intervalles fréquentiels adjacents tandis que le paramètre « τ » peut s'interpréter comme un décalage de phase.

Par conséquent, la propriété principale de la transformée en ondelette est de rendre possible une discrimination de type temps-échelle des processus. Ceci permet notamment de mettre en évidence des différences entre des signaux ayant des densités spectrales proches. Le signal synthétique est composé de plusieurs fonctions localisées en temps, ce qui permet de mettre en évidence la propriété de localisation temporelle de la transformée en ondelettes. Les coefficients en ondelettes élevés sont de couleur claire par opposition aux coefficients plus faibles de couleur grise.

- Dans un premier temps, l'ondelette de Morlet elle-même est analysée, sa signature dans le plan temps-échelle étant constituée d'une zone dont le centre a pour coordonnée la fréquence caractéristique de l'ondelette et son centre temporel.
- Puis une fonction de Heaviside est analysée. L'analyse en ondelette de Morlet s'avère ainsi un bon outil pour identifier et caractériser les singularités du signal (en effet, le degré de décroissance des coefficients en ondelettes est directement lié à l'exposant de Holder de la fonction).
- Enfin, trois autres fonctions sinusoïdales sont étudiées. Les deux dernières ont une fréquence caractéristique propre tandis que le premier est la composition de ces deux fréquences. L'analyse en ondelette permet clairement l'identification des diverses fréquences temporellement ainsi que leur dissociation en terme d'échelle.

Tout d'abord, la fonction ondelette ψ(t) doit satisfaire des conditions mathématiques strictes. Par exemple, la propriété de localisation temps-échelle impose que la fonction ondelette soit caractérisée par un support temporel compact, et une décroissance rapide de la transformée de Fourier autour de l'origine en fréquence. La première condition impose donc une décroissance rapide autour de l'origine temporelle. Cette propriété peut être transposée dans le plan fréquentiel (décroissance rapide autour de l'origine des fréquences) et l'on a :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega = K_\psi < +\infty \Leftrightarrow \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \qquad \textbf{(4.79)}$$

En plus de la condition de normalisation de la fonction ondelette (la fonction Ondelette doit satisfaire $\|\psi\| = 1$ où $\| \|$ est la norme L2 classique sur R), des conditions plus restrictives doivent être exigées sur les moments de la fonction afin d'obtenir une formule de reconstruction du signal à partir de ces coefficients. Plus précisément, le processus temps continu x(t) sera d'autant mieux reconstruit à partir de ces coefficients en ondelettes Cx(a,τ) que les moments d'ordre élevé de la fonction ondelette sont nuls ou quasi-nuls :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0, k = 1, ....., N-1 \qquad \textbf{(4.80)}$$

La fonction ondelette qui vérifie la condition ci-dessus est dite régulière d'ordre N. Cette condition est dite « condition de régularité ». Si ces conditions sont remplies, il existe une formule de reconstruction (synthèse) du signal temps continu x(t) à partir de ses coefficients en ondelettes Cx(a,τ) :

$$x(t) = \frac{1}{K_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C_x(a,\tau)\psi_{a,\tau}(t) \frac{da d\tau}{a^2} \qquad \textbf{(4.81)}$$

De plus, une autre propriété intéressante est à notre disposition : la conservation de l'énergie (variance) entre plan temporel (x(t) et plan temps-échelle (Cx(a,τ)) :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{K_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |C_x(a,\tau)|^2 \frac{da d\tau}{a^2} \qquad \textbf{(4.82)}$$

Plusieurs fonctions ondelettes satisfaisant plus ou moins les conditions d'admissibilité sont mentionnées dans la littérature. En temps continu, les ondelettes les plus fréquemment utilisées sont l'ondelette de Haar, l'ondelette de Morlet complexe et les dérivées successives de la fonction gaussienne, une d'entre d'elles correspondant au chapeau Mexicain appelé ainsi du fait de sa forme.

Nous n'utiliserons ici comme ondelette continue que la seule ondelette de Morlet Cependant, nous utiliserons beaucoup plus les ondelettes discrètes multirésolution comme outil d'analyse dans les autres sections de ce rapport.

En effet avec des ondelettes étroites, on localise bien en temps, mal en fréquence (Ondelettes de Haar). Avec des ondelettes larges, on localise bien en fréquence, mal en temps (chapeau mexicain), on a adopté l'ondelette de Morlet car c'était le meilleur compromis temps-fréquence.

L'inconvénient majeur de cette transformée en ondelettes non-orthogonale est le fait que les coefficients sont caractérisés par une redondance d'information. Cette redondance implique notamment des corrélations entre coefficients d'ondelettes principalement dus à la forme du noyau de convolution et non au signal étudié rendant parfois difficile l'interprétation de ces coefficients. Les coefficients d'une transformation en ondelettes continue sont donc fortement dépendants de la forme de la fonction ondelette.

## *4.7 Méthode d'analyse par enveloppe (Transformée de Hilbert)*

### 4.7.1 Aperçu théorique

La transformée de Hilbert $\hat{X}(t)$ d'une fonction à valeur réelle $X(t)$ est obtenue par convolution du signal X(t) avec le terme $1/\pi t$.

La transformée de Hilbert $\hat{X}(t)$ peut être interprétée comme la sortie d'un système linéaire invariant avec comme entrée $X(t)$, et comme fonction de transfert $1/\pi t$.

Pour un processus aléatoire stationnaire $X(t)$, on peut définir l'enveloppe du signal à l'aide de la théorie de Cramer-Leadbetter . Cette théorie est exposée dans Vanmarke 1983, (Random Fields Analysis and Synthesis The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 382 pp.) et en détail dans Veneziano 1983**.** Cependant, il est possible de relier cette théorie à la transformée de Hilbert, ce que nous faisons ici.

### 4.7.2 Définition de la transformée de Hilbert

$$\hat{X}(t) = H(X(t)) = (h \otimes X)(t)$$

$$\hat{X}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)h(t-\tau)d\tau \qquad \textbf{(4.83)}$$

$$\hat{X}(t) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(t)}{t-\tau}d\tau$$

avec $h(t) = \frac{1}{\pi t}$ **(4.84)**

X(t)=sin(t) ➔ $\hat{X}(t)$=-cos(t)

Soit un vecteur réel Xr(t), la transformé de Hilbert de ce signal Xr(t) est le signal Xi(t).

Dans Matlab le signal Xi(t) =Hilbert(Xr(t)) est récupéré par une sorte de transformé de Hilbert complexe qui prend la forme suivante :

$$X(t) = Xr(t) + iXi(t) = Hilbert^{MATLAB}(Xr(t)) \qquad \textbf{(4.85)}$$

On note :

Xr(t)=X_signal(t)

X(t)=Hilbert(Xr(t)) est complexe

Xi(t)= Imag(X(t)) (Imag : la partie imaginaire)

L'enveloppe de Hilbert est alors définie comme suit :

$$R(t) = \pm\sqrt{Xr(t)^2 + Xi(t)^2} \qquad \textbf{(4.86)}$$

### 4.7.3 Exemples des signaux synthétiques

Nous avons générés des signaux périodiques par des fonctions cosinus et sinus, ces signaux sont utilisés comme tests synthétiques de validation :

$$y_0(t) = \sin(2\pi t/1)$$

$$y_1(t) = \cos(2\pi t) + \cos(2\pi t/0.1) \qquad \textbf{(4.87)}$$

$$y_2(t) = \cos(2\pi t) + \cos(2\pi t/1.40)$$

La Figure 23 montre le signal de $y_0$(t), avec une enveloppe tracée par méthode de Hilbert.

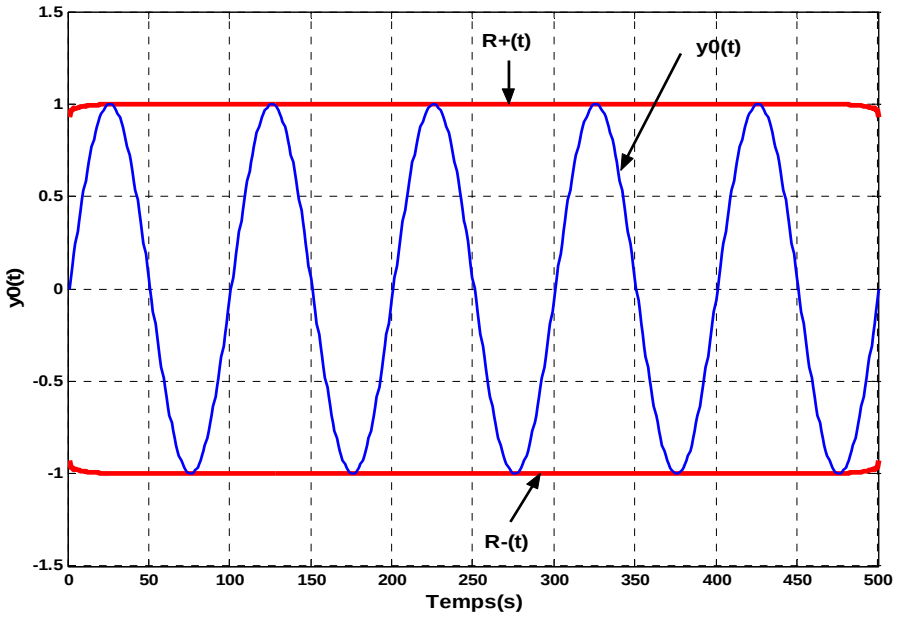



Figure 23: Signal synthétique $y_0(t)$ et son enveloppe R(t) par méthode de Hilbert.

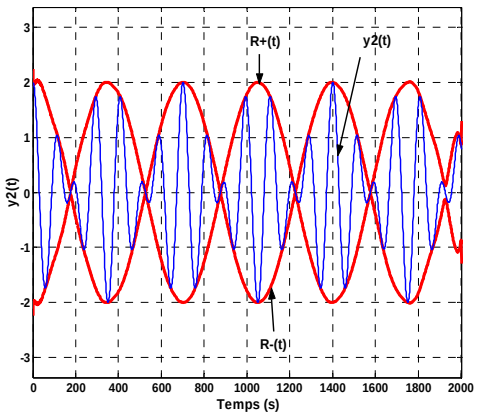



Figure 24: Signal synthétique y2(t) et son enveloppe R(t) par méthode de Hilbert.

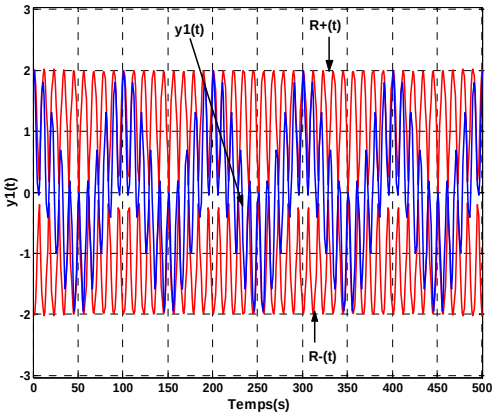



Figure 25: Signal synthétique y1(t) et son enveloppe R(t) par méthode de Hilbert

La Figure 25 montre l'enveloppe de y1(t) calculé par la méthode de Hilbert avec une pulsation ω grand. Tandis que la Figure 24 illustre l'enveloppe de y2(t) avec la pulsation ω petit par rapport au cas du signal y1(t).

On remarque, pour chaque cas, des battements dans l'évolution de l'enveloppe dans les deux parties positive et négative.

### 4.7.4 Exemple : enveloppe de Hilbert d'un résidu de pression

Les figures 26 et 27 montrent, à titre d'exemple, l'évolution du résidu ondelette multirésolution de la pression absolue mesurée au Mont Terri, forage BPP1, section de mesure PP1.

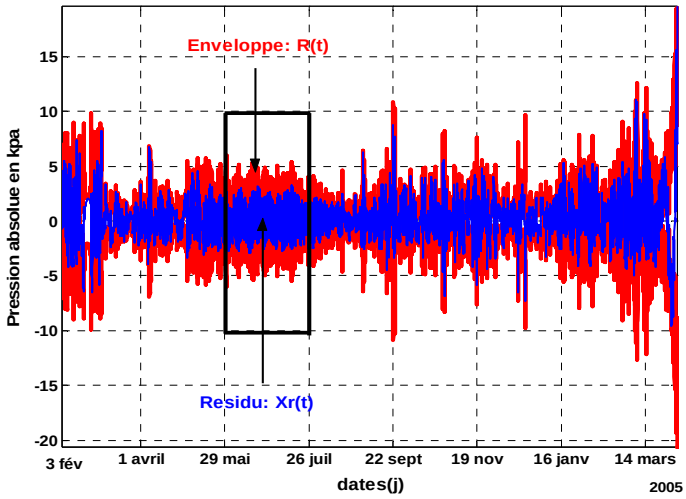



Figure 26: Evolution du résidu Xr(t) par ondelette de pression absolue mesurée dans PP1, en bleu, et son enveloppe de Hilbert R(t) en rouge, pour la période 29/01/2004-12/04/2005 (14 mois) avec un pas de temps d'1/2 heure.

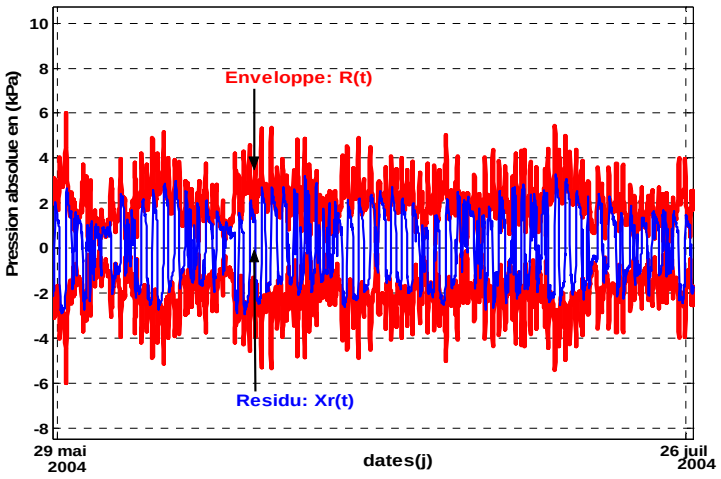



Figure 27: Zoom sur la figure précédente (du 29/05/2004 au 26/07/2004) montrant le résidu ondelette et son enveloppe évolutive de Hilbert R(t).

# *Partie 3 : Application aux chroniques de pressions hydrogéologiqu-es obtenues au laboratoire souterrain du Mont Terri (Suisse)*

# 5 *Application des méthodes d'analyse aux chroniques du Mont Terri (avec ou sans prétraitement).*

## 5.1 *INTRODUCTION : PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES (PIEZOMETRIQUES ET HYDROMETEOROLOGIQUES)*

### 5.1.1 *Présentation des données utilisées (piézométriques et hydrométéorologiques)*

Les chroniques de données disponibles proviennent soit des mesures de pression interstitielle (mesures de type 'piézométrique'), soit des mesures de pression, de température et d'humidité relative de l'air (mesures de type 'hydrométéorologique').

Ici, nous nous intéressons en premier lieu aux chroniques de pression : pression interstitielle d'une part, et pression atmosphérique d'autre part. Concernant les mesures de pression interstitielle ('*pore pressure*'), les instruments utilisés sont des capteurs de pression absolue (voir paragraphe 5.1.2).

Les données atmosphériques de température et d'humidité relative de l'air (adimensionnelle) ont été analysées de façon préliminaire et présentées dans une autre annexe.

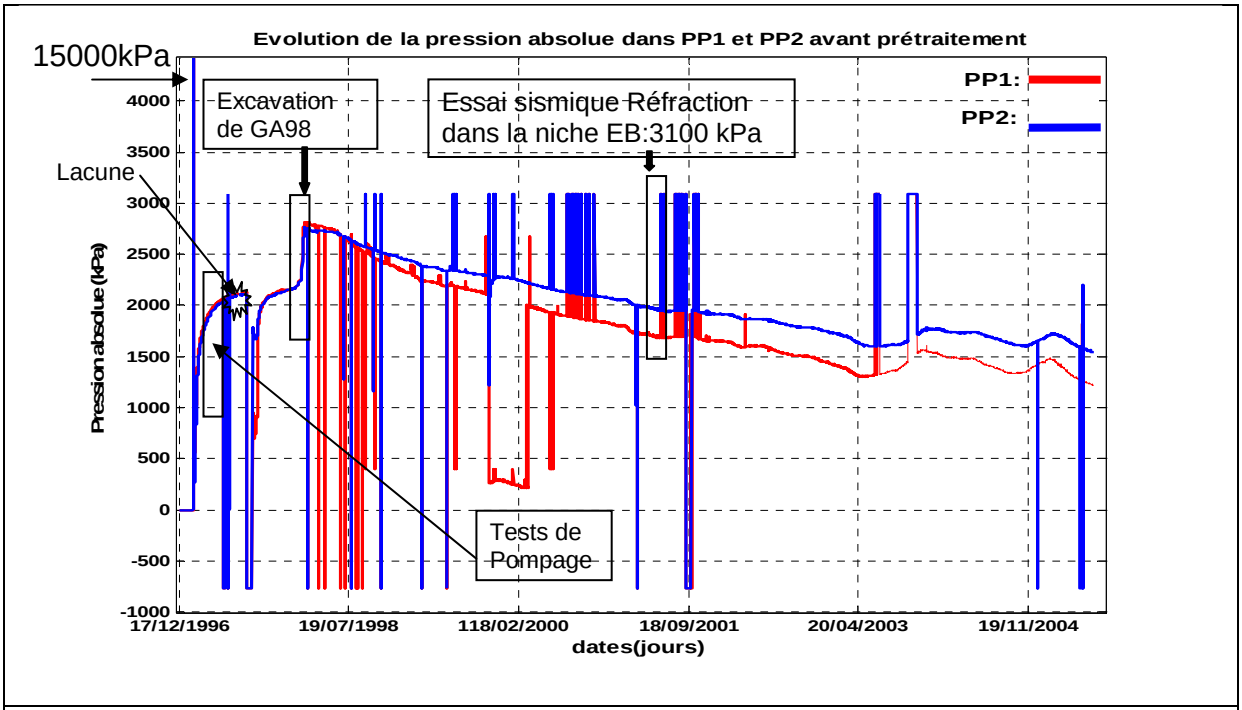



Figure 28: Chroniques des pressions absolues non prétraitées et mesurées dans les chambres PP1 et PP2 du forage BPP-1, sur une durée d'environ 9 ans (du 17/12/1999 au 30/06/2005).

Ces chroniques de données présentent des anomalies (aberrations, lacunes), ainsi qu'une irrégularité du rythme des acquisitions (pas de temps $\Delta t(i)$ variable), voir également des problèmes de dérives instrumentales (dûs aux effets thermiques sur les systèmes de mesures et d'acquisition électronique).

La Figure 28 montre l'évolution de la pression interstitielle en kPa sur une période de 9 ans dans les chambres de mesure PP1 et PP2 du forage BPP-1. Remarquons qu'il s'agit

ici des données 'brutes', c'est-à-dire, sans prétraitement. Les anomalies de type lacunes et aberrations sont nettement visibles.

En conséquence, les séquences de données brutes réellement disponibles pour l'analyse sont bien plus courtes que les 9 années d'acquisition représentées sur la Figure 28 - d'où l'intérêt d'utiliser des méthodes de prétraitement, même si dans certains cas elles peuvent se réduire à un simple séquençage des chroniques brutes, mais parfois aussi, à une véritable reconstruction des lacunes dûment testée et validée.

### *5.1.2 Transformation des pressions absolues en pressions relatives*

Rappelons, comme indiqué plus haut, que les mesures de pression interstitielle ('*pore pressure*') sont effectuées au moyen de capteurs de pression absolue reliés aux chambres de tests (saturées avec de l'eau de composition aussi proche que possible de l'eau porale) par des lignes hydrauliques. Ce dispositif permet de changer aisément de capteur en cas de dysfonctionnement de celui-ci. Ce type de capteur est en général plus précis, et de caractéristique (Keller PTX-510, gamme de mesure 0-30 bars).

Cependant, il a été prévu dans cette étude de transformer la pression absolue en une pression 'relative' par rapport à la pression atmosphérique, de la façon suivante.

$$\boldsymbol{p_{REL}(t) = p_{ABS}(t) - p_{ATM}(t)} \qquad \textbf{(5.1)}$$

On pense de cette manière, en retranchant la pression atmosphérique, mettre mieux en évidence, par exemple, l'effet de marée terrestre.

La Figure 31 illustre les opérations nécessaires, en pratique, pour transformer les signaux ($P_{ABS}(t)$,$P_{ATM}(t)$) en un signal de pression relative $P_{REL}(t)$ susceptible d'être analysé.

Du point de vue de l'acquisition des données, le fait de devoir déterminer la pression relative à partir de la relation $P_{REL}(t) = P_{ABS}(t)-P_{ATM}(t)$ pourrait être préjudiciable aux résultats : l'idéal serait d'utiliser directement des capteurs de pression relative pour éliminer les éventuels effets de déphasage instrumental entre mesures de pressions interstitielles et atmosphériques.

Cependant, la pression interstitielle absolue est également une variable fondamentale en tant que telle, et il semble judicieux de continuer à la mesurer directement, indépendamment de la pression atmosphérique, comme c'est déjà le cas au Mont Terri, à Tournemire et même à Bure.

En résumé, l'idéal serait de disposer de mesures directes de $P_{REL}(t)$ par des capteurs de pression relative, en sus des capteurs de mesures de $P_{ABS}(t)$ et des capteurs de $P_{ATM}(t)$, ceci afin de disposer au total d'un meilleur contrôle des trois variables ($P_{ABS}(t)$, $P_{ATM}(t)$, $P_{REL}(t)$) du point de vue du traitement des signaux.

L'analyse classique du piézomètre entièrement perforé dans un aquifère confiné, ou partiellement confiné, est insuffisante et/ou pas totalement applicable ici, pour déterminer une éventuelle causalité hydromécanique (air, eau, grains solides). L'analyse de ce problème tri-phasique pour l'argilite+encaissants +tunnels reste à faire.

### *5.1.3 Discussion de la relation Pabs(t) / Patm(t) et de Prel(t)*

Afin de mieux situer le concept de pression relative, on présente ici une discussion de la relation (ou corrélation) observée entre le signal de pression atmosphérique et le signal de pression interstitielle (absolue) dans un massif géologique poreux.

La Figure 29 montre la fonction d'intercorrélation (croisée) entre la pression atmosphérique et la pression interstitielle absolue, cette fonction étant tracée en fonction du délai. En fait, ce ne sont pas les signaux Patm(t) et Pabs(t) qui sont analysés ici, mais plutôt leurs composantes ondelettes d'échelle de temps quasi-diurne (soit 24 h ou 1 jour environ, en approximation dyadique).

On observe donc ici une bonne « corrélation » entre les composantes diurnes de la pression atmosphérique (Patm1j(t)) et de la pression absolue (Pabs1j(t)). Plus précisément, la Figure 29 indique l'existence d'un pic d'anti-corrélation (-65%) entre Patm1j(t) et Pabs1j(t) (à délai nul) et d'un pic secondaire de corrélation positive (40% à 50% de corrélation) entre Patm1j(t) et Pabs1j(t±12h) (donc à délai semi-diurne). On peut faire les remarques suivantes :

- Puisque il y a une corrélation négative (-65%) à délai nul, cela indique qu'il y a sans doute une relation linéaire de la forme Pabs1j(t) = a.Patm1j(t)+b avec a < 0,
- En outre, le fait qu'il existe une corrélation positive à délai semi-diurne nous parait confirmer la corrélation négative à délai nul : en effet, le délai semi-diurne correspond à une opposition de phase ; Patm(t) est anti-corrélée à elle-même au temps (t ± 12h) à cause des cycles jours/nuits ; il n'est donc pas étonnant que la corrélation croisée Patm(t)/Pabs(t±12h) soit, elle, positive.

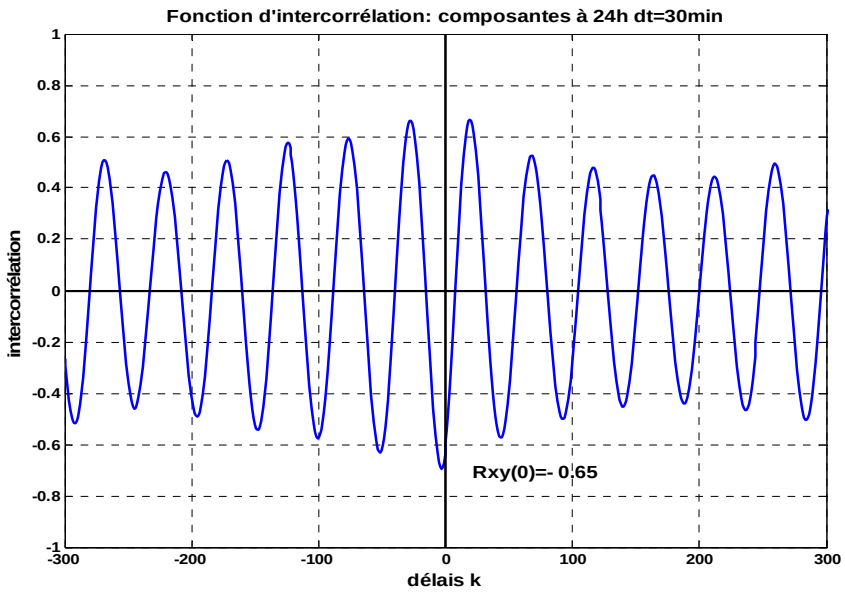



Figure 29: Fonction d'intercorrélation de la composante d'ondelette à 24h entre la pression atmosphérique et le résidu de la pression interstitielle mesurée dans PP1 entre le 18/05/2004 et le 23/09/2004 (délai maximal : M=300Δt, Δt=30min).

Par ailleurs, la Figure 30 montre la fonction de phase (ou spectre de phase) entre la pression atmosphérique et la pression absolue, en fonction de la fréquence.

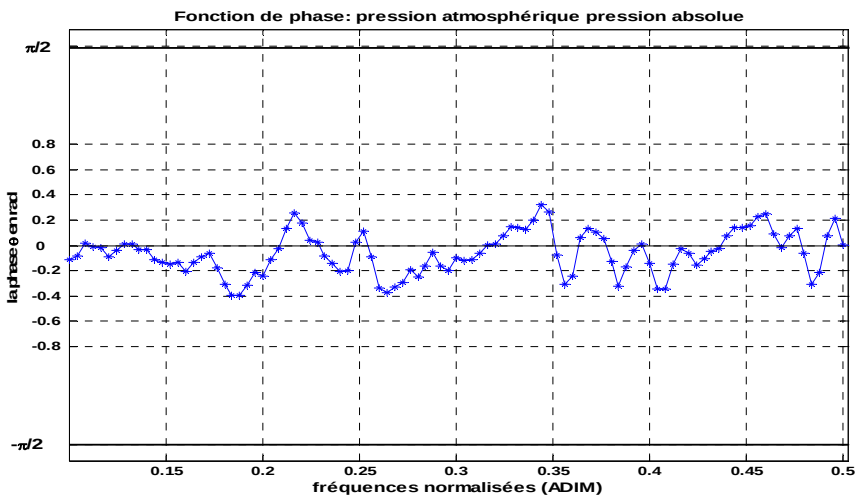



Figure 30: Fonction de phase entre la pression atmosphérique et la pression absolue mesurée dans PP1 entre les 29/01/2004 et le 12/04/2005 (durée: 1.5 ans).

Le déphasage θ(f) entre Patm et Pabs est très faible à toutes les fréquences ($\theta = \pm 0.06\pi$ radians) ce qui correspond, pour la fréquence diurne, à un délai $\tau = \pm \theta/2\pi f$ = 0.72 h, soit à peine 1.5 pas de temps, ce qui est faible ou même significativement nul statistiquement. Ce déphasage faible (ou négligeable) entre Patm et Pabs s'explique peut-être par l'effet direct et rapide de Patm sur Pabs mesurée dans la chambre PP1, via les lignes hydrauliques connectées à la surface de la galerie de sécurité. De plus, le pas de temps de saisie étant de 30 mn, tout déphasage ou délai $\tau \leq 30$ mn est non observable.

Il convient, pour la suite, d'approfondir l'analyse corrélatoire temporelle des signaux (Patm(t), Pabs(t)), ou bien de leurs résidus, à l'aide des outils suivants :

- en analyse temporelle croisée avec délais, la fonction de transfert F(τ) : X(t)=Patm(t)→Y(t+τ)=Pabs(t+τ) (modèle de convolution, fonction du délai τ).
- en analyse temporelle sans délais (τ = 0), la régression linéaire de Y=Pabs(t)|X=Patm(t) et les ellipses de dispersion (analyse bivariée).

On comparera les résultats de ces analyses statistiques à un modèle de type « ACF » (Atmospheric Correction Factor) proposé et utilisé pour analyser les données du forage EST207 du LSM/HM (Andra).

Modèle ACF

Brièvement, le modèle « ACF » consiste à postuler (et à vérifier) qu'il existe une relation 'modèle' entre Patm et Pabs, linéaire et sans délais, de la forme :

*Modèle :*

$$P_{ABS}(t) = \overline{P}_{ABS} + ACF.(P_{ATM}(t) - \overline{P}_{ATM}) + \varepsilon_{ABS}(t) \qquad \textbf{(5.2)}$$

**où** $\varepsilon_{ABS}(t)$ *représente le résidu de* $P_{ABS}$ i.e $\varepsilon_{ABS}(t)$ *est un résidu* $\delta_{PABS}(t)$ *représentant la* $P_{ABS}$ *débarrassée de l'influence des fluctuations de* $P_{ATM}$.

En pratique, le coefficient ACF serait de l'ordre de l'unité, ou une fraction de l'unité. On pourra prendre en compte, grâce aux outils développés, les effets suivants (non pris en compte jusqu'ici dans l'analyse de type « ACF ») :

- Préfiltrages avec extraction de résidus débarrassés des fluctuations non-stationnaires et extraction de composantes pertinentes (par exemple diurnes) ;
- Prise en compte des délais ($t \rightarrow t+\tau$) dans le modèle de relation linéaire ;

En principe, le résidu de pression obtenu ($\varepsilon_{ABS}(t)$) devrait être non corrélé (ou peu corrélé) à la pression atmosphérique. Ce résidu de pression absolue, débarrassé des effets de pression atmosphérique, devrait s'écrire, selon le modèle ACF :

$$\varepsilon_{ABS}(t) = \left(P_{ABS}(t) - \overline{P}_{ABS}\right) - ACF.\left(P_{ATM}(t) - \overline{P}_{ATM}\right) \qquad \textbf{(5.3)}$$

Ce résidu de pression interstitielle est donc en principe totalement débarrassé des effets de pression atmosphérique ; ce résidu devrait donc être utilisé pour analyser les phénomènes indépendants de Patm, tels que :

- les effets, sur la pression interstitielle, des marées terrestres (phénomène gravimétrique qui n'a rien à voir avec les fluctuations barométriques) ;
- les effets dûs au creusement de galeries, par propagation de perturbations de pression interstitielle et de contraintes mécaniques (effets qui devraient être peu ou pas influencés par les fluctuations barométriques).

Notons enfin que, si l'on utilise la pression relative au lieu de la pression absolue, on obtient de façon équivalente, par simple insertion de Prel(t)=Pabs(t)-Patm(t) et de sa moyenne dans l'équation **5.3** :

$$P_{REL}(t) = -(1 - ACF) * P_{ATM}(t). + \left(\overline{P}_{ABS} - ACF * \overline{P}_{ATM}\right) + \varepsilon_{ABS}(t) \qquad \textbf{(5.4)}$$

$$\begin{aligned} \overline{P}_{REL}(t) &= -(1 - ACF) * \overline{P}_{ATM}. + \left(\overline{P}_{ABS} - ACF * \overline{P}_{ATM}\right) + 0 \\ &= \overline{P}_{ABS}(t) - \overline{P}_{ATM}(t) \end{aligned} \qquad \textbf{(5.5)}$$

d'où :

$$P_{REL}(t) - \overline{P}_{REL} = -(1 - ACF).\left(P_{ATM}(t) - \overline{P}_{ATM}\right) + \varepsilon_{ABS}(t) \qquad \textbf{(5.6)}$$

d'où :

$$P_{REL}(t) = \overline{P}_{REL} - (1 - ACF).\left(P_{ATM}(t) - \overline{P}_{ATM}\right) + \varepsilon_{REL}(t) \qquad \textbf{(5.7)}$$

Enfin, on voit que l'équation (5.7) suggère l'existence d'un gain temporel lié à l'ACF, sous la forme :

$$\boldsymbol{P_{REL}(t) - \overline{P}_{REL} = -Gain \times \left(P_{ATM}(t) - \overline{P}_{ATM}\right) + \varepsilon(t)} \qquad \textbf{(5.8)}$$

avec *:*

$\boldsymbol{Gain = 1 - ACF}$ .

Le calcul montre que les résidus de Prel(t) et Pabs(t) sont les mêmes, c'est-à-dire, par construction :

$\varepsilon_{REL}(t) = \varepsilon_{ABS}(t)$ .

Pour les mêmes raisons que ci-dessus, le résidu de pression relative ainsi obtenu ($\varepsilon_{REL}(t)$) est en principe totalement débarrassé des effets de pression atmosphérique.

Pour déterminer l'ACF, nous avons utilisé deux méthodes différentes la première consiste à calculer la fonction d'intercorrélation entre les composantes ondelettes à 24h de la pression atmosphérique et de la pression absolue (ou son résidu).

$$ACF_1^{H.F} = R_{24h}(0).\frac{\sigma_{P_{ABS}(24h)}}{\sigma_{P_{PATM}(24h)}} \quad \textbf{(5.9)}$$

La deuxième méthode consiste à calculer la régression linéaire entre la pression atmosphérique et le résidu de la pression absolue, la pente de la régression linéaire correspond à l'ACF

$Y = a.X + b$ : Régression linéaire (modèle globale)

$$ACF_2^{H.F} = a = R_{XY}.\frac{\sigma_{P_{ABS}}}{\sigma_{P_{ATM}}} \quad \textbf{(5.10)}$$

Le **Tableau 5** ci-dessous montre les valeurs de l'ACF calculées par deux méthodes dans le site de Meuse/Haute Marne (voir annexe 9). Les valeurs estimées dans les chambres 11 et 5 sont du même ordre de grandeur que celles estimées par une autre procédure (*Hydro Invest*).

| Section de mesure (PP, EST207) | $ACF^{HF}2$ Régression linéaire globale | $ACF^{HF}1$ Intercorrélation ondelettes 24h | ACF (Hydro Invest) |
|---|---|---|---|
| CH1 Bure | 0.10 | -0.003 | **0.20** |
| CH11 Bure | 0.41 | 0.35 | **0.50** |
| CH5 Bure | 0.60 | 0.59 | **0.65** |

Tableau 5: Liaison entre Patm(t) et Pabs(t). Méthode ACF2 : régression linéaire entre le résidu de Patm(t) et 'Pabs(t)' (*en fait le résidu par moyenne mobile*). Méthode ACF1: intercorrélation des composantes ondelettes à 24h des résidus de Patm(t) et 'Pabs(t)' (*en fait le résidu par moyenne mobile*). Méthode ACF: méthode utilisé dans la correction des effets de Patm.

Le **Tableau 6** montre les valeurs des gains déduites à partir des valeurs des ACF calculées dans le **Tableau 5**.

**N.B** : on note $ACF^{HF}$ à la place de l'ACF pour ne pas confondre avec ACF calculé par ailleurs (*Hydro-Invest*).

| Section de mesure (PP, EST207) | Gain2=(1-ACF$^{HF}$2) par régression linéaire globale | Gain1a=(1-ACF$^{HF}$1) intercorrélation par ondelettes 24h |
|---|---|---|
| CH1 Bure | 0.90 | 1 |
| CH11 Bure | 0.59 | 0.65 |
| CH5 Bure | 0.40 | 0.41 |

Tableau 6: Gain barométrique liant résidu Patm(t) et résidu Pabs(t). Méthode ACF$^{HF}$2 : régression linéaire entre ΔPatm(t) et 'ΔPabs(t)' (*en fait le résidu de par moyenne mobile*). Méthode ACF$^{HF}$1: intercorrélation des composantes ondelettes à 24h des résidus de Patm(t) et 'Pabs(t)' (*en fait le résidu par moyenne mobile).*

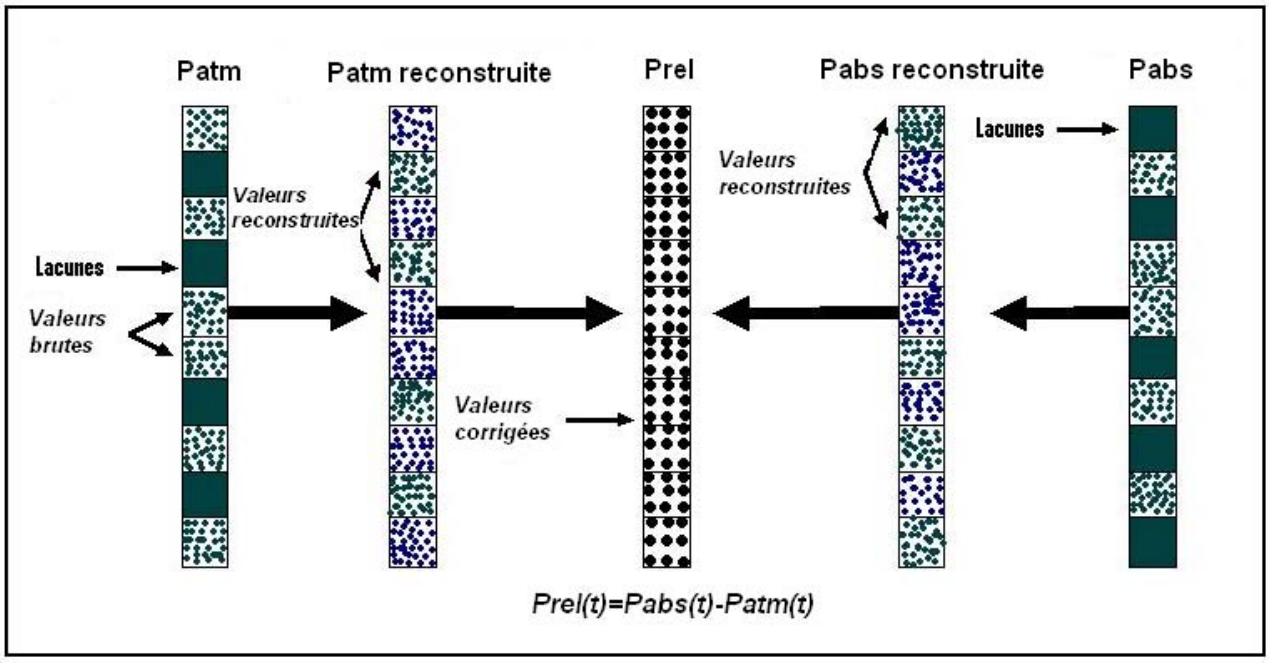



Figure 31: Ce schéma montre la méthode utilisée pour calculer la pression relative à partir de la pression interstitielle absolue (*pore pressure*) et de la pression atmosphérique, avec prétraitement (reconstruction) tenant compte de possibles lacunes et aberrations dans les chroniques brutes observées, Patm(t) et Pabs(t).

Sur le plan pratique, pour soustraire la pression atmosphérique à la pression interstitielle absolue, nous avons utilisé un procédé expliqué en Figure 31 qui permet, à la fois, de reconstituer les lacunes des deux chroniques de pression (étape de prétraitement), et de soustraire la pression atmosphérique de la pression interstitielle, selon l'équation :

$$\boldsymbol{P_{REL}(t) = P_{ABS}(t) - P_{ATM}(t)} \qquad \textbf{(5.11)}$$

avec : $P_{ABS}$ (t): pression absolue (prétraitée, reconstituée), en kPa ;

$P_{ATM}$ (t): pression atmosphérique (prétraitée, reconstituée), en kPa ;

$P_{REL}$ (t): pression relative (influencée par les reconstitutions), en kPa.

## *5.2 Analyse des signaux de pression à l'échelle mensuelle (sans prétraitement)*

Dans cette section, on présente une première analyse des chroniques de pression atmosphérique et de pression relative en PP1 du Mont Terri non pré-traitées à l'échelle mensuelle : la plus grande échelle de temps disponible pour les données brutes non perturbées. A titre préliminaire, on se contente ici d'analyser séparément les chroniques Patm(t) et Prel(t).

Rappelons que le signal de pression atmosphérique est mesuré dans la galerie de reconnaissance du Mont Terri (Figure 3) ; la pression relative dans PP1 est obtenue indirectement (*comme expliqué plus haut*) par soustraction de la pression atmosphérique à la pression absolue mesurée dans la chambre PP1. Ici, par commodité, les symboles 'PP1' et 'PP2' représenteront respectivement la pression relative (en kPa) dans les chambres de mesure PP1 et PP2 du forage BPP1, sur la période 02/08/2002 - 04/09/02, sans aucun prétraitement *mis à part la soustraction Pabs(t)-Patm(t)*. Cette période d'un mois représente la chronique la plus longue disponible sans lacunes, sans aberrations apparentes et avec un pas de temps constant ($\Delta t$ = 30 minutes).

### *5.2.1 Analyse de Patm(t) à l'échelle mensuelle (non prétraitée)*

La Figure 32 montre le signal de pression atmosphérique Patm(t) mesurée dans la galerie de sécurité durant le mois d'août 2002 au pas de temps 30 mn. On constate que ce signal semble à peu près stationnaire en moyenne, mais pas en amplitude ou écart type des fluctuations. En effet, il y a quelques fluctuations de très grande amplitudes relativement au reste du signal (par exemple autour du 7-10 août 2002).

En d'autres termes, le signal Patm(t) paraît non stationnaire en variance, du moins à l'échelle du mois. Malgré cette non-stationnarité, une analyse corrélatoire et spectrale de Patm(t) ont été faites.

La Figure **33** montre le spectre réduit de ΔPatm(t), la pression atmosphérique différentiée à l'ordre 1, qui est définie par :

$$\Delta p_{ATM}(t_{i^*}) = p_{ATM}(t_i) - p_{ATM}(t_{i-1}) \quad \text{(l'indice i* peut être noté i ou i+½).} \qquad \textbf{(5.12)}$$

Le spectre de la Figure 33 met en évidence un pic dominant à la fréquence 1/12 h (semi-diurne), ainsi qu'un pic secondaire à la fréquence 1/24 h (diurne).

Mais on constate de plus l'existence d'une valeur forte (non nulle) du spectre aux basses fréquences, f ≈ 1/1 mois et f = 0, ce qui indique une moyenne non nulle pour le signal différentiel analysé, ΔPatm(t). Ceci indique donc, pour le signal Patm(t) lui-même, l'existence d'une forte composante évolutive, ou d'une dérive non-stationnaire, à l'échelle de temps de l'étude (1mois).

Effectivement, vu la structure de la chronique Patm(t) montrée en Figure 32, avec son fort pic négatif au 7-10 août et ses pics positifs aux 12, 22 et 29 août, on peut y voir une sorte de dérive moyenne croissante dans le temps, ce qui est confirmé par l'analyse spectrale.

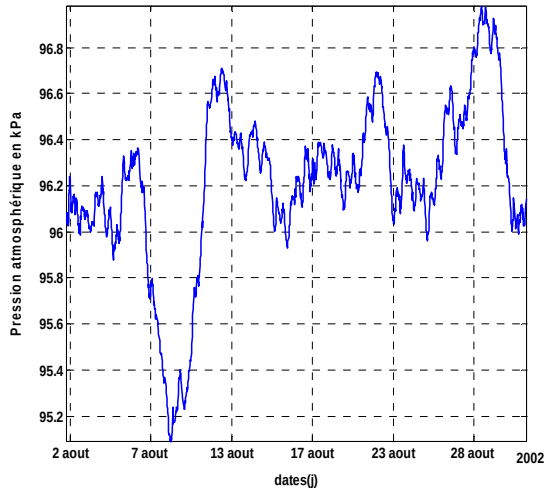



Figure 32. Chronique de Patm(t) en kPa durant le mois d'août 2002. Période du 02/08/2002 au 04/09/2002,durée = 1440 $\Delta t \approx$ 1mois, $\Delta t$ = 30min.

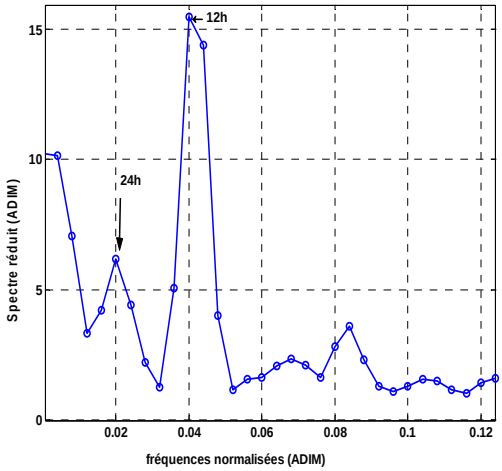



Figure 33. Spectre réduit de ΔPatm(t), pression atmosphérique différentiée à l'ordre 1. Période du 02/08/2002 au 04/09/2002,(1mois), $\Delta t$ = 30min. délai de coupure M=125 $\Delta t$ , et k0=1.

L'analyse spectrale log-log du 'bruit' de la pression atmosphérique brut montrée en Figure **34** permet de vérifier que ce dernier est de type auto-affine (fractale) avec une pente ß de -1.4 et un coefficient de Hurst H de 0.20 :

Rappels d'analyse fractale / auto-affine :

Voir également *ANNEXE 2 de ce rapport, ou encore, la thèse de* Zhou Liuzong (2002) On rappelle que, pour analyser le comportement auto-affine ou fractal d'un processus temporel (*ou d'un 'bruit'*) en temps continu, on peut représenter son spectre de densité de variance, spectrale S(f), en fonction de la fréquence (f) en coordonnées log-log, et en recherche de la pente ($\beta$), qui est aussi l'exposant de $\mathbf{S(f) \propto 1/f^{|\beta|}}$ , auquel est lié le coefficient de Hurst.

Cette méthode spectrale / log-log est couramment utilisée dans l'analyse des bruits de type '1/f' (Hardy et Beier, 1996); Mandelbrot et Van Ness, 1968). Pour un survol pratique des bruits '1/f' en géosciences, physique et traitement du signal, voir Milotti (1998).

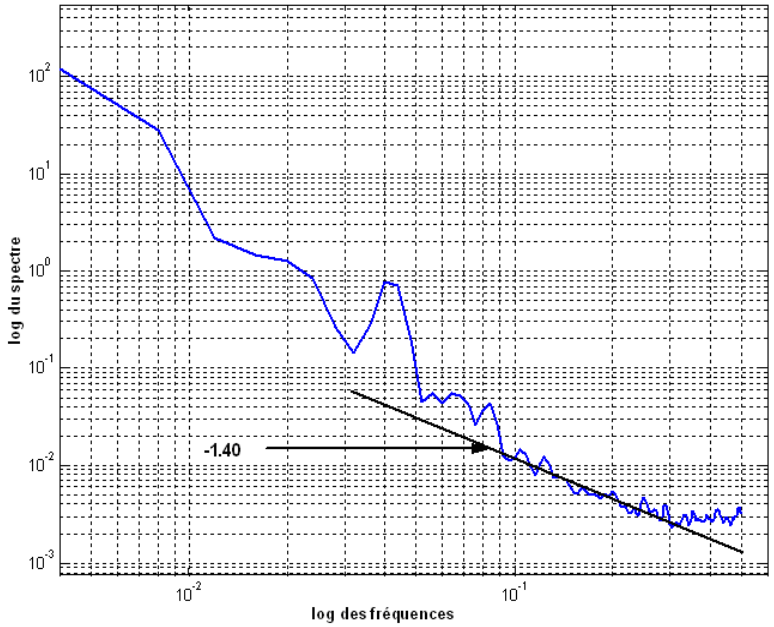



Figure 34. Analyse en log-log du spectre réduit de la pression atmosphérique brute: identification de l'exposant ($\beta \approx$ -1.40). Durée de la chronique $\approx$ 1mois (du 02/08/2002 au 04/09/2002), pas de temps $\Delta$t = 30 mn.

Il existe cependant d'autres méthodes d'identification de l'exposant $\beta$ ou du coefficient de Hurst H, par les chroniques temporelles plutôt que les spectres fréquentiels, e.g. l'analyse 'R/S' ou encore l'analyse de l'autocorrélation comme fonction puissance du délai (cette dernière est déconseillée, en général, pour des raisons de qualité d'estimation). Pour plus de détails, voir Mandelbrot et Van Ness (1968, comme référence historique), ainsi que les revues développées dans les travaux suivants : Ababou et Gelhar (1990) ; Molz et al., (1997) ; Zhou (2002) ; et d'autres références citées par ces auteurs.

Les processus auto-affines peuvent être classés selon la relation entre l'exposant $\beta$ et le coefficient de Hurst H comme suit :

Pour le mouvement brownien fractionnaire (fBm), on a :

$$\beta = -(2H + 1) \qquad \textbf{(5.13)}$$

Pour bruit gaussien fractionnaire (fGn), on a :

$$\beta = -(2H - 1) \qquad \textbf{(5.14)}$$

Les processus auto-affines de type **fBm** (*fractional Brown motion*) peuvent être classés selon la valeur de l'exposant $\beta$ ou du coefficient de Hurst H comme suit:

$0 < \boldsymbol{H} < 1/2$ : processus fBm« anti-corrélé » (incréments anti-corrélés)

$\boldsymbol{H} = 1/2$ : processus fBm« neutre », brownien (incréments non corrélés)

$1/2 < \boldsymbol{H} < 1$ : processus fBm de type « persistant » (incréments corrélés)

Noter que le classique 'bruit blanc', qui est un bruit fictif « pathologique » et qui n'existe pas en réalité, s'obtient comme un fBm qui aurait un coefficient de Hurst négatif (H = -1). Le 'bruit blanc' possède cependant une variance infinie et une autocorrélation de type fonction delta de Dirac qui diverge aux délais nuls.

### *5.2.2 Analyse de la pression relative dans PP1 à l'échelle mensuelle (non prétraitée).*

Dans cette section nous analysons la pression relative (kPa) à léchelle de temps mensuelle (sans prétraitement), avec un pas de temps Δt de 30 min, dans le forage BPP1, section de mesure PP1. Rappelons que la pression relative n'est pas directement mesurée ; elle a été obtenue ici, par soustraction des signaux bruts (non prétraités) de pression absolue et de pression atmosphérique, tous deux disponibles sans lacunes ni aberrations sur une période d'un mois.

La Figure 35 montre la chronique de la pression relative en kPa, au pas d'acquisition Δt = 30 min, entre le 02/08/2002 et le 04/09/2002. Le signal Prel(t) est clairement non stationnaire, avec une forte dérive moyenne à l'échelle du mois, mais il possède également une structure de fluctuations plus fines, sans doute diurne (voir les analyses ci-dessous).

Remarque : il semble assez clair physiquement, que l'origine de la dérive de la pression relative est la pression interstitielle absolue (et non la pression atmosphérique).

Les résultats de l'analyse spectrale de Prel(t), présentés dans la Figure 36, mettent en évidence deux pics à 12 h et 24 h dûs aux effets combinés de la marée terrestre et de la pression atmosphérique. Le pic semi-diurne est faible par rapport au diurne, car il est sans doute masqué par l'effet plus important des fluctuations diurnes de la pression atmosphérique.

En effet la présence de l'effet barométrique (pic 24h) dans la pression relative est due au fait que le milieu est partiellement confiné. Cela s'explique par la présence de la marée terrestre qui se traduit (Mangin, 1984) par l'existence d'un pic semi-diurne (Figure 35). Or, le coefficient d'efficience barométrique dans un aquifère confiné est connu pour varier entre 20% et 75% (Freeze et Cherry, 1979 ; Todd, 1959), et comme l'efficience barométrique représente le rapport entre la pression relative et la pression atmosphérique (Jacob 1940) cela explique la présence du pic diurne de la pression atmosphérique**,** donc après la soustraction de la pression atmosphérique à la pression absolue, il reste bien l'effet produit sur l'aquifère Confiné.

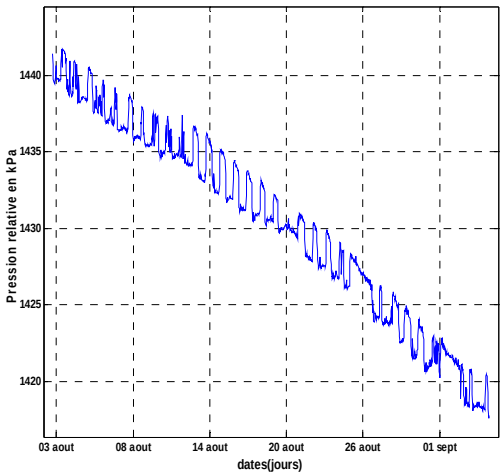



Figure 35: Chronique de pression relative (kPa) dans PP1, avec Δt=30mn, du 02/08/2002 au 04/09/2002 (1 mois).

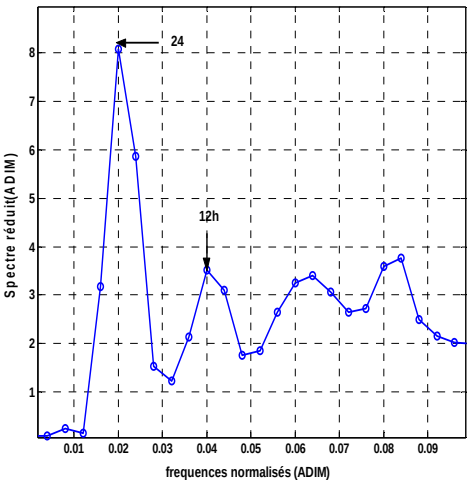



Figure 36**:** Spectre réduit de la chronique ΔPP1(t) de pression relative différentiée à l'ordre 1 (Δt=0.5h, du 02/08/2002 au 04/09/2002) délai de coupure M=125 ; k0=1.

## *5.3 Analyse des chroniques de pression aux échelles de temps multi-mensuelles et multi-annuelles (avec prétraitement)*

Dans cette section, nous analysons un ensemble de chroniques de pression acquises au Mont Terri sur des échelles de temps « longues » allant de quelques mois à deux ans. Ces chroniques « longues » ont été obtenues moyennant quelques prétraitements (reconstitutions, détection d'aberrations, homogénéisation des pas de temps….).

Sous l'effet de la marée terrestre, on pense que la formation géologique d'argilite étudiée ici peut se comporter *au moins partiellement* comme un aquifère confiné (une hypothèse utilisée dans un autre contexte par Mangin, 1984). Comme l'argilite est également soumise aux fluctuations de pression atmosphérique, il convient donc d'étudier dans un premier temps l'effet barométrique sur la pression interstitielle de l'argilite, que l'on choisit de convertir tout d'abord en pression interstitielle relative.

Pour cela, nous avons utilisé les prétraitements expliqués précédemment ; nous avons ainsi sélectionné deux des chroniques prétraitées les plus longues parmi les chroniques de pression disponibles (interstitielles et barométriques) :

- Chronique du 29/01/2004 au 12/04/2005 pour la chambre de mesure PP1 ;
- Chronique du 07/11/2003 au 21/05/2005 pour la chambre de mesure PP2,

avec un pas de temps constant de 30 min dans les deux cas. Il s'agit bien des chroniques prétraitées les plus longues disponibles jusqu'ici. D'autres chroniques moins longues ont été également analysées et sont présentées dans une autre annexe.

Les méthodes d'analyse utilisées pour ces chroniques « longues » sont :

- Les analyses corrélatoires et spectrales (simples et croisées) ;

- L'analyse ondelette multi résolution (et ondelette continue) ;
- L'analyse d'enveloppes par la transformée de Hilbert.

### *5.3.1 Analyses du signal de pression atmosphérique sur 1.5 ans*

La période étudiée est comprise entre le 07 novembre 2003 et le 21 mai 2005, avec une fréquence d'acquisition constante, à raison d'une mesure toutes les 30 minutes, et après prétraitement. Le signal prétraité est montré Figure 37.

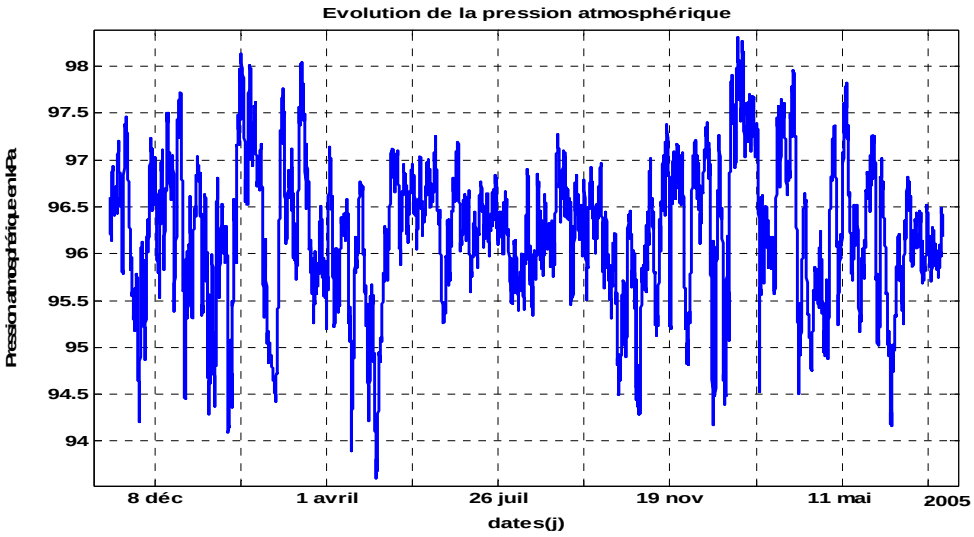



Figure 37: Evolution de la pression atmosphérique (kPa) entre le 07/11/2003 et le 21/05/2005 après traitement. La durée du signal est 26929 Δt, au pas de temps 30 mn, soit environ 1 an, 6 mois et 16 jours au total.

Les analyses corrélatoires et spectrales (Figure **38**) mettent en évidence l'existence d'une forte tendance ; en effet, le spectre de Patm présente de fortes valeurs aux basses fréquences (et à fréquence nulle). La tendance indique l'existence d'une évolution à long terme ou bien de fluctuations de longues périodes de l'ordre de la durée du signal (un an et demi, ici).

Le comportement éventuellement auto-affine (« fractal ») de la chronique Patm peut être analysé en exprimant le graphe spectre-fréquence en coordonnées log-log et en ajustant une droite (voir commentaires plus haut…). Le résultat est montré sur la Figure 39. On constate que la pente (coefficient β) est de -2.8, ce qui donne (pour un processus 'fBm') :

$\boldsymbol{\beta} \approx -2.8 \Rightarrow \boldsymbol{H} \approx 0.9$ : fBm 'persistant' (à incréments très corrélés).

**Remarque :** Le fait que l'on obtienne un exposant de Hurst proche de 1, donc un processus fBm de type 'persistant', semble confirmer l'importance - dans notre signal de durée un an et demi - d'échelles de fluctuations longues, comme déjà remarqué plus haut. Ces fluctuations lentes pourraient être dûes à des cycles atmosphériques saisonniers et annuels, mais leur caractère cyclique ne pourra se manifester (le cas échéant) que dans des signaux multi-annuels plus longs que ceux dont nous disposons actuellement.

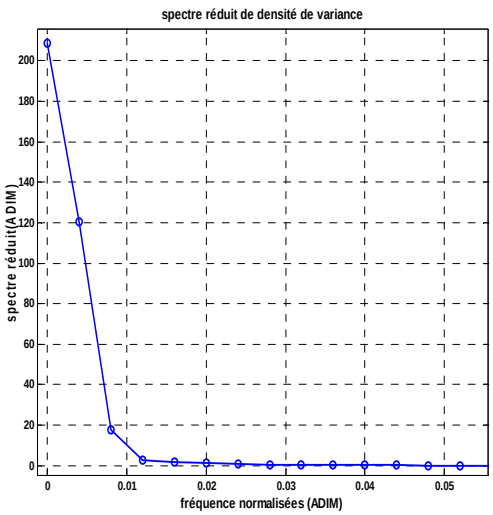



Figure 38**:** Spectre réduit de Patm en fonction de la fréquence adimensionelle.

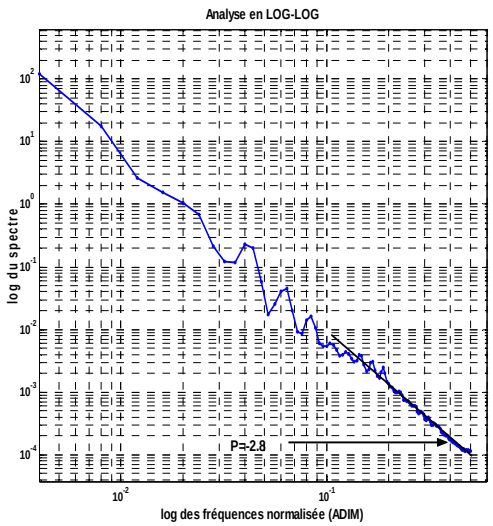



Figure 39: Analyse log-log du spectre réduit de Patm (durée : 26929 Δt).

Afin d'éliminer la tendance ou les fluctuations lentes, et de garder uniquement les composantes plus rapides qui nous intéressent, un filtrage différentiel a été appliqué au signal de pression atmosphérique (filtre de différenciation d'ordre 1) :

$$\Delta p_{ATM}(t_{i*}) = p_{ATM}(t_i) - p_{ATM}(t_{i-1}) \qquad \text{(l'indice i* peut être noté i ou i+½).}$$

Le spectre de densité de variance réduit (normalisé en le divisant par la variance) du signal différencié ΔPatm(t) est présenté en Figure 40 ; on constate l'existence de plusieurs pics spectraux :

- un pic spectral important à 5 j (inexpliqué);
- un pic spectral important à 24 h, qui correspond aux effets barométriques ;
- un pic spectral un peu moins important à 12 h (effets indirects de marée) ;
- et un pic spectral mineur à 8 h (inexpliqué).

Le spectre de ΔPatm(t) met également en évidence l'existence d'un 'bruit' assez important aux hautes fréquences, non montré sur la Figure 40.

Enfin, l'analyse en ondelette continue de Morlet (Figure 41) fournit une bonne synthèse des résultats obtenus jusqu'ici. On constate en effet sur le scalogramme de la Figure 41, l'existence d'une composante à 12 h bien marquée, stationnaire, mais d'amplitude variable (allure discontinue du scalogramme), d'une composante à 24 h (relativement discontinue en temps), ainsi que l'existence d'un bruit important. Le bruit haute fréquence se concentre essentiellement dans les détails d1(1h) et d2(2h) et le bruit aux basses fréquences se concentre dans les approximations A9(10j) et plus.

Le pic spectral à 8h n'est pas retrouvé sur le scalogramme ondelette ; ce pic à 8 h pourrait être un artefact lié à la différentiation et/ou à la transformée de Fourier et reste à expliquer.

**Résumé.**

En résumé, la pression atmosphérique montre l'existence de 3 composantes importantes : une tendance ou des fluctuations lentes (long terme), des variations structurées semi-diurnes et diurnes, et un bruit important à court terme.

**Remarque « technique »**.

La composante 12 h dans le texte ci-dessus est celle représentée par 8 h sur le scalogramme de la Figure 41, car il y a une redondance d'information entre 8 h et 16 h. Idem pour la composante 24 h, qui est représentée sur le scalogramme par 16 h.

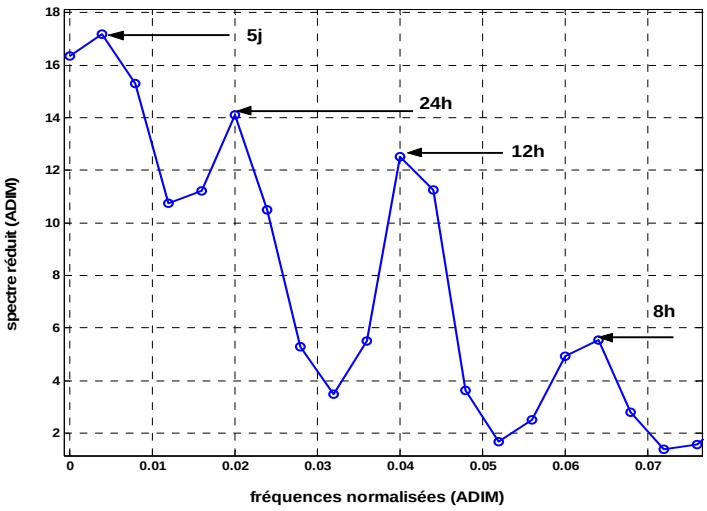



Figure 40: Spectre réduit de Patm filtrée par différenciation d'ordre 1 de Patm (durée de la chronique : 26929 Δt avec Δt=0.5 h). Paramètres d'estimation spectrale : délai de coupure M=125 (nombe de pas de temps) ; k0=1.

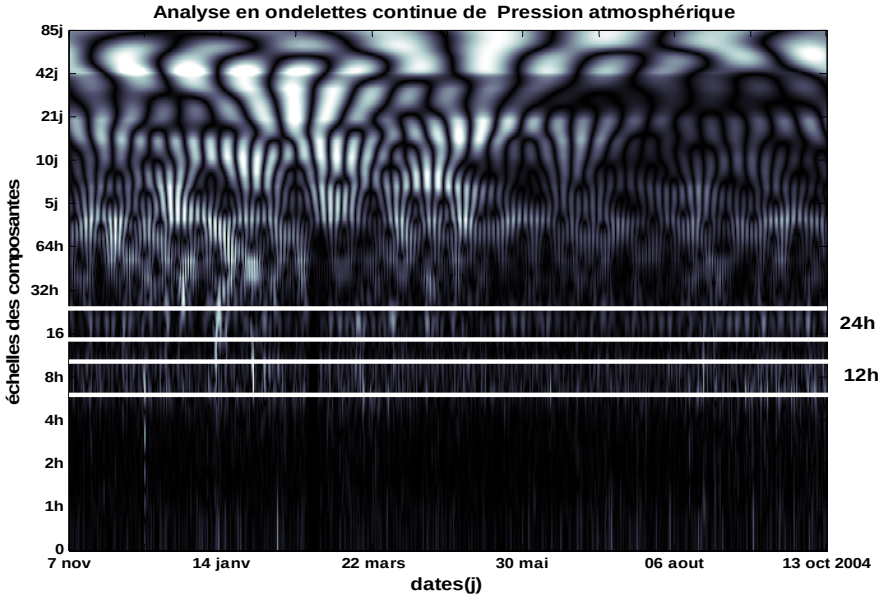



Figure 41: Scalogramme temps-échelle de Patm (ondelettes continues de Morlet). Durée de la chronique : 26929 Δt, avec Δt=0.5 h.

### *5.3.2 Analyses du signal de pression relative dans BPP-1 sur 1.5 ans*

Il existe deux chambres de mesure dans le forage BPP-1 du Mont Terri (Figure 4) : la chambre PP1 (d'intervalle de profondeur de 21 m) et la chambre PP2 (d'intervalle de profondeur 19.35 m).

Nous avons choisi comme exemple la chronique de pression relative prétraitée la plus longue obtenue pour la chambre de mesure PP1. Pour l'analyse des autres chroniques des chambres PP1 et PP2, on pourra se référer à l'annexe complémentaire. On rappelle que les données brutes exprimées en pression absolue ont été transformées en pression relative en retranchant la pression atmosphérique acquise dans l'atmosphère de la galerie de sécurité dans la niche C Voir également la discussion en introduction de cette section plus haut. Enfin, les résultats obtenus pour les deux chambres de mesure PP1 et PP2 étant analogues nous concentrons l'analyse sur PP1 :

Voir (**annexe 3**) pour l'analyse similaire de la pression relative dans PP2.

*a) Prel(t) dans la chambre PP1*

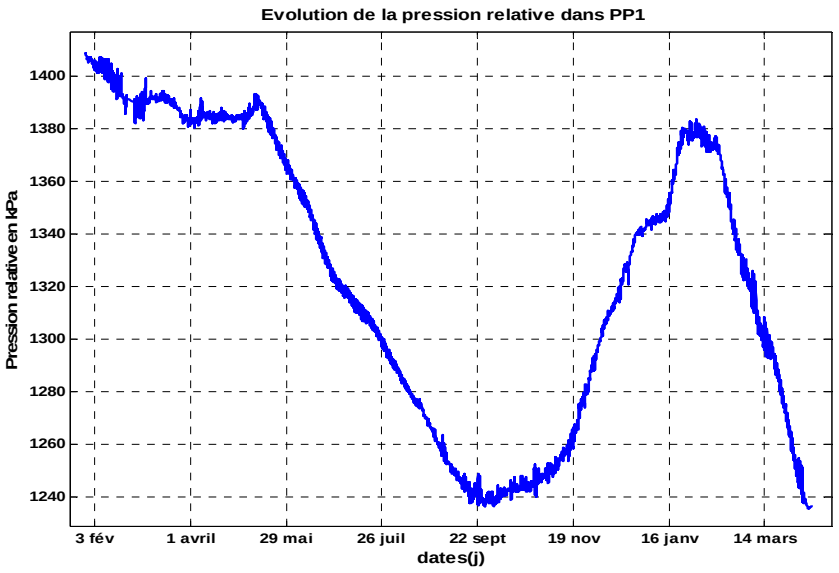



Figure 42: Pression relative (kPa) dans la chambre de mesure PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005(durée : 20736 Δt ~ 14mois avec Δt=0.5h ).

La Figure 42, montre l'évolution de la pression relative en kPa pour la période allant du 29 janvier 2004 au 12 avril 2005.

L'analyse corrélatoire et spectrale montre une forte non stationnarité, ou une fluctuation lente (basse fréquence), qui représente une évolution à long terme du signal. Ceci se manifeste par de fortes valeurs du spectre aux basses fréquences **(**Figure 43).

Pour analyser le comportement auto-affine du signal (analyse spectrale de type « 1/f »), on procède de la même façon que pour la pression barométrique, c'est-à-dire que l'on étudie le spectre en coordonnées bi-logarithmiques ou « log-log » : voir Figure 44. La pente de la droite ajustée en log-log est ici $\beta$ = -1.4, d'où H = 0.20, ce qui indique un processus fBm de type plutôt anti-corrélé.

**Remarque** : vu la procédure d'ajustement log-log utilisée, ces dernières conclusions ne concernent que la structure des fluctuations courtes.

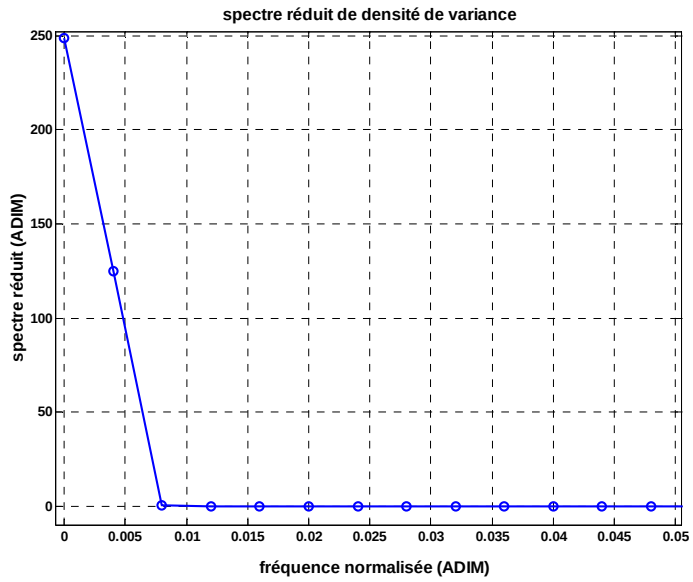



Figure 43: Spectre réduit de PP1(t) en fonction de la fréquence normalisée (durée : 20736 Δt) avec Δt=0.5h.

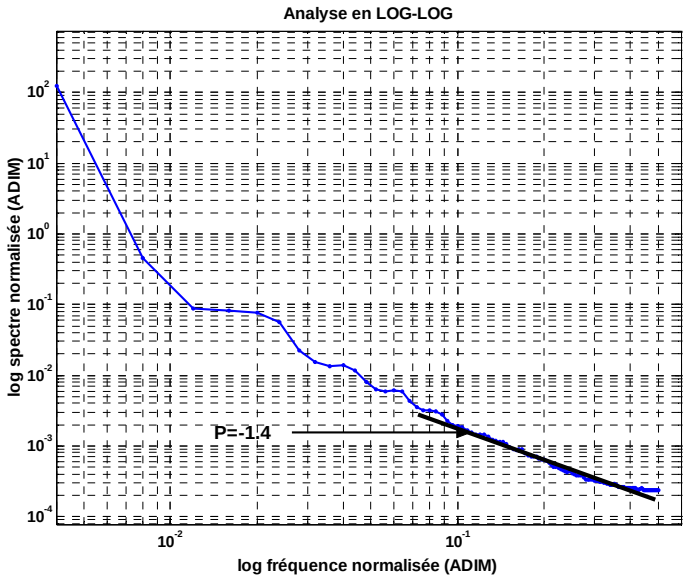



Figure 44: Analyse en logspectre de pression relative dans PP1(t),(durée : 20736 Δt) avec Δt=0.5h.

Après filtrage, au moyen d'un filtre de différenciation d'ordre 1 pour éliminer la tendance à basse fréquence, le spectre montre (Figure 45) un pic fort à 24 h qui rend compte de façon claire d'un effet dû à la pression atmosphérique, et un pic plus faible à 12 h, attribué à la marée terrestre.

En effet, on avait observé un effet de la marée sur la pression atmosphérique, il s'agit de l'effet barométrique **(**Figure 40**).** Ici l'effet de la marée est celui de la marée

terrestre. On sait en effet que l'effet barométrique est négligeable devant celui de la marée terrestre (Mangin, 2003).

Enfin, l'analyse en ondelettes de Morlet (Figure 46) donne une bonne synthèse des résultats obtenus. On constate sur le scalogramme l'existence des deux composantes à 12 h et à 24 h bien marquées. Les deux composantes possèdent des amplitudes variables (allure discontinue du scalogramme : présence de la composante indiquée par la couleur blanche et absence de la composante par la couleur noire).

Remarque sur la non stationnarité

Une forte non stationnarité est observé dans le signal de pression relative sur plus d'une année (Figure 42). L'amplitude de la fluctuation annuelle est d'environ 150 kPa (1.5 bars). Une interprétation probable est que cette évolution de la pression de PP1 est dûe aux phénomènes météorologiques saisonniers cycliques.

Par exemple, des chutes de neige en hiver pourraient expliquer la montée de la pression interstitielle (absolue et relative) dans la période du 22/09/2004 au 14/03/2005 (Figure 42). La pression relative atteint un maximum de 1380 kPa en hiver, puis rediminue pendant la période chaude période du 29 mai au 22 septembre 2005 où elle atteint alors un minimum de 1240 kPa.

Ces non stationnarités se traduisent par de fortes composantes basses fréquences dans le spectre de Fourier (Figure 43 et Figure 44).

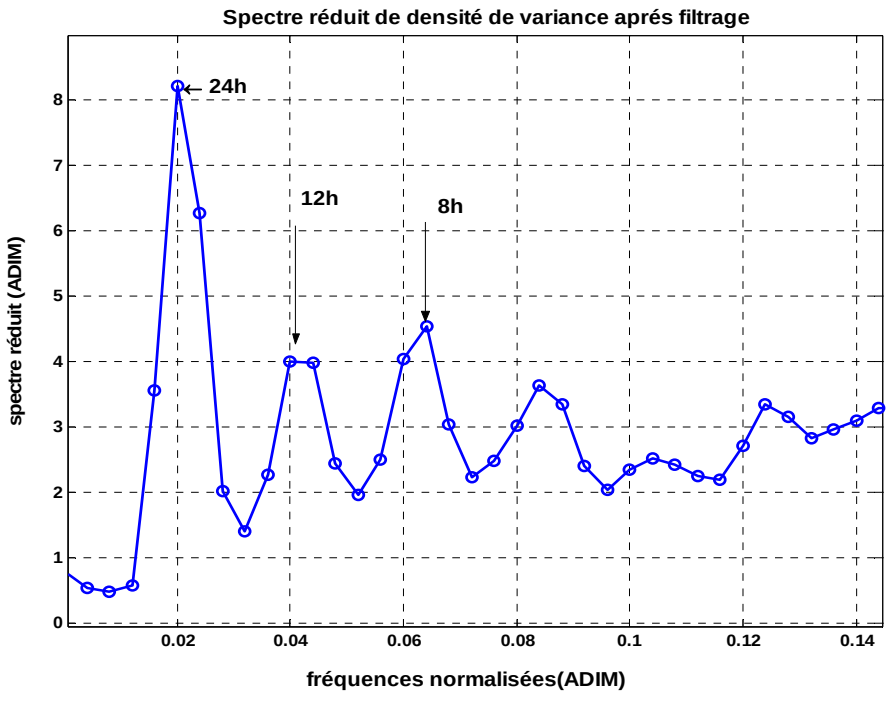



Figure 45: Spectre réduit de la pression relative filtrée par différenciation d'ordre 1 (ΔPP1(t)). Durée du signal : 20736 Δt .avec Δt=0.5h.

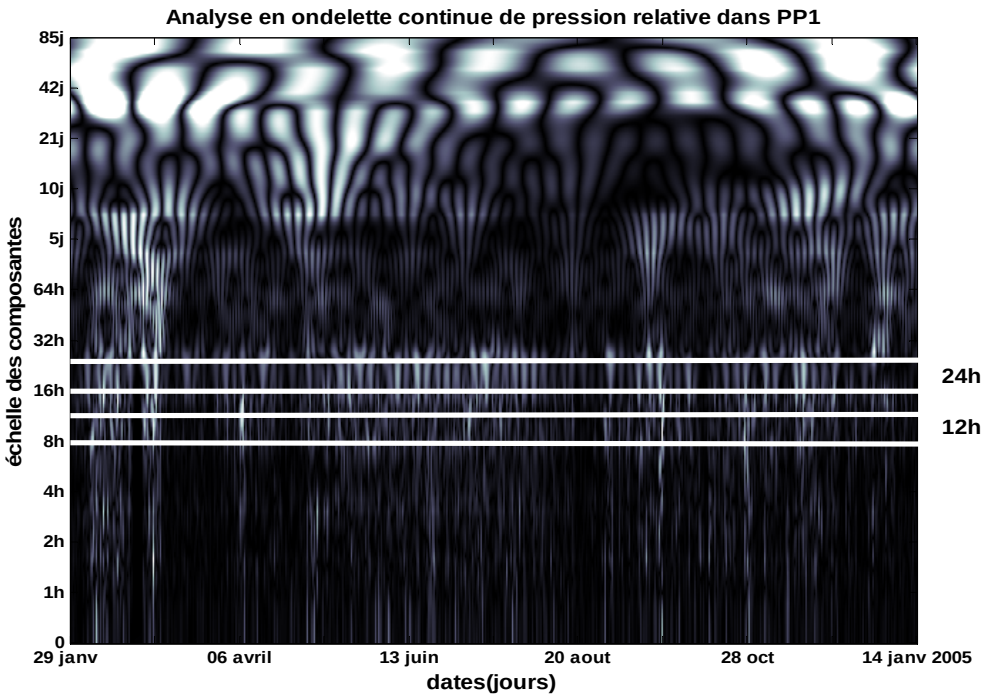



Figure 46: Scalogramme temps-échelle de la pression relative dans PP1 (ondelette continue de Morlet). Durée de la chronique : 20736 Δt, avec Δt=0.5 h.

### *5.3.3 Analyse de l'énergie de la pression relative selon les échelles de temps (ondelettes)*

Quand on étudie la variance de pression selon le niveau d'échelle de temps, il est possible d'analyser l'importance et l'amplitude des phénomènes à court, moyen et long terme. L'outil principal de cette analyse est l'ondelette multirésolution.

Définition :

L'énergie définie dans ce paragraphe est la variance des coefficients d'ondelette multirésolution, calculée par la transformée d'ondelette inverse (IWT) des coefficients d'ondelettes (WC) du signal X(t) suivant l'échelle dyadique exprimée en pourcentage.

Note:

*WC: 1-D Wavelet Transform.*

*IWT: Inverse Wavelet Transform (periodized, orthogonal).*

*FWT: Forward Wavelet Transform (periodized, orthogonal).*

L'échelle dyadique : le temps est échantillonné suivant une suite géométrique de raison 2 ($t = \Delta t \times 2^m$).

On constate sur la Figure 47 que la variance du signal est très faible à court et moyen terme par contre une élévation de l'énergie du signal à long terme est remarquée dans les deux chambres PP1 et PP2.

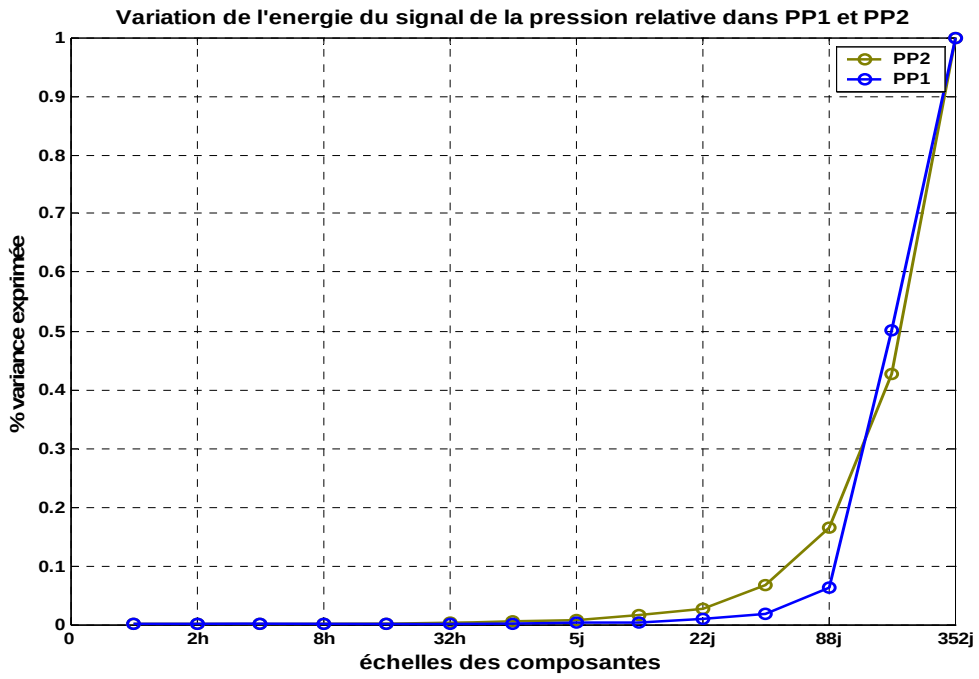



Figure 47: L'énergie de la pression relative dans PP1 et PP2 en fonction de l'echelle dyadique temporelle (en heures). Ces echelles vont de 2h à 352 j.

### *5.3.4 Chroniques de Pression absolue*

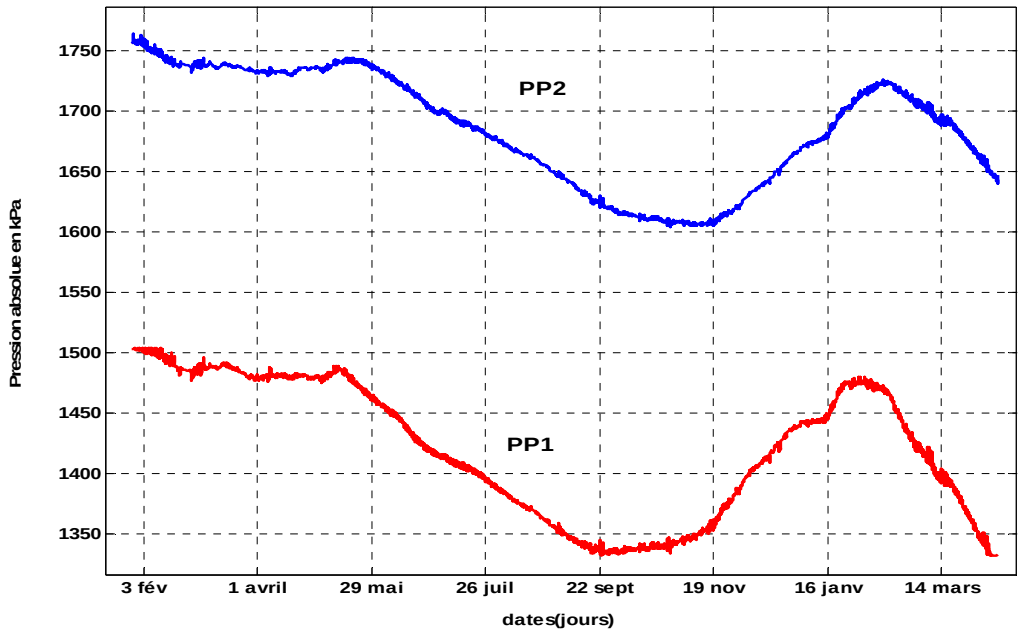



Figure 48: Evolution de la pression absolue en kPa dans les chambres PP1 et PP2 entre 29/01/2004 et 12/04/2005 (durée : 20736 Δt).

- La distance entre la chambre PP1 et la paroi de la Galerie de sécurité est de 21 m ;
- La distance entre la chambre PP2 et la paroi de la Galerie de sécurité est de 19.35m ;
- La distance entre les deux chambres de mesure PP1 et PP2 est de 1.65m ;
- La distance entre PP1, PP2 et la paroi de la galerie 1998 est respectivement de 4 m et 5.65m.

Bien que la chambre PP1 soit plus profonde que la chambre PP2 on remarque au cours de l'évolution que les valeurs de la pression absolue dans PP2 restent supérieures de près de 250 kPa a celles de PP1 (Figure 48).

Cela s'explique par la dépression engendrée par le creusement de la galerie de 98 plus proche de PP1 que de PP2, PP1 n'étant situé qu'à 4 m de la nouvelle galerie qui est à la pression atmosphérique. On a donc un gradient très fort entre PP2, PP1 et la galerie 98 sur une distance courte. Ce fort gradient peut également s'expliquer par l'existence d'une zone de saturation partielle autour de la galerie 98.

#### *5.3.4.1 Construction d'un résidu de pression par moyenne mobile, et analyses corrélatoire et spectrale*

La Figure 49 montre le résidu calculé par filtrage moyenne mobile avec une demi fenêtre (Wt) de valeur 6 j pour la pression absolue dans la chambre PP1. La Figure 50 montre également les courbes de moyenne mobile de pression absolue dans les chambres PP1 et PP2.

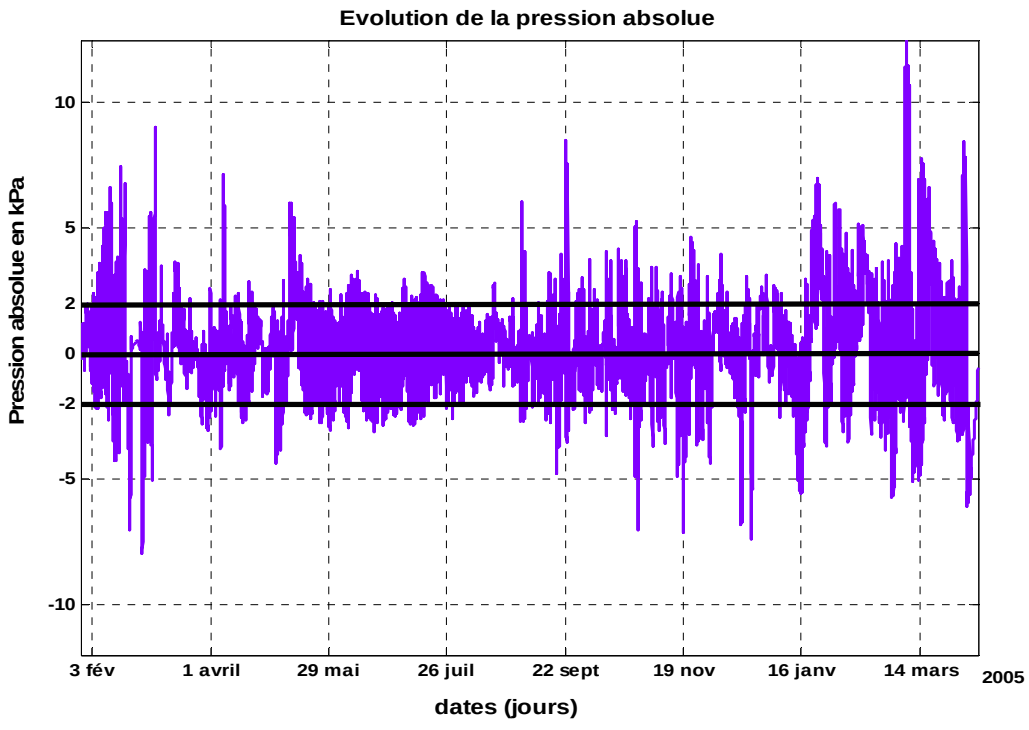



Figure 49: Evolution du résidu par filtrage moyenne mobile de la pression absolue en kPa dans PP1 entre 29/01/2004 et 12/04/2005 (durée : 20736 Δt~14mois).

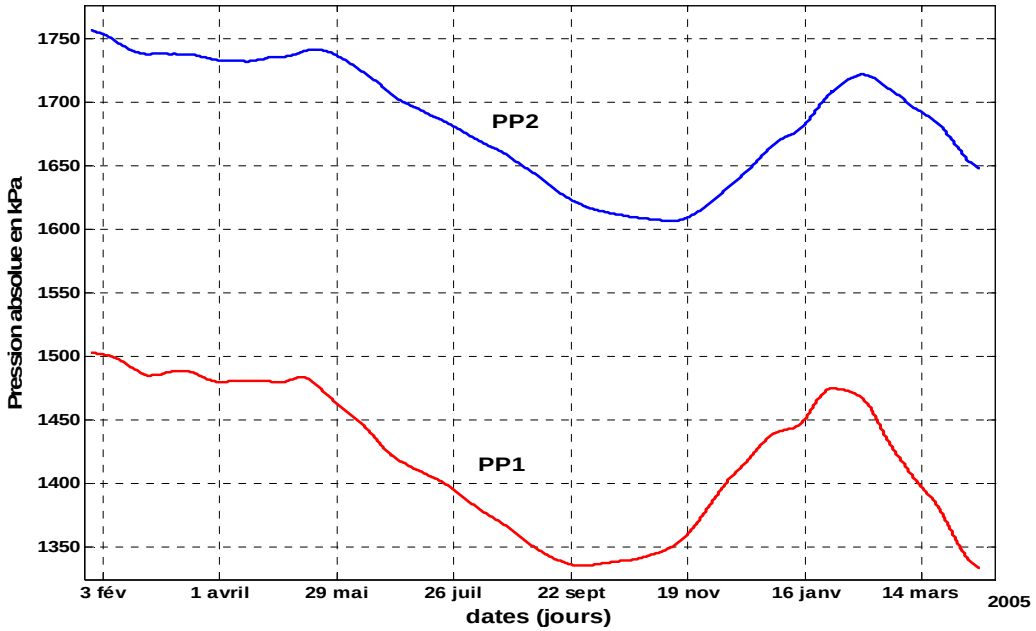



Figure 50: Evolution de la moyenne mobile de la pression absolue en kPa dans PP1 et PP2 entre 29/01/2004 et 12/04/2005 (durée : 20736 Δt~14mois) avec Wt=6j.

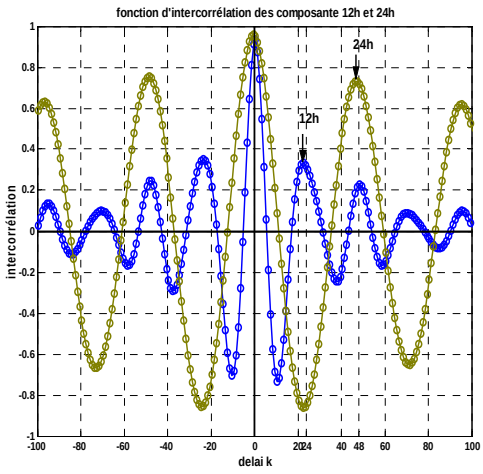



Figure 51: Fonction d'intercorrélation des composantes ondelettes 24h et 12h entre les pressions absolues de PP1 et PP2 (plage de délai [-M,+M] avec délai maximal :M=100 Δt).

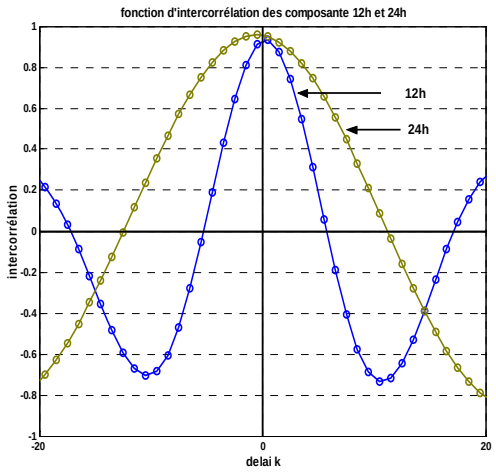



Figure 52: Zoom sur la Fonction d'intercorrélation des composantes 24h et 12h entre les pressions absolues de PP1 et PP2 (plage de délai [-M,+M] pour un délai maximal :M=20 Δt).

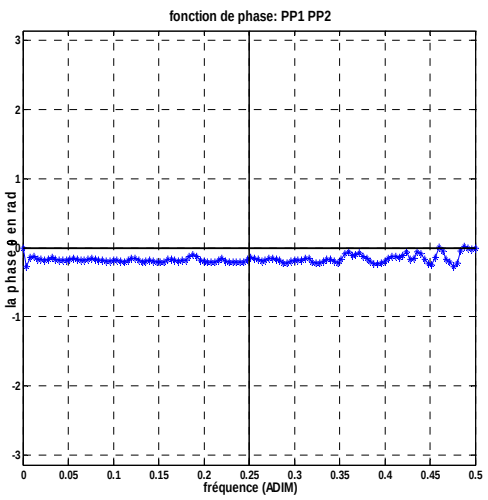



Figure 53: Fonction de phase entre les pressions de pore dans les sections PP1 et PP2. La phase est exprimée en rad et la fréquence est adimensionelle.

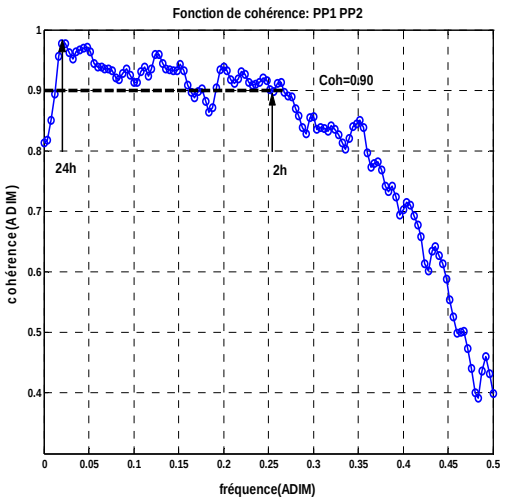



Figure 54 : Fonction de cohérence entre les pressions de pore dans les sections PP1 et PP2.

L'analyse du résidu obtenu par filtrage moyenne mobile de pression absolue dans les chambres PP1 et PP2 avec la fonction d'intercorrélation des composantes d'échelle dyadique 12 h et 24 h (Figure 52 et Figure 51) montre une corrélation parfaitement périodique. La fonction d'intercorrélation étant à peu près symétrique, il n'apparaît que peu de causalité entre la pression en PP1 et la pression en PP2. La fonction de phase Figure 53 montre que l'interaction entre la pression absolue dans PP1 et PP2 est presque en phase avec un déphasage de ($\theta$=-0.175rad=-0.055$\pi$ ), quelle que soit la fréquence.

La fonction de cohérence (Figure 54) entre PP1 et PP2 montre un degré de ressemblance qui varie entre 0.9 et 1 à long terme pour la période [2 h, 24 h] qui correspond à la fréquence [0.25, 0.019]. Dans cette période le système évolue linéairement.

### *5.3.4.2 Construction et analyse d'un résidu de pression par ondelette multirésolution.*

Nous avons effectué une analyse multirésolution par ondelette de type Daubechies 20, cette analyse montre l'évolution de plusieurs composantes d'échelle dyadique en fonction du temps. Ces composantes constituent l'approximation à grande échelle et le résidu qui est la somme des détails à petite échelle. Pour séparer l'approximation du résidu, nous avons choisi une composante de coupure de valeur (8 ~ 5 j), les échelles des composantes supérieures à 5j constituent l'approximation et les échelles des composantes inférieures ou égales à 5 j constituent le résidu.

La Figure 55 montre le résidu calculé par la méthode multirésolution pour la pression absolue dans PP1, La Figure 56 montre l'approximation pour les grandes échelles de pression absolue dans PP1 et PP2.

On remarque qu'il y a des effets de bord à la fin et au début de la chronique qui sont dus peut être à une erreur conceptuelle dans la boite à outil wavelab802 de Stanford. Pour calculer les moments de cette chronique (résidu) nous avons effectué un filtrage des effets de bords par rapport à la moyenne afin de comparer avec le résidu calculé précédemment par filtrage moyenne mobile.

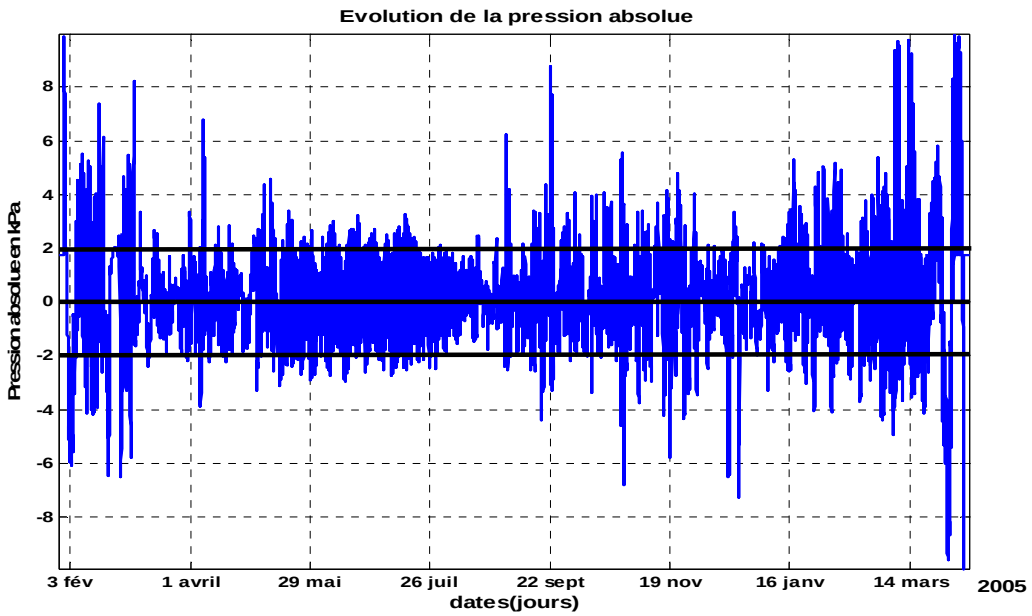



Figure 55: Evolution du résidu de pression absolue en kPa dans PP1 entre 29/01/2004 et 12/04/2005 par la méthode ondelette multirésolution(C=5j et durée : 20736 Δt~14mois).

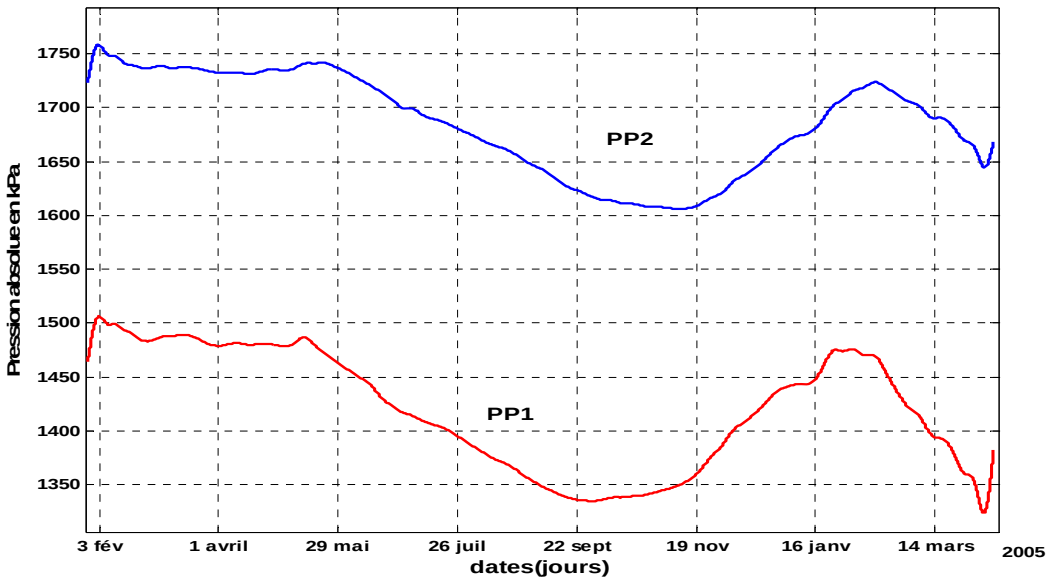



Figure 56: Evolution des approximations de pression absolue en kPa dans PP1 et PP2 entre le 29/01/2004 et le 12/04/2005(C=5j et durée : 20736 Δt~14mois).

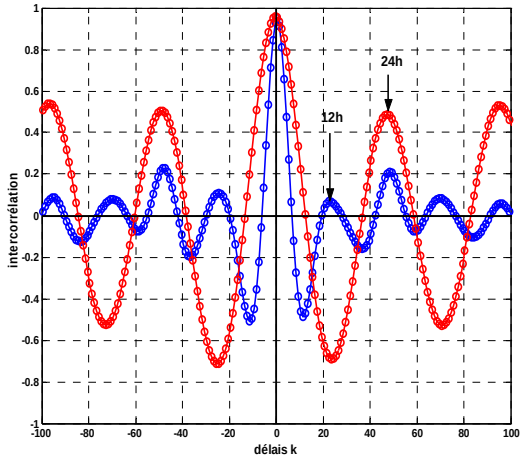



Figure 57: Fonction d'intercorrélation des composantes ondelettes 24h et 12h entre pressions absolues de PP1 et PP2 (plage de délai [-M,+M] avec délai maximal :M=100 Δt).

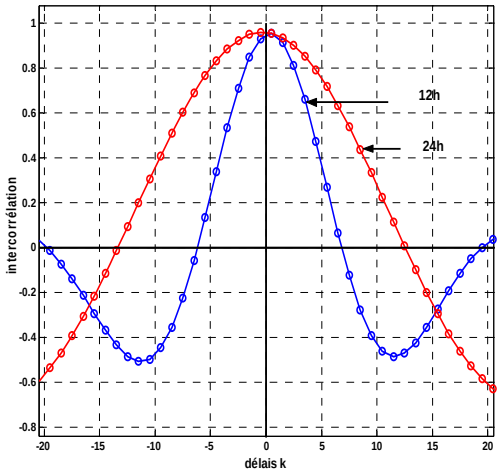



Figure 58: Zoom sur la fonction d'intercorrélation des composantes 24h et 12h entre les pression absolues de PP1 et PP2 (plage de délai [-M,+M] avec délai maximal :M=20 Δt).

La fonction d'intercorrélation montre une bonne corrélation entre les composantes d'échelle dyadique 24 h et 12 h pour les valeurs de pression absolue dans PP1 et PP2, (Figure 57 et Figure 58). Les deux méthodes utilisées ci-dessus, moyenne mobile et ondelette multirésolution montrent quasiment les mêmes résultats.

La Figure 59 montre la comparaison entre la méthode de moyenne mobile et la méthode ondelette multirésolution en superposant les deux courbes pour chaque chambre (PP1 et PP2).

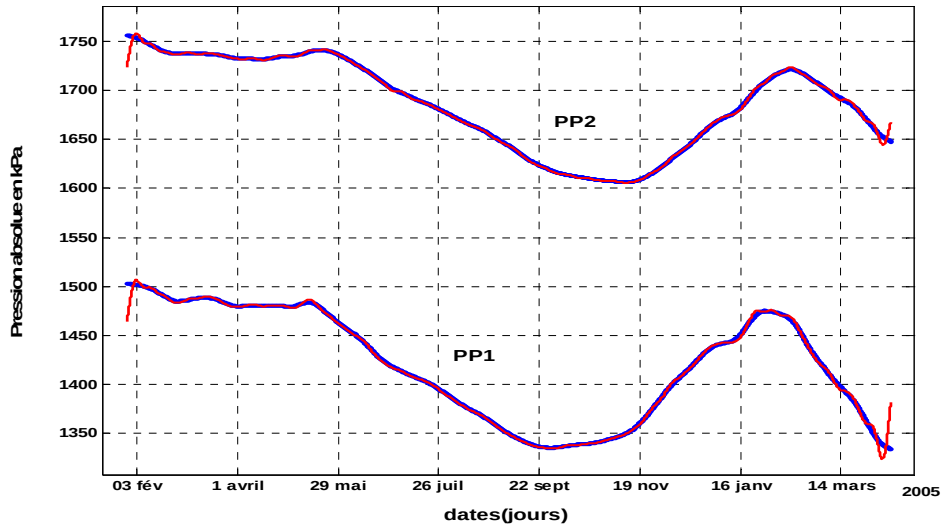



Figure 59: Comparaison entre les courbes obtenues par approximation et par moyennes mobile de pression absolue en kPa dans PP1 et PP2 du 29/01/2004 au 12/04/2005 avec C=5j et $W_t$=6j (durée : 20736 Δt~14mois). L'Approximation est représentée en rouge et la moyenne mobile en bleu.

### *5.3.4.3 Analyse du résidu de pression absolue par Enveloppe (Transformé de Hilbert)*

L'enveloppe de Hilbert du résidu calculée après filtrage par moyenne mobile de pression absolue mesurée dans la chambre PP1 est présentée en Figure 60. La Figure 61 montre l'évolution du résidu calculé par ondelette multirésolution après décomposition de la chronique de pression absolue en approximation. Sur la même figure est tracée l'enveloppe de Hilbert du résidu en question.

L'analyse par enveloppe montre que le résidu calculé par différentes méthodes semble cohérent.

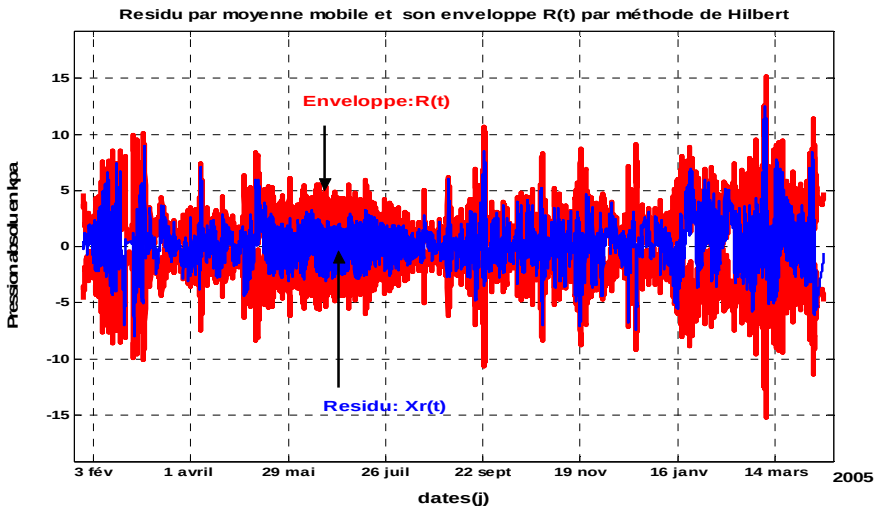



Figure 60: Evolution du résidu Xr(t) de la pression absolue dans PP1 calculé par moyenne mobile et son enveloppe déterminée par la méthode de Hilbert.

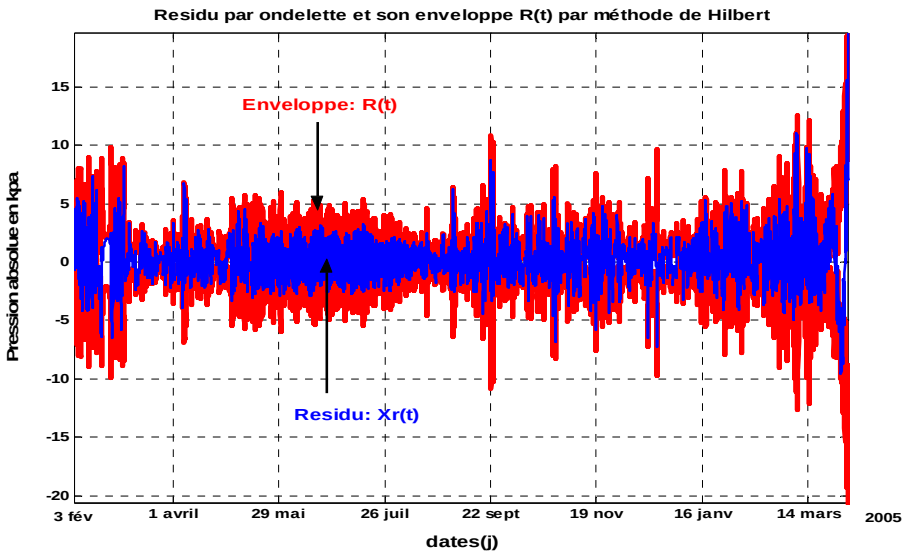



Figure 61: Evolution du résidu Xr(t) de la pression absolue dans PP1 calculée par ondelette et son enveloppe déterminée par la méthode de Hilbert.

#### *5.3.4.4 Analyses des chroniques d'humidité relative et de température du Mont Terri*

Outre les chroniques de pression atmosphérique et de pression interstitielle, nous avons aussi analysé les chroniques d'humidité relative et de température mesurées dans la galerie de sécurité sur une période de trois ans (01/07/2000-19/06/2003) après prétraitement des lacunes. Ces analyses préliminaires sont présentées dans une annexe complémentaire (non incluse). Ces chroniques présentent un problème de seuillage peut-être dû aux instruments de mesures (tensiomètre).

## *5.4 Conclusion Partielle*

Le Tableau 7 montre que les moments du résidu calculés par deux méthodes différentes (Figure 49 et Figure 55) semblent cohérents.

| Moments | Var(X) | Ecart type | moyenne |
|---|---|---|---|
| Résidu calculé par filtrage moyenne mobile | 3.97 | 1.99 ~ 2 | 0 |
| Résidu calculé par ondelette multirésolution | 3.76 | 1.94 ~ 2 | 0.02 |
| Tableau 7: Comparaison des moments pour deux types de résidus. | | | |

Les analyses croisées entre les pressions absolues dans les chambres de mesures PP1 et PP2, montrent une corrélation parfaitement périodique sans effet causal entre les deux paramètres.

Concernant la pression relative, l'idéal serait, dans le futur, de disposer de mesures directes de PREL(t) par des capteurs de pression relative, en sus des capteurs de mesures de PABS(t) et des capteurs de PATM(t). Cela permettrait à l'avenir de disposer d'un meilleur contrôle des trois variables (PABS(t), PATM(t), PREL(t)) du point de vue du traitement des signaux.

Enfin, en ce qui concerne l'analyse spectrale en log-log , le fait que l'on obtienne un exposant de Hurst proche de 1, donc un processus fBm de type 'persistant', semble confirmer l'importance - dans notre signal de durée un an et demi - d'échelles de fluctuations longues, comme déjà remarqué plus haut. Ces fluctuations lentes pourraient être dues à des cycles atmosphériques saisonniers et annuels, mais leur caractère cyclique ne pourra se manifester (le cas échéant) que dans des signaux multi-annuels plus longs que ceux dont nous disposons actuellement.

Dans le futur en essayera d'analyser la relation entre l'humidité, température et l'écartement des fissures dans la galerie de sécurité pour déterminer une éventuelle causalité hydromécanique (air, eau, grains solides).

# 6 *Analyse des effets du creusement de la galerie 1998 du Mont Terri via (capteurs PP1 et PP2)*

Nous étudions maintenant l'évolution des pressions de pore dans les chambres de mesure PP1 et PP2 pendant la période 03/10/97 au 30/06/98, coïncidant au creusement de la galerie 1998 (Ga98). On va chercher, en particulier, à identifier les effets possibles de l'évolution du front d'excavation sur les propriétés du massif.

La Figure 62 montre l'évolution des pressions absolues et relatives pendant la période 03/10/97-30/06/98.

L'excavation a duré 5 mois et 6 jours du 17 novembre 1997 au 23 avril 1998.

On observe une augmentation brutale de pression d'une valeur de 500 kPa pendant le mois de février 1998 sur une durée de 11 Jours. Ensuite la pression se stabilise lentement sans décharge brutale.

La Figure 63 montre l'évolution de la distance entre le front d'excavation de la galerie 98 et la position de la chambre de mesure PP1 du forage BPP-1(excavation partant du nord vers le sud au point métrique ou TM=174.5m d'après la Figure 64 et passant au droit du forage BPP-1 situé à 54.5 m de distance du front nord de l'excavation).

A noter que le passage du front d'excavation à proximité du forage BPP-1 coïncide parfaitement à l'augmentation brutale de la pression dans les chambres PP1 et PP2 Figure 62.

Cette augmentation a été expliquée (Marshall et al, 2004) par une réponse hydromécanique couplée de la formation lors du passage du front d'excavation à proximité des chambres de mesures PP1 et PP2 du forage BPP-1.

L'augmentation est de ce fait plus marquée dans PP1 que dans PP2 eu égard au fait qu'elle est plus proche du front de la galerie.

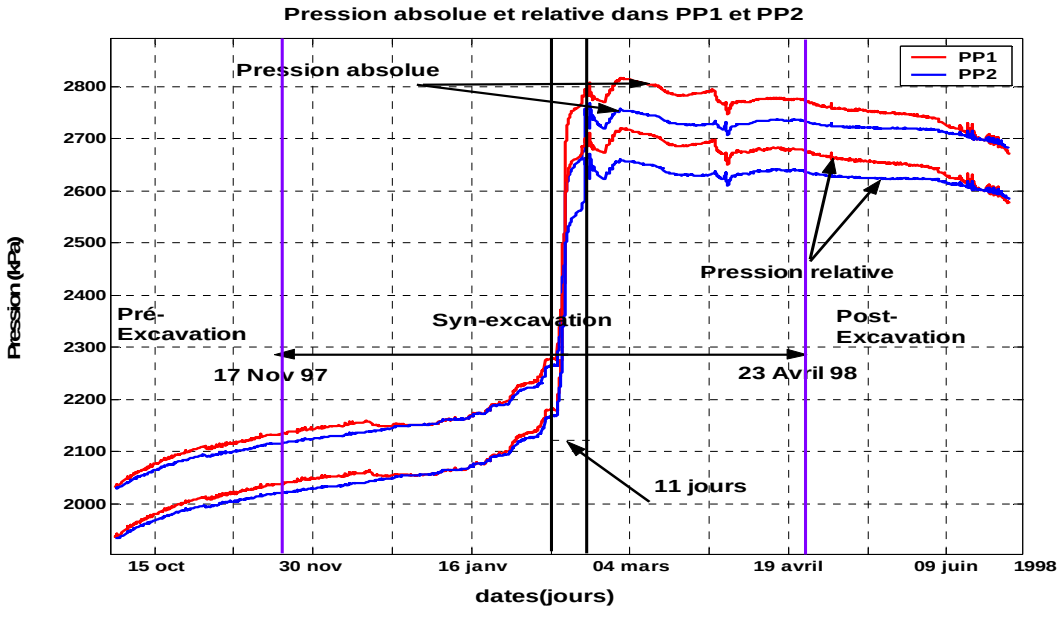



Figure 62: Chronique des pressions absolues et relatives dans les chambres PP1 et PP2 pendant la période d'excavation de la galerie 1998 (03/10/97-30/06/98).

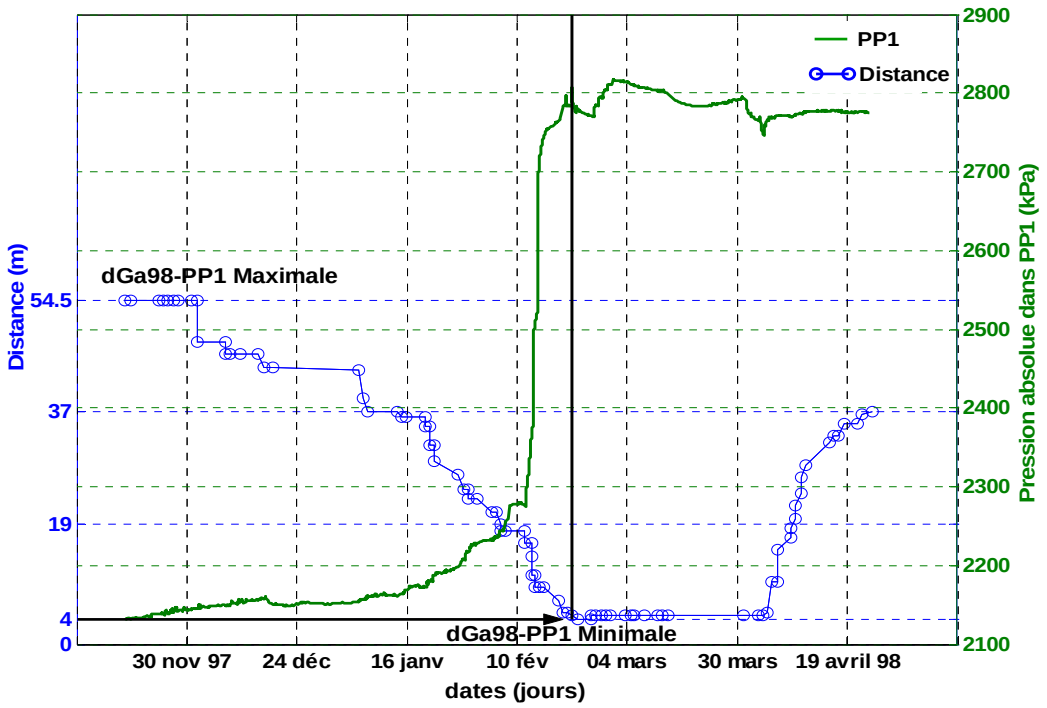



Figure 63: Evolution des distances entre la chambre PP1 et le front d'excavation de la galerie Ga98 en fonction du temps. A noter avec la distance minimale est de 4m.

La Figure 64 montre un schéma 2D de galerie 98 et du forage BPP-1

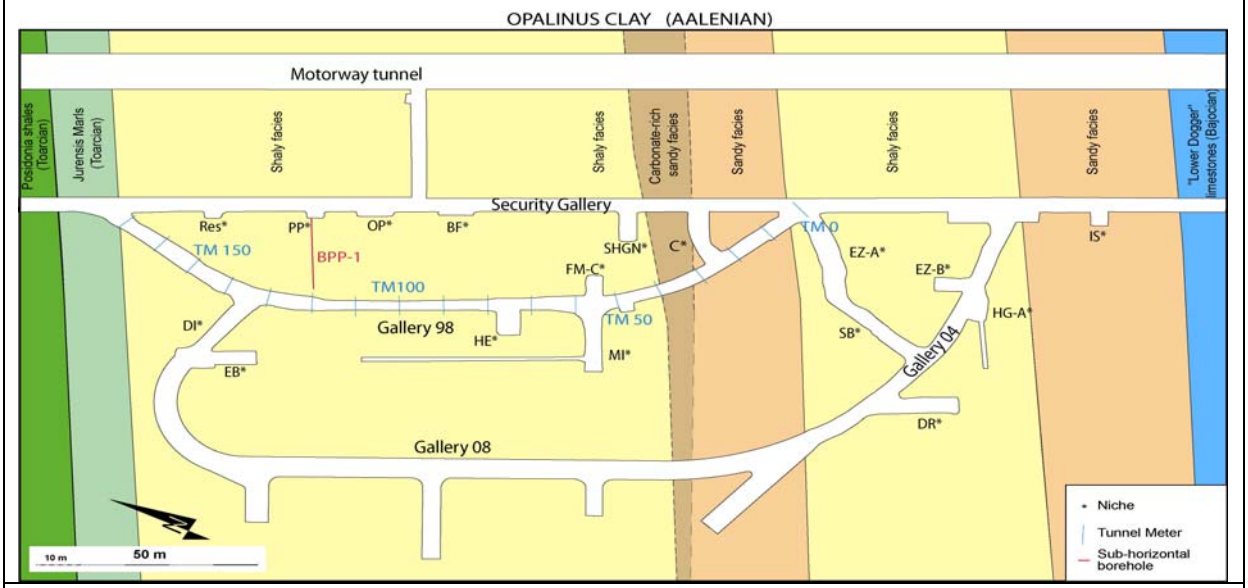



Figure 64 : Plan 2D du laboratoire souterrain de Mont Terri montrant la galerie Ga98 et le forage BPP-1.

Nous allons maintenant étudier séparément, les étapes de pré-excavation, syn-excavation et post-excavation.

## 6.1 *Analyse de l'étape pré-excavation*

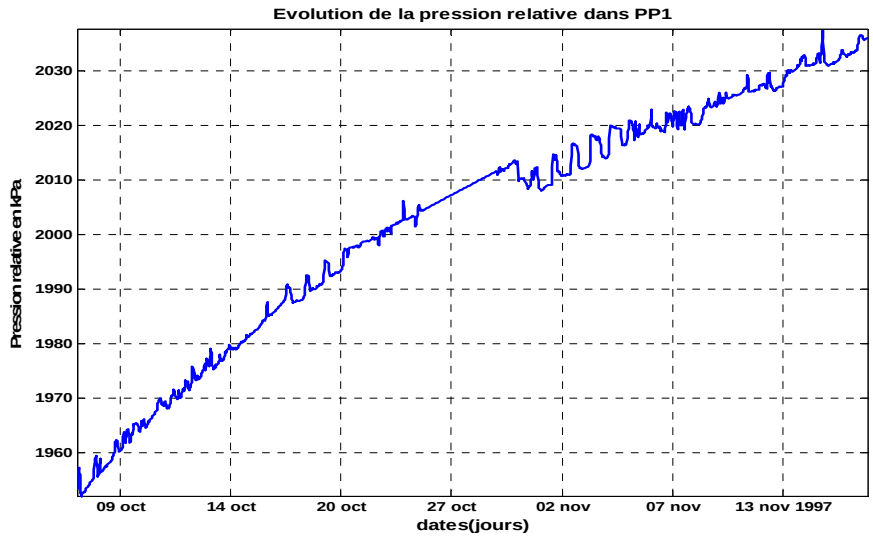



Figure 65: Chronique de pression relative dans PP1 Pré-excavation période (06/10/97-17/11/97).

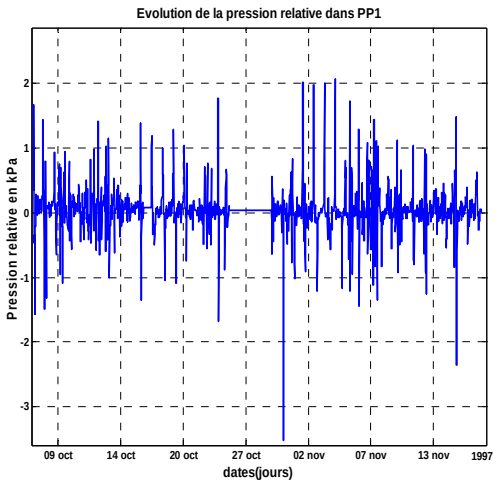



Figure 66: Chronique de pression relative ΔPP1(t) filtrée par différenciation d'ordre 1 dans PP1 Pré-excavation période allant de 06/10/97 au 17/11/97).

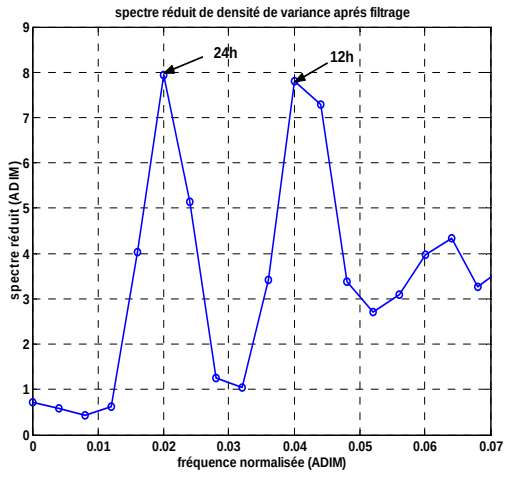



Figure 67: Spectre réduit de pression relative de pore en kPa de ΔPP1(t) Δt=30min. Délai de coupure M=125 pas de temps.

La Figure 65 montre une chronique de pression relative dans PP1 et la Figure 66 son résidu après filtrage par différenciation d'ordre 1, juste avant le démarrage de l'excavation (pré-excavation).

Le spectre réduit de la chronique ΔPP1(t) montre deux pics bien marqués, le pic à 24h dû à l'effet de la pression atmosphérique, (déjà expliqué dans **5.2.2**) et le pic à 12h dû à l'effet de marée terrestre voir Figure 67.

## *6.2 Analyse de l'étape syn-excavation*

### **6.2.1** *Analyse du résidu de pression par filtrage moyenne mobile*

La période qui correspond à l'excavation de la galerie Ga98 (17/11/97-23/04/98), est signalée par une forte non stationnarité, observée sur la courbe de pression relative voir Figure 68. Nous avons effectué une moyenne mobile de demi fenêtre $W_t$=6h sur la chronique de pression relative, puis calculé le résidu de cette chronique afin de rendre le signal stationnaire et les périodicités visibles (Figure 69).

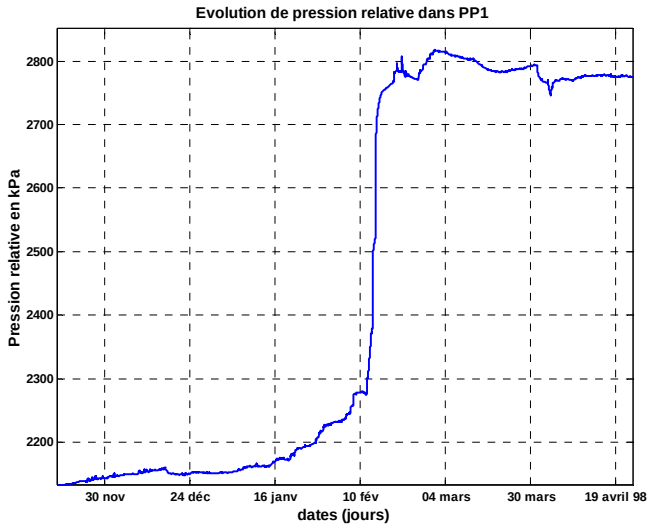



Figure 68: Chronique de pression relative dans PP1, syn-excavation période (17/11/97-23/04/98).

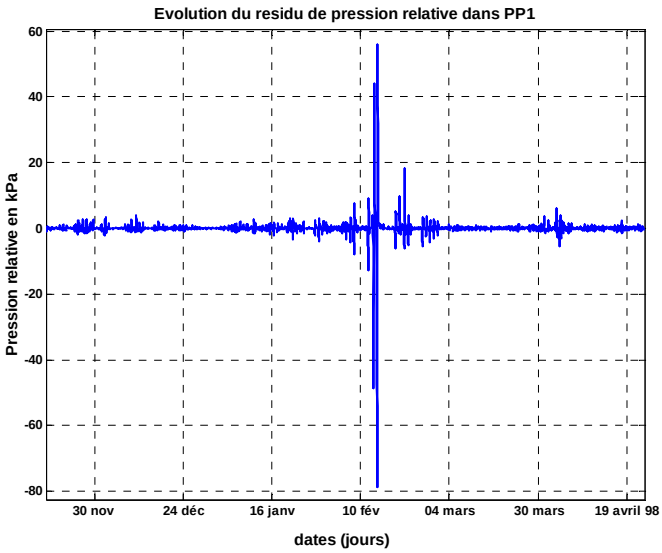



Figure 69: Residu de pression relative dans PP1 obtenue par filtrage moyenne mobile avec une demi-fenêtre de Wt=6h. La période syn-excavation allant du 17/11/97 au 23/04/98.

L'analyse en ondelette continue met en évidence la variabilité temporelle des processus. Dans le scalogramme de la Figure 70, plus la couleur du pixel est claire (ce qui correspond à un point dans le domaine (a,τ)), plus la valeur du coefficient en ondelette $C^{X}_{(a,\tau)}$ est élevée. C'est par exemple pour la période d'excavation de la galerie Ga98 la plus proche de la chambre PP1(4 m) sur 11 jours pendant le mois de février Figure 63.

Nous avons appliqué les analyses corrélatoires et spectrales sur le résidu de pression relative. On observe sur la Figure 71 des pics à 24 h et 12 h, le premier est dû à l'effet de la pression atmosphérique (déjà expliqué dans **5.2.2**), le second est dû à la marée terrestre. On peut conclure au masquage de la marée terrestre lors de l'excavation de la galerie Ga98 mais que celle-ci est toujours présente.

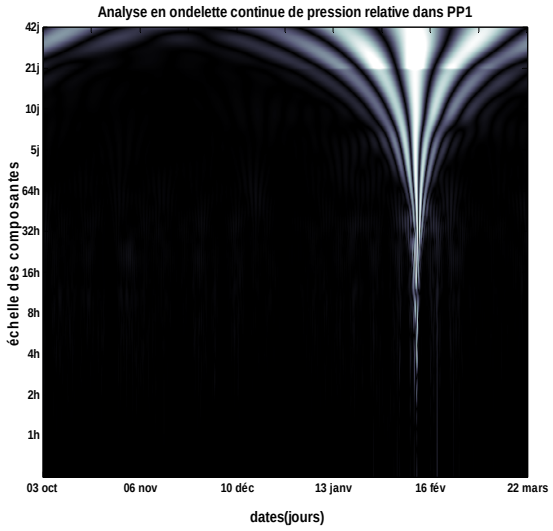



Figure 70: Analyse en ondelettes continue de la pression relative dans PP1, période du 03/10/97 au 30/06/98.

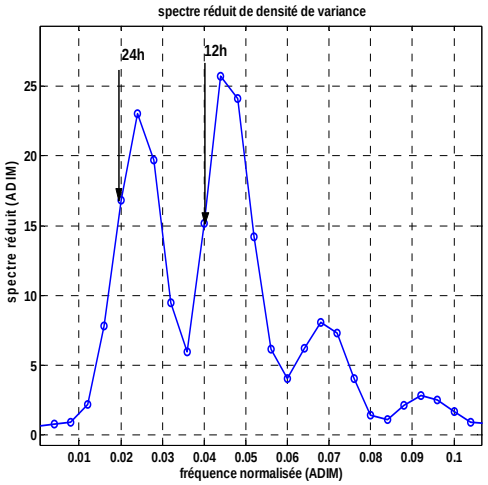



Figure 71: Spectre réduit du residu, filtrage par moyenne mobile de la pression relative de pore en kPa avec Δt=0.5h Délai de coupure M=125 pas de temps.

### 6.2.2 *Analyse du résidu de pression par filtrage différentiel d'ordre 1*

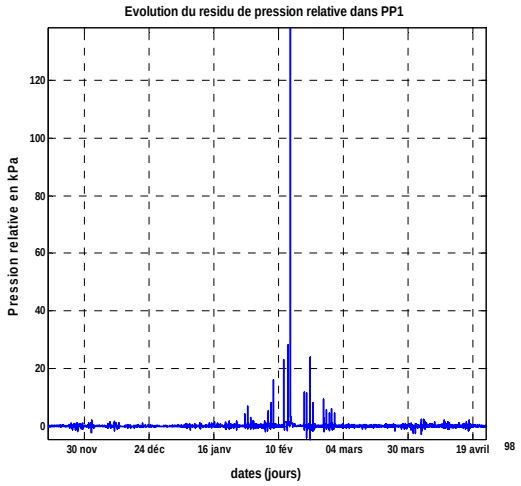



Figure 72: Résidu du filtrage par différenciation d'ordre 1 de la chronique de Prel dans PP1, période syn-excavation allant du 17/11/97 au 23/04/98.

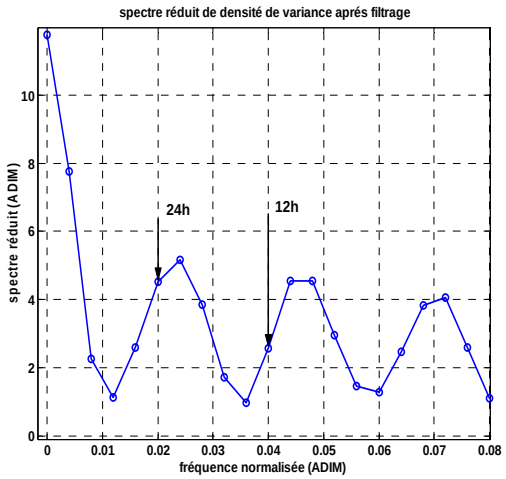



Figure 73: Spectre réduit du résidu, filtrage par différenciation d'ordre 1 de Prel en kPa avec Δt=30min. Délai de coupure M=125 pas de temps.

La Figure 72 montre l'évolution de la pression relative dans PP1 (*en fait son résidu*) pendant l'excavation. Nous avons tracé (Figure 73) le spectre réduit de ΔPP1(t)(chronique de pression relative filtrée par différenciation d'ordre 1). Le spectre montre deux pics 12h et 24h.

### 6.2.3 *Analyse du résidu par décomposition ondelette multirésolution*

La Figure 74 montre l'évolution de résidu de la pression relative dans PP1 pendant l'excavation (le résidu est calculé par ondelette multirésolution avec échelle de coupure 16h). Nous avons tracé le spectre réduit (Figure 75) de ce résidu. Le spectre montre deux pics 12h et 24h mais décalés.

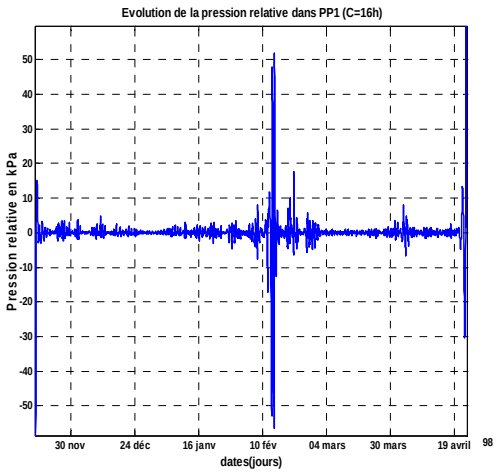



Figure 74: Résidu calculé par ondelette multirésolution, de la chronique de Prel dans PP1, période syn-excavation allant du 17/11/97 au 23/04/98.

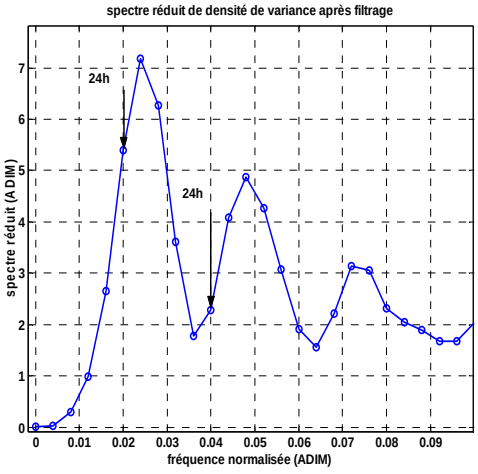



Figure 75: Spectre réduit du residu par ondelette multirésolution de Prel en kPa avec Δt=0.5h . Délai de coupure M=125 pas de temps.(composante de coupure C=5).

Dans les figures 71, 73 et 75, représentant les spectres des résidus de Prel(t) calculés par différents types de filtrages (différentiel, moyenne mobile et ondelette multirésolution), les deux pics 12h et 24h sont décalés d'un pas de temps (0.5h). Cela peut être une cause de masquage de l'effet de marée. La basse fréquence observée $\omega_{Bass}$ dans la figure 73 n'est pas nécessairement une dérive ou « tendance ».

## *6.3 Analyse de l'étape post-excavation*

La Figure 76 montre l'évolution de la pression relative dans PP1 dans une plage de temps coïncidant avec la fin de l'excavation. Nous avons tracé (Figure 77) le spectre réduit de ΔPP1(t)(chronique de pression relative filtrée par différenciation d'ordre 1). Ce spectre montre un pic fort à 24 h dû à l'effet de la pression atmosphérique et un pic à 12 h très faible. Ce dernier est sans doute masqué par le pic de pression atmosphérique à 24h. Ce faible pic à 12h indique malgré tout un effet de marée terrestre. D'autre part le pic à 8h reste inexpliqué. Rappelons de plus qu'il s'agit de la différentielle de la pression (ΔPP1(t)), et non de la pression elle-même.

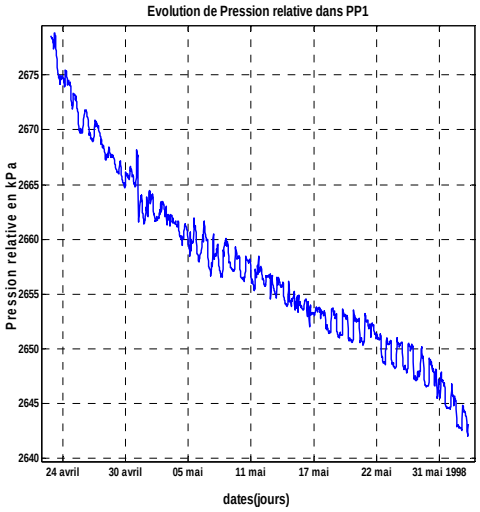



Figure 76: Chronique de pression relative PP1 post-excavation période du 23/04/98 au 31/05/98 avec Δt=0.5h.

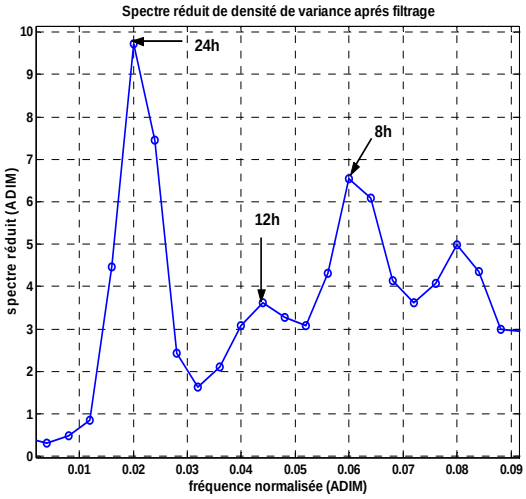



Figure 77: Spectre réduit de pression relative différenciée en kPa, ΔPP1(t) Δt=0.5h. Délai de coupure M=125 pas de temps.

## *6.4 Conclusion partielle*

Grâce aux différents filtrages utilisés (différenciation, moyenne mobile, ondelette) nous avons réussi à mettre en évidence les effets de la marée terrestre sur la pression relative mesurée dans les chambres de mesure PP1 et PP2 du forage BPP-1 et ce, pendant toute la période de creusement de la galerie 1998 (Ga98). Néanmoins lors du passage du front d'excavation à proximité des capteurs, nous avons pu montrer un masquage partiel de la marée terrestre (les pics à 12h et 24h sont décalés), bien que celle-ci soit toujours présente.

Nous avons observé une augmentation brutale de la pression interstitielle dans PP1 et PP2 (500 kPa) lors du passage du front d'excavation à proximité du forage BPP-1.

A la fin de l'excavation, les pressions dans PP1 et PP2 se stabilisent lentement sans décharge brutale. La pression dans la chambre de mesure PP1 finit par se stabiliser à

une valeur un peu plus faible que la pression dans la chambre de mesure PP2. Or la chambre PP1 est plus proche de la galerie 1998 que la chambre PP2 (distances respectives à la paroi de la galerie Ga98 : 4.00m pour PP1 et 5.65m pour PP2). Cela semble donc cohérent ; et l'on peut aussi en conclure que l'excavation n'a pas provoqué de rupture significative ou d'endommagement irréversible, dans le massif, e.g , par couplage hydro-mécanique autour de la galerie.

A noter cependant quelques petites ruptures de pente observées dans le signal de pression pendant l'excavation, particulièrement dans la phase post-excavation (Figure 62, Figure 63). Ces ruptures peuvent traduire le retour à l'équilibre ou bien des perturbations mécaniques.

En ce qui concerne la détermination des paramètres hydrauliques voir ci-après section 8 et suivantes.

# *Partie 4 :*
# *Modèles hydromécaniques poroélastiques :application à la caractérisation des argilites des sites de Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute Marne*

# 7 *Modèles équationnels et paramètres hydro-mécaniques des argilites*

## *7.1 Relations hydromécaniques (contrainte-pression), efficience barométrique (B) en fonction de l'emmagasinement spécifique Ss et de la porosité effective $\phi$*

Dans le schéma ci-dessous, nous utilisons la convention géotechnique (la contrainte $\sigma$ est positive en compression), contrairement au reste du texte (Figure 78).

- On utilisera les hypothèses de compressibilité élastique de la matrice poreuse ($\alpha$) et de l'eau ($\beta$) ;
- Pour la répartition des contraintes et les lois de déformations solide/fluide on adoptera l'hypothèse de Terzaghi (1923).

1) les variations $\delta p_{atm}$ à la surface du sol se traduisent par une variation de $\delta\sigma_{tot}$ qui se transmet au toit de l'aquifère puis à l'aquifère lui même :

$$\delta\sigma_{tot} = \delta p_{atm} \qquad \textbf{(7.1)}$$

2) Modèle de Terzaghi $\Rightarrow \delta\sigma_{tot}$ se repartit en $\delta\sigma_E$ et $\delta p$ où :

$\delta\sigma_E$ =les fluctuations de contrainte effective qui s'exercent sur la matrice solide ;

$\delta p$ =la pression interstitielle absolue dans l'aquifère ;

A l'équilibre **:**

$$\delta\sigma_{tot} = \delta\sigma_E + \delta p \text{ (Géotechnique avec } \sigma>0) \qquad \textbf{(7.2)}$$

Démonstration de l'équation (7.2) :

$$F = F' + \delta p(A - A_c) \qquad \textbf{(7.3)}$$

Divisons par l'aire A :

$$\frac{F}{A} = \frac{F'}{A} + \frac{\delta p(A - A_c)}{A} = \frac{F'}{A} + \delta p(1 - \frac{A_c}{A}) \qquad \textbf{(7.4)}$$

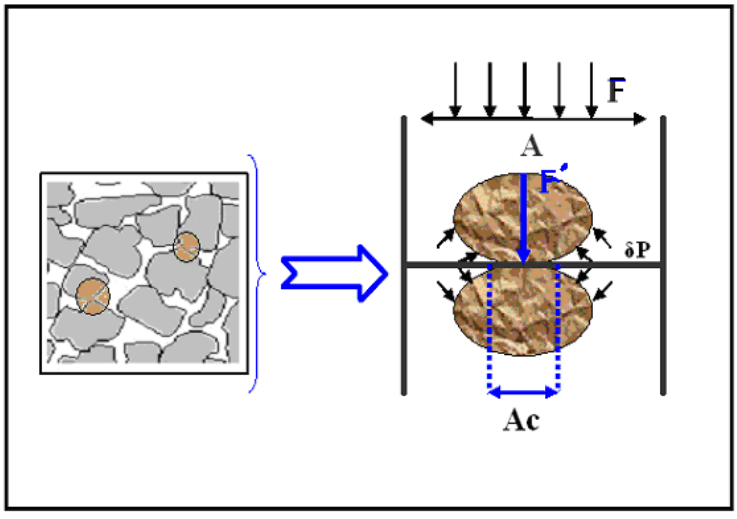



Figure 78: schéma montrant l'effet de la contrainte exercée entre deux grains en contact.

**Avec :**
F= Force normale totale
F'= Force normale inter-granulaire.
$\delta$p= pression interstitielle
A= aire totale.
$A_c$= aire de contact entre les grains.
$\sigma_{tot}$= contrainte totale
$\sigma_E$= contrainte effective

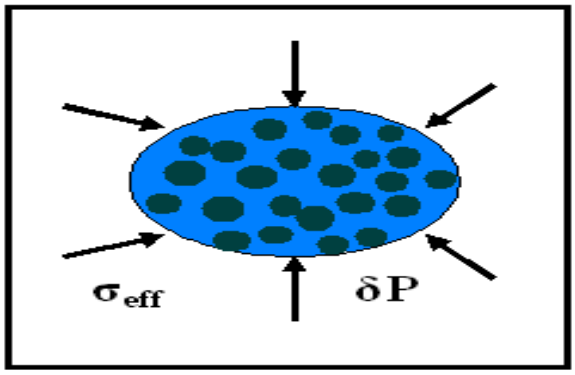



Figure 78a : Schéma à l'échelle mesoscopique d'un V.E.R (Volume Elémentaire Représentatif).

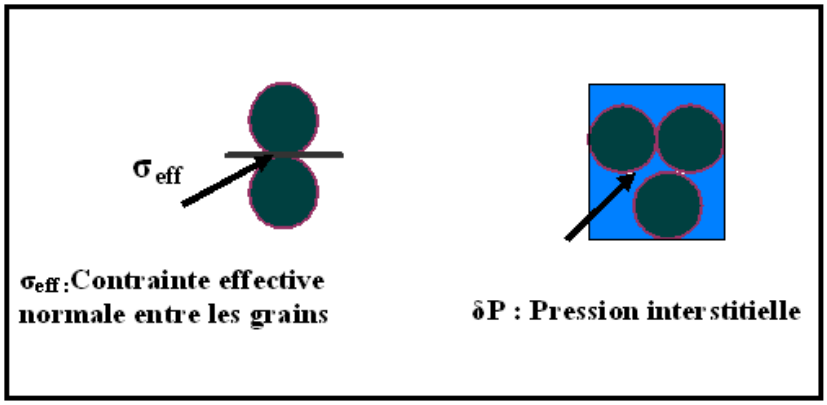



Figure 78b : Schéma à l'échelle microscopique des grains.

Cependant, Ac est très petit devant A, d'où :

$$\frac{A_c}{A} << 1 \rightarrow \frac{F}{A} \approx \frac{F'}{A} + \delta P$$

En identifiant $\sigma_{tot} = F / A$ et $\sigma_E = F' / A$ on obtient donc la relation de Terzaghi :

$$\sigma_{tot} = \sigma_E + \delta p \qquad \textbf{(7.2bis)}^1$$

La pression atmosphérique peut influencer sur un aquifère confiné entouré de deux couches imperméables même sans puits d'observation par la surface de l'aquifère qui est grande.

L'aquifère se dilate avec un transfert d'énergie sans transfert de matière.

[1] La "contrainte effective" est implicitement supposée sphérique, comme la pression dans un fluide. C'est la contrainte normale aux contacts grains-grains, transmise d'un grain à l'autre dans le poreux.
[2] La contrainte totale est la contrainte tout court (contrainte macroscopique s'exerçant sur l'ensemble poreux + eau). Les variations de pression atmosphérique, ou encore le passage d'un train, peuvent faire varier la contrainte totale s'exerçant à la surface du sol par exemple

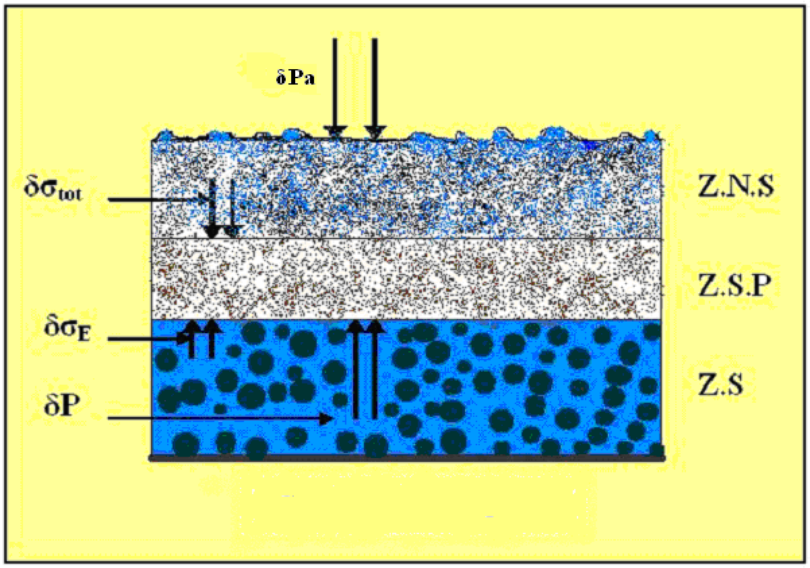



Figure. 78c : Représentation d'un aquifère confiné séparé de la zone supérieure par une couche semi-perméable. Notation :

Z.S. : zone quasi-saturée ; Z.N.S : zone non saturée; Z.S.P : zone semi-permeable (frange capillaire); δPa : pression atmosphérique; δP :pression interstitielle ;$\delta\sigma_{tot}$ :contrainte totale ; $\delta\sigma_E$ :contrainte effective.

A l'équilibre, les variations de niveau d'eau dans le piézomètre vérifient :

$$\delta p_{atm} + \rho g \delta h = \delta P \qquad \textbf{(7.3)}$$

La combinaison des trois équations **7.1, 7.2** et **7.3** donne :

$$\delta\sigma_E = \delta p_{atm} - \delta P = -\rho g \delta h \qquad \textbf{(7.4)}$$

**4)** loi de conservation de masse (Fluide + Solide)

En l'absence de terme source (± q = 0) on a **:**

$$\alpha\delta\sigma_E + \beta\phi\left(-\delta P\right) = \pm q = 0 \qquad \textbf{(7.5)}$$

d'où :

$$-\alpha\rho_w g\delta h - \beta\phi\rho_w g\delta h = \beta\phi\,\delta p_{atm} \qquad \textbf{(7.6)}$$

$$-\rho_w g(\alpha + \beta\phi)\delta h = \beta\phi\,\delta p_{atm} \qquad \textbf{(7.7)}$$

$$\delta h = -\left(\frac{\beta\phi}{\alpha + \beta\phi}\right)\frac{\delta p_{atm}}{\rho_w g} \qquad \textbf{(7.8)}$$

Que l'on peut réécrire sous la forme :

$$\rho_w g\delta h = -B.\delta p_{atm} \qquad \textbf{(7.9)}$$

ou bien encore :

$$\delta P_{rel}(t) = -B.\delta p_{atm}(t) \qquad \textbf{(7.9bis)}$$

où le coefficient barométrique B est donc défini comme un gain

$$B = -\frac{\delta p_{rel}(t)}{\delta p_{atm}(t)} \qquad \textbf{(7.10)}$$

Les relations précédentes (7.8) montrent donc que :

$$B = \frac{\beta\phi}{\alpha + \beta\phi} \quad \textbf{[ADIM]} \qquad \textbf{(7.11)}$$

Que l'on peut mettre sous la forme suivante pour montrer l'influence de la porosité :

$$B = \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha}{\beta\phi}\right)} \qquad \textbf{(7.11bis)}$$

ou encore :

$$B = \frac{\rho_w g \phi}{E_w S_s} \ \textbf{[Pascal/Pascal]} \qquad \textbf{(7.12)}$$

avec :

$$S_s = \rho_w g(\alpha + \phi\beta) \ \textbf{[m}^{\textbf{-1}}\textbf{] ou [m}^{\textbf{3}}\textbf{(eau)/ m}^{\textbf{3}}\textbf{(milieu)/(mδh)]} \qquad \textbf{(7.13)}$$

**et :**

$$\frac{1}{\beta} = E_w \qquad \textbf{[Pa]} \qquad \textbf{(7.14)}$$

En effet $\beta$ est un coefficient de compressibilité et son inverse $E_w$ est un module de raideur ou d'incompressibilité (stiffness).

De même on définit le module $E_{MP}$ (milieu poreux) par des variables de contrainte effective (Terzaghi) :

voir aussi **ANNEXE (4)** 'Modèles et coefficients poro-élastiques'.

$$\frac{1}{\alpha} = +\frac{\delta\sigma_{eff}}{\left(\frac{\delta V_{MP}}{V_{MP}}\right)} = E_{MP} \ \textbf{[Pa]} \qquad \textbf{(7.15)}$$

En conclusion, on voit que la pression atmosphérique a un effet direct sur la pression interstitielle dans un aquifère confiné encadré par deux couches semi-perméables.

On observe généralement des oscillations diurnes et semi-diurnes de la pression atmosphérique liées au réchauffement solaire qui fait fluctuer la densité des diverses couches de l'atmosphère terrestre. La distribution dans l'espace de la pression est très variable et se traduit par des oscillations du niveau d'eau dans un piézomètre[1] implanté dans un aquifère captif (voir plus loin Figure 80).

[1] Il s'agit ici d'un « piézométre » classique, c'est-à-dire perforé ou crépiné sur toute sa longueur et traversant entièrement l'aquifère

On constate un abaissement du niveau piézométrique dans un aquifère captif lors des périodes de hautes pressions atmosphériques et inversement une élévation lors des basses pressions atmosphériques.

Jacob (1940) a introduit la notion d'efficience barométrique B vue plus haut, comme étant le rapport d'une variation δh de niveau piézométrique au toit de l'aquifère captif à la variation $\delta P_a$ de la pression atmosphérique qui en est à l'origine, exprimée aussi en hauteur d'eau équivalente.

Enfin une dernière remarque sur le coefficient barométrique B et porosité Φ.

D'après l'éq.(**7.11bis**), on voit que le coefficient barométrique B augmente avec la porosité Φ ; cependant ceci suppose que le coefficient de compressibilité $\alpha$ de l'aquifère éq. (**7.15**) reste relativement indépendant de Φ.

## *7.2 Observations et aperçu théorique sur la marée terrestre.*

Melchior **(1960)** a conduit certaines investigations sur les fluctuations de marée dans les puits. En 1956 il a étudié les marées terrestres dans un puits de 2000 mètres de profondeur à Turnhout en Belgique, et en source thermale à Kiabukwa. Il a notamment observé :

- des fluctuations de marée à Turnhout avec une amplitude totale de 6 cm.
- des fluctuations de marée à Kiabukwa avec une amplitude totale de 17 cm.

Melchior **(1960)** a ainsi montré **(voir plus loin)** que les fluctuations de marée dans les puits et les mines sont dûes au**x** dilatation**s** de la marée. Il a effectué quelques calculs théoriques sur l'importance de la dilatation grâce à l'analyse harmonique des fluctuations dans la source thermale de Kiabukwa. Il a aussi comparé l'amplitude les ondes des principales composantes de marées à l'amplitude de M2 (la grande onde lunaire semi-diurne). Les rapports d'amplitude pour les ondes les plus grandes conviennent raisonnablement bien.

En 1960, Melchior a également analysé d'autres données obtenues par :

- Robinson et Theis à Carlsbad, Mexique ;
- Robinson à Iowa City, (USA);
- Richardson à Oak Ridge, Tennessee (USA);
- Klonne à Duchov, Tchécoslovaquie.
- Et ses propres donnés à Turnhout (Belgique), et Kiabukwa (Congo Belge).

La comparaison des amplitudes relatives des grandes vagues a montré un accord raisonnable avec les rapports prévus par la théorie d'équilibre. Les études de Melchior indiquent que le puits répond à la dilatation produite par la marée terrestre.

Son analyse est basée sur la représentation de la couche aquifère en tant qu'une cavité finie, une prétention faite précédemment par les géophysiciens Blanchard et Byerly (1935) en considérant les fluctuations dans des puits d'eau provoquées par les dilatations accompagnant quelques vagues sismiques. Melchior (1960), en se basant sur l'analyse de Blanchard et Byerly (1935), a développé le rapport de l'équation (7.1) et a montré la réponse d'un puits d'observation aux marées terrestres.

Son analyse est basée sur la représentation d'un aquifère à cavité finie, sphérique entourée d'une **couche imperméable** et dans lequel on place un puits d'observation (Blanchard et Byerly, 1935).

Ces derniers considèrent des fluctuations de niveau d'eau (H) causées par des phénomènes de compression / dilatation en réponse à des ondes sismiques. Melchior (1960) schématise l'analyse de Blanchard et Byerly (1935), de la manière suivante (Figure 79).

$$\delta H = \frac{\delta V}{\pi r_w^2 + \left( \rho_w g V / E_w \right)} \qquad \textbf{(7.16)}$$

Avec :

$E_w$ le module d'élasticité d'eau [$M/LT^2$] ([I] en unités S.I.) ; $r_w$ le rayon du puits (Well) (L) ; $\rho_W$ la densité de l'eau [$M/L^3$] ;g l'accélération de la gravité [$L/T^2$] ;

$\delta H$ la variation de niveau d'eau causée par le changement de volume $\delta V$ pour une cavité finie de volume V.

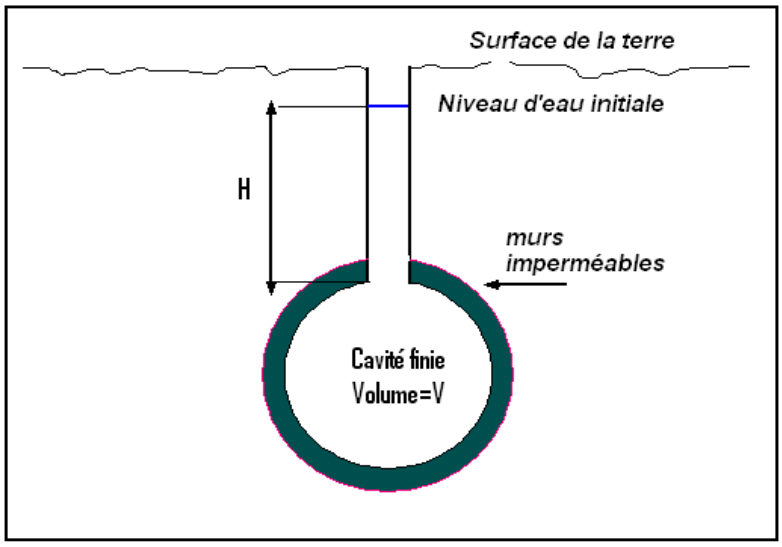



Figure 79 : Représentation idéale d'un puits d'observation permettant l'accès à une cavité finie isolée par une formation semi-perméable.

Réponse pour une cavité finie

Parfois le modèle de cavité finie est une meilleure approximation que le modèle d'aquifère infini. Par exemple, les fluctuations des niveaux d'eau suivant un axe fini dans une mine inondée peuvent probablement être mieux analysées en représentant la mine comme cavité enterrée finie avec des murs imperméables.

La Figure 79 montre un schéma idéal d'une cavité finie, la masse de l'eau dans le système puits rempli + cavité est :

$$M = \rho_w \left( V + \pi r_w^2 H \right) \qquad \textbf{(7.17)}$$

Où M désigne la masse totale dans la cavité et le puits, le changement du volume total de la cavité δV induit un changement de la hauteur du puis δH, avec conservation de la masse, donc si on dérive l'équation (7.17) on trouve :

$$\delta M = 0 = \delta\rho_w\left(V + \pi r_w^2 H\right) + \rho_w\left(\delta V + \pi r_w^2 \delta H\right) \qquad \textbf{(7.18)}$$

La variation de densité est donnée par le comportement élastique (loi de Hooke) du fluide :

$$\delta\rho_w = \delta p\left(\rho_w / E_w\right) \qquad \textbf{(7.19)}$$

Comme $p = \rho_w g H + z + c$ ➔ $\delta p = \rho_w g \delta H$ (à cote z fixée).D'où :

$$\delta\rho_w = \rho_w g \delta H\left(\rho_w / E_w\right) \qquad \textbf{(7.20)}$$

Après substitution dans l'équation (**7.18**) on trouve la formule suivante :

$$-\delta H = \frac{\delta V}{\left(\dfrac{\rho_w g V}{E_w} + \pi r_w^2 + \overbrace{\dfrac{\rho_w g \pi r_w H}{E_w}}^{(a)}\right)} \qquad \textbf{(7.21)}$$

Le terme (a) du dominateur de l'équation (**7.21**) correspond à la variation de la masse de l'eau dans le puits de hauteur H, ce terme est négligé devant le volume de la cavité (en supposant un rayon du puits $r_w$). On obtient alors l'équation (**7.16**) mais avec un signe négatif.

$$-\delta H = \frac{\delta V}{\left(\dfrac{\rho_w g V}{E_w} + \pi r_w^2\right)} \qquad \textbf{(7.22)}$$

$\delta V < 0$ signifie compression. Ici on voit par l'éq. (7.22) que $\delta V < 0 \Rightarrow \delta H > 0$

$\delta V > 0$ signifie dilatation. Ici on voit par l'éq. (7.22) que $\delta V > 0 \Rightarrow \delta H < 0$

L'équation (**7.22**) peut s'exprimer en termes du taux de déformation volumique ε (volumetric strain) adimensionnel :

$$\delta\varepsilon = \frac{\delta V}{V} \qquad \textbf{[m}^3\textbf{/m}^3\textbf{]} \qquad \textbf{(7.23)}$$

$$-\delta H = \frac{\delta\varepsilon}{\left(\left(\dfrac{\rho_w g}{E_w}\right) + \overbrace{\left(\dfrac{\pi r_w^2}{V}\right)}^{(b)}\right)} \qquad \textbf{(7.24)}$$

Dans le terme (b), $\pi r_w^2$ correspond à la variation de volume d'eau dans le puits seul (pour un volume de cavité fixe), ce terme est également négligé par Melchior (1960).

Melchior a précisé que quand le volume V devient de plus en plus grand alors le terme $\pi r_w^2$ a de moins en moins d'importance. On obtient alors l'approximation :

$$\delta H \cong \frac{\delta\varepsilon\, E_w}{\rho_w g} \qquad \textbf{(7.25)}$$

Melchior a employé ce rapport $\delta V/V$ et remarque qu'il coïncide avec la composante lunaire M2 semi-diurne de la marée terrestre.

Marées terrestres (earth tides).

Les mouvements des astres (Terre, Lune / Soleil) provoquent des fluctuations du champ gravimétrique g(t) qui ont comme effets des déformations/déplacements dans le sous-sol (ces marées terrestres ne sont pas directement couplées aux marées océaniques).

Les fluctuations de g(t) induisent des fluctuations du taux de déformation volumique (volumetric strain), par exemple, pour la composante lunaire M2 semi-diurne de la marée :

$\varepsilon(t) = \Delta\varepsilon.\sin(\omega_{M2}t + \varphi)$ Où $\omega_{M2} = 2\pi / T_2 = 2\pi /(12\times 3600)$ en unités S.I. (rad/sec)

Où $\Delta\varepsilon$ désigne l'amplitude de la dilatation « tidale ».

Dans L'annexe 5, on montre les principales composantes de la marée, et une comparaison des amplitudes des différentes composantes de marée diurne et semi-diurne faite par Bredehoeft.

En supposant un module d'Young $E_w$=$2.05\times10^9$ Pascals (environ 23000 bar) et en utilisant l'équation (**7.25**), Melchior a indiqué que la composante lunaire semi-diurne de la marée (lune M2) produit une dilatation avec une amplitude approximativement de $2.10^{-8}$ [$m^3/m^3$]. On s'attendrait à ce que l'amplitude de la fluctuation de niveau d'eau correspondante soit approximativement de 0.4 cm.

La dilatation tidale $\Delta\varepsilon$ est calculée par l'équation ci-dessous :

$$\Delta\varepsilon = 0.5 * \left(\frac{W_2}{ag}\right)$$ (Takeuchi 1950, p 688)

avec :

$W_2$ : potentiel tidal

a : rayon de la terre ($a \approx 6.10^8$ cm)

$w_2/g \approx 10$ cm pour M2 (onde semi-diurne lunaire)

La constante adimensionelle 0.5 est calculée à partir des données de la croûte terrestre calculées par Takeuchi (coefficient de Lamé, nombre de Love).

Melchior a précisé, cependant, que l'amplitude observée des fluctuations de M2 dans les puits pour lesquels il a pris des données est plus près de 2 cm. Cette anomalie entre les amplitudes observées et calculées est entièrement discutée ci-dessous.

Dans une autre étude (Melchior *et al*, 1964) ont fait simultanément les mesures de la gravité et de niveau d'eau dans un puits proche de Basecles (Belgique) entre juin et Novembre 1962. Ces données ont été étudiées par analyse harmonique.

Le rapport de l'amplitude observée des principales ondes a été comparé à l'amplitude du changement de l'accélération de la gravité calculée par la théorie d'équilibre. Ce rapport

est demeuré essentiellement constant, indiquant encore que les fluctuations de marée observées sont produites par la marée terrestre. Une variation dans la phase de 25°a été trouvée entre la dilatation théorique produite par les différentes vagues et les composantes harmoniques réduites à partir des données. Ce déphasage reste difficile à expliquer.

Melchior *et al* (1964) ont comparé l'amplitude de l'onde M2 dans certains puits en ajustant toutes les observations sur une altitude commune à celle de l'équateur. Quand cet ajustement est fait, l'amplitude augmente apparemment avec la profondeur.

D'autre part pour des considérations hydrogéologiques et effets de géométrie des milieux perméables /semi-perméables. Il est commode en hydrologie de penser en terme de deux systèmes idéaux de couche aquifère, (1) système confiné et (2) système non confiné ou de nappe phréatique. Ces deux cas seront détaillés dans les sections ci-après.

### **7.2.1** *Géométrie d'un aquifère confiné (avec piézomètre d'observation).*

Le problème de l'écoulement d'eaux souterraines en couches aquifères confinées est un problème classique en hydrologie comme le système idéal représenté en Figure 80 représentant une couche aquifère encadrée par deux couches semi-perméables.

La pression de l'eau dans l'aquifère est habituellement telle que le niveau d'eau monte au-dessus du toit de l'aquifère si un puits est foré dans ce dernier. La taille d'une colonne liquide, H est simplement suffisante pour équilibrer la pression dans la couche aquifère et est indiquée par H où $P_{fluide}$ est la pression du liquide à la base de la colonne.

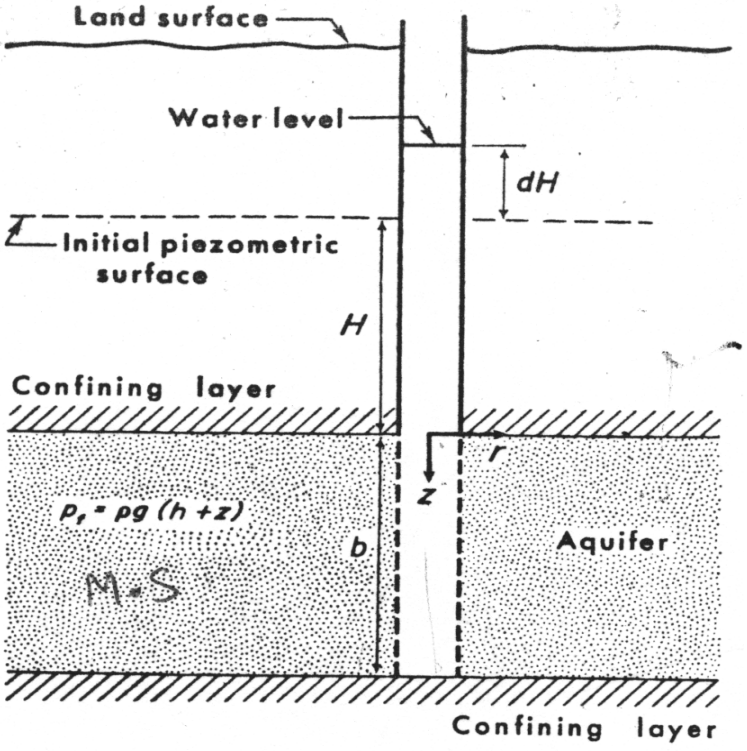



Figure 80: Représentation idéale d'un piézomètre d'observation dans un aquifère confiné (Bredhoeft, 1967).

Pour une aquifère donnée, tout changement de volume dû à la déformation de l'aquifère entraîne un changement du volume d'eau dans les pores. Par conséquent la variation de niveau d'eau est presque égale à celle de l'aquifère divisé par la porosité, $\phi$.

$$-\delta H = -\frac{\delta P}{\rho_w g} = \frac{\delta\varepsilon \times E_w}{\rho_w g} \times \frac{1}{\phi} \qquad \textbf{(7.26)}$$

Avec H positive vers le haut (Figure 80).

Le taux de déformation volumique $\delta\varepsilon$ est défini comme étant la somme des déformations normales.

$$\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \qquad \textbf{(7.27)}$$

Ou en coordonnées sphériques :

$$\varepsilon = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{\varphi\varphi} \qquad \textbf{(7.28)}$$

On suppose souvent pour des problèmes hydrauliques que le forage a un diamètre infinitésimal $r_w$. Quand cette supposition est correcte alors le changement de niveau d'eau dans le forage, $\delta H$ est égal au changement de la pression hydraulique dans l'aquifère $\delta h$.

Quand le forage a un diamètre fini (Cooper *et al*, 1965 ; Bredehoeft *et al*, 1967) alors :

$$-\delta H = -\delta h = -\frac{\delta P}{\rho_w g} = \frac{\delta\varepsilon \times E_w}{\rho_w g} \times \frac{1}{\phi} \qquad \textbf{(7.29)}$$

### **7.2.2** *Géométrie d'un aquifère non confiné (avec piézomètre)*

La Figure 81 montre un système idéal d'un aquifère non confiné avec puits d'observation, ou piézomètre. Dans ce cas, une dilatation de la couche aquifère produit un changement du niveau de la surface libre de l'eau, $\Delta\mathbf{b}$. Pour un diamètre infinitésimal pénétrant dans une couche aquifère isotrope perméable d'étendue verticale limitée, le changement de l'épaisseur de surface de l'eau est lié à la dilatation par :

$$-\frac{\Delta b}{b} = \left(\Delta\varepsilon \middle/ \phi\right) \qquad \textbf{(7.30)}$$

L'équation (**7.30**) implique que, lorsque la mesure d'épaisseur saturée b augmente, Cela induit une augmentation de la variation d'épaisseur $\Delta\mathbf{b}$ de surface libre de l'eau produite par une dilatation donnée $\Delta\varepsilon$.

Pour qu'une fluctuation de marée soit observée dans un système puits / aquifère, qui se comporte approximativement comme l'équation (**7.30**), il faut que la porosité soit faible ou que l'épaisseur soit grande. Si l'on considère une couche aquifère dont l'épaisseur saturée est de 100 mètres, $\mathbf{b = 1\times10^{+4}}$ **cm**. A partir de la marée terrestre, la dilatation $\Delta\varepsilon$ est approximativement de $\mathbf{1\times10^{-8}}$ et (**7.30**) devient :

$$-\Delta b = \left(1.10^{-4} \middle/ \phi\right) \qquad \textbf{(7.31)}$$

La relation (**7.31**) indique que la porosité doit être de l'ordre de $10^{-4}$ pour avoir des fluctuations de marée avec une amplitude de 1 cm. Les fluctuations de marée pour un

puits situé dans la nappe phréatique Oak Ridge, Tennessee (Richardson, 1956), suggèrent que la couche aquifère doit avoir une très faible porosité.

Quand b devient grand ou la perméabilité petite, l'équation (**7.31**) cesse de s'appliquer et le problème doit être traité comme phénomène non stable. Le problème est encore compliqué par le fait que beaucoup de couches aquifères sont stratifiées, ce qui réduit généralement la perméabilité verticale d'une façon significative.

Les modèles confiné et non confiné de couche aquifère détaillé ci-dessus, sont valables seulement dans des conditions naturelles réelles approximatives  En effet La plupart des matériaux terrestres sont perméables, ce qui rend imparfait leur isolement d'un point de vue hydraulique. Cependant, de nombreuses formations géologiques constituées majoritairement d'argile (schistes et argilites), d'évaporites ou de carbonates présentent de très faibles perméabilités et peuvent ainsi fonctionner comme des semi-perméables. Beaucoup de systèmes aquifères se comportent comme un aquifère libre idéalisé par la Figure 81.

La Figure 81 extraite de Freeze & Cherry met en comparaison les deux situations très différentes « confinées » et « libres » Dans les chapitres précédents, l'effet barométrique dans l'argilite a été analysé par l'intermédiaire d'un gain en le supposant implicitement analogue à un aquifère confiné.

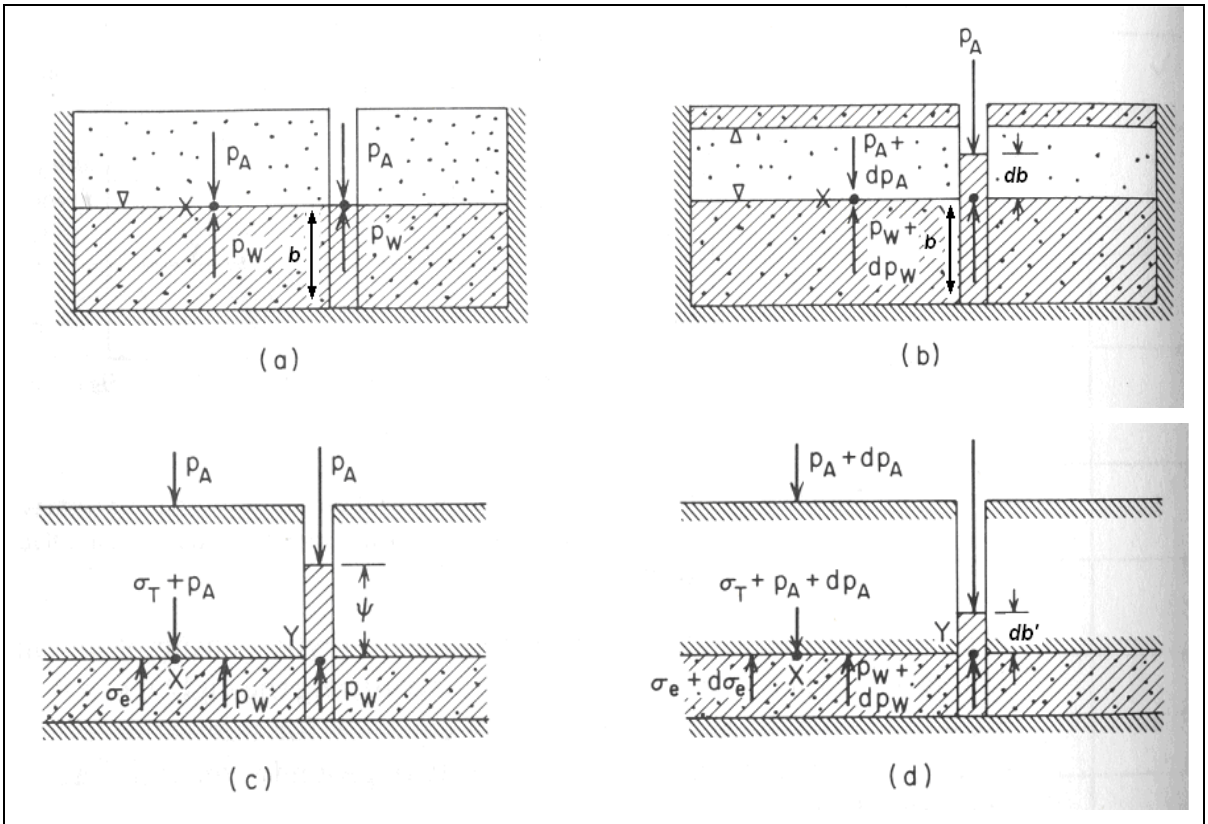



Figure 81 : Représentation idéale d'un piézomètre d'observation dans un aquifère libre (a,b) et confiné (c,d) (Freeze & Cherry 1979).

### **7.2.3** *Conclusions partielles*

La présence des marées terrestres devrait être effective dans la plupart des puits qui pénètrent une couche aquifère confinée et ce, alors que de nombreux facteurs tendent

à réduire leur importance. Par exemple, les puits qui répondent habituellement aux marées terrestres répondent aussi aux tremblements de terre.

Nous avons vu que la dilatation produite par la marée terrestre (**Δε)** est approximativement de l'ordre de $\mathbf{1\times10^{-8}}$ et que les marées terrestres observées en puits ont souvent des grandeurs de l'ordre de 1 à 2 cm. Ce constat nous donne une mesure directe de la sensibilité du système puits/aquifère. En effet, avec un appareil de mesure sensible tel que le sont les capteurs de pression capables de mesurer des variations de niveau d'eau d'un millimètre, il devient possible d'observer des dilatations de la terre de l'ordre de $\mathbf{1\times10^{-9}}$. Ceci indique que le puits artésien est aussi sensible aux contraintes de la croûte (dilatation de la somme des contraintes normales) que le sismomètre de contrainte.

Enfin une remarque sur la dépendance entre la dilatation Δε et les propriétés du massif, sachant que Δε n'est pas seulement un phénomène astronomique mais aussi géomécanique terrestre (ce qui semble avoir été ignoré par Melchior et al.). – R.A.

## *7.3 Coefficient d'emmagasinement spécifique (Ss)*

Dans tout ce qui suit on désigne les taux de dilatation volumique par le terme « dilatation » et la variation temporelle de toute quantité 'X par δX'. Définissons tout d'abord la dilatation totale.

La dilatation volumique totale **(ε)** d'un aquifère confiné saturé est la somme de la dilatation tidale ($\varepsilon_t$) due aux marées terrestres et de la dilatation produite par le changement de pression de fluide ($\varepsilon_h$) :

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_h \qquad \textbf{(7.32)}$$

Nous avons défini précédemment (section **7.1** équation **7.15**), le module de compressibilité d'un squelette solide par :

$$E_{MP} = +\frac{\delta\sigma_{eff}}{\left(\frac{\delta V_{MP}}{V_{MP}}\right)} \qquad \textbf{(7.33)}$$

Et dans le cas d'une contrainte totale $\sigma_{tot}$ constante (éq. **7.2**) on a alors :

$\delta\sigma_{eff} = -\delta P$ (voir aussi éq. **7.4**).

D'où :

$$E_{MP} = -\frac{\delta P}{\left(\frac{\delta V_{MP}}{V_{MP}}\right)} \qquad \textbf{(7.34)}$$

Avec

$$\delta\varepsilon_h = \frac{\delta V_{MP}}{V_{MP}} \qquad \textbf{(7.35)}$$

La dilatation dûe à une variation de pression du fluide ($\delta\varepsilon_h$) est calculée à partir de l'équation (**7.34**) et (**7.35**).

D'où :

$$\delta\varepsilon_h = -\frac{\delta P}{E_{MP}} \qquad \textbf{(7.36)}$$

Où $\delta P$ représente la variation de pression relative définie par :

$$\delta P(t) = \delta Pabs(t) - \delta Patm(t) \qquad \textbf{(7.37)}$$

Et $E_s$ [$M/LT^2$] est le module de compressibilité d'un squelette solide confiné par unité de masse in situ (Jacob 1940). Le module $E_{MP}$ est défini aussi par :

$E_{MP} = \frac{\sigma_{rr}}{\varepsilon_h}$ (si les contraintes normales $\sigma_{\theta\theta}$ et $\sigma_{\varphi\varphi}$ sont nulles).

La dilatation totale **($\varepsilon$)** est reliée à la variation de pression relative $\delta P$ comme montré dans l'équation (**7.26**) plus haut.

$$-\delta H = -\frac{\delta P}{\rho_w g} = \frac{\delta\varepsilon \times E_w}{\rho_w g} \times \frac{1}{\phi} \qquad \textbf{(7.38)}$$

$E_w$ : module d'élasticité de l'eau

En utilisant les équations (**7.32**), (**7.36**) et **(7.38),** nous obtenons :

L'équation (**7.39**) donne par :

$$\delta\varepsilon = -\frac{\phi\delta P}{E_w} \qquad \textbf{(7.39)}$$

L'équation (**7.32**) donne :

$$\delta\varepsilon_t = \delta\varepsilon - \delta\varepsilon_h \qquad \textbf{(7.40)}$$

En remplaçant (**7.36**) et (**7.39**) dans (**7.40**) on obtient :

$$\delta\varepsilon_t = \phi\frac{\delta P}{E_w} + \frac{\delta P}{E_{MP}} \qquad \textbf{(7.41)}$$

Y compris pour un système confiné, on peut écrire, la variation de pression $\delta P$ en terme de variation de hauteur d'eau équivalente $\delta h$ par analogie avec le cas d'une mesure en piézomètre (h représente alors le *niveau* d'eau dans le piézomètre, ou encore la charge hydraulique ou cote piézométrique):

$$\delta P = -\rho_w g \delta h \qquad \textbf{(7.42)}$$

Ceci donne alors la dilatation tidale $\boldsymbol{\varepsilon_t}$ :

$$\delta\varepsilon_t = -\rho_w g\left(\frac{1}{E_{MP}} + \frac{\phi}{E_w}\right)\delta h \qquad \textbf{(7.43)}$$

On peut écrire ceci sous la forme :

$$\boldsymbol{\delta\varepsilon_t = -S_S \delta h} \qquad \textbf{(7.44)}$$

A partir de cette relation, Jacob (1940) et Cooper (1966) déduisent le coefficient d'emmagasinement spécifique ($S_s$) :

$$S_s = \rho_w g\left(\frac{1}{E_{MP}} + \frac{\phi}{E_w}\right) \qquad [1/L] \qquad \textbf{(7.45)}$$

Utilisé dans l'équation de conservation de masse en hydraulique souterraine :

$$\boldsymbol{S_s \frac{\partial h}{\partial t} = -div(\vec{q})} \qquad \textbf{(7.46)}$$

avec

$$\vec{q} = -K\overrightarrow{grad}(H) \;;\; H = h + z \text{ et } h = \frac{p_{eau} - p_{atm}}{\rho g} \;\; z \uparrow \text{vers le haut}$$

Où K désigne la conductivité hydraulique en (m/s).

Cette expression de $S_S$ dans l'équation de conservation de masse fluide est également déduite par Freeze et Cherry (1979), Marsily (1981), et par Ababou (*2007*) à partir de considérations hydromécaniques faisant intervenir la notion de contrainte effective de Terzaghi.

Le coefficient d'emmagasinement spécifique Ss est exprimé en [$m^3/m^3/m$]. En effet, il est défini comme étant la quantité d'eau produite (ou au contraire stockée) par unité de volume total (d'aquifère ou d'espace) et par unité de variation de la charge h :

$$\boldsymbol{S_s = \frac{1}{V_T}\frac{\delta V_{EAU}}{\delta h}} \; [1/L] \qquad \textbf{(7.47)}$$

C'est donc, en résumé, le volume d'eau libéré (« produit ») ou repris (« absorbé ») par unité de volume du milieu poreux saturé et par variation de charge h.

**En résumé**

Le taux de déformation volumique total observé, $\delta\varepsilon$, est la somme de la dilatation dûe au changement de pression du fluide interstitiel ($\delta\varepsilon_h$) avec la dilatation tidale ($\delta\varepsilon_t$) induite par l'onde de marée terrestre. Cette dernière ($\delta\varepsilon_t$) vaut environ $2\times10^{-8}$ $m^3/m^3$ en amplitude, soit environ 20 milliardièmes de dilatation volumique relative.

On sait relier le coefficient d'emmagasinement spécifique Ss à l'amplitude des fluctuations piézométriques δh(t) et à celle de la dilatation **(tidale)** $\delta\varepsilon_t(t)$ par l'équation (7.48).

Si l'on accepte l'estimation proposée à priori pour $\delta\varepsilon_t$ (amplitude $\approx 2\times10^{-8}$ $m^3/m^3$), il suffit alors d'estimer l'amplitude du signal observé δh(t) pour en déduire finalement $S_s$, selon le principe de la formule de Bredhoeft (1967) :

$$S_s = \frac{Amplitude(\delta\varepsilon_t)}{Amplitude(\delta h)} \; [1/L] \qquad \textbf{(7.48)}$$

Cette relation nous servira à calculer l'emmagasinement spécifique à partir de l'analyse ondelettes multirésolution des séries chronologiques de pression atmosphérique et de pressions interstitielles dans les forages, sachant que la charge hydraulique (cote piézométrique) δh(t) est proportionnelle, par définition, à la pression relative (Prel(t)=Pabs(t)-Patm(t)).

Nous avons aussi calculé l'emmagasinement spécifique et d'autres cœfficients mécaniques (coefficient de Biot, Skempton,….) en utilisant le modèle poro-élastique de Biot voir (**annexe 4**).

## *7.4 Synthèses des paramètres hydrauliques et pétrophysiques obtenus dans la littérature (revue)*

Le Tableau 8 montre les valeurs des différents paramètres hydrauliques et pétrophysiques obtenus par ailleurs dans l'argilite.

<table>
<tr><td colspan="4">Données de référence obtenues au Mont Terri avec définitions utilisées (et référence au forage)</td></tr>
<tr><td>Ss ($m^{-1}$) d'après Marshall et al. (2004)</td><td colspan="3">$\Phi$ (%) d'après Pearson et al. (2003)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">$1.8\ 10^{-6}$ et $9.6\ 10^{-6}$<br>Tests hydrauliques dans les forages BDB-1, BDB-2 et BDB-3 qui se trouvent dans les mêmes faciès argileux que BPP-1.</td><td>Porosité totale (physique estimée par mesure des teneurs en eau) :</td><td>Porosité par injection de Hg (proche de porosité totale)</td><td>Porosité accessible aux Chlorures obtenues par diffusion radiale*</td></tr>
<tr><td>16 – 24</td><td>21 – 24.7</td><td>9.5-13</td></tr>
<tr><td colspan="4">Tableau 8 : Synthèse des différentes porosités déterminées au Mont Terri dans le faciès argileux de l'Argile à Opalines.<br>* La porosité « chlorure » est plus basse en grandeur du fait de la répulsion anionique existant à la surface des minéraux argileux chargés négativement.</td></tr>
</table>

# 8 Caractérisation hydraulique par les chroniques de pression prétraitées ou non (Mont Terri)

L'analyse des chroniques permet dans certains cas de déterminer certains paramètres hydrauliques (emmagasinement spécifique, porosité effective) autrement que par essais hydrauliques.

Nous avons utilisé des modèles simplifiés, introduits au chapitre précédent (Modèles équationnels et paramètres hydromécaniques des argilites) déjà appliqués aux données du site de Tournemire (Fatmi *et al* 2004).

## *8.1 Caractérisation hydraulique par les chroniques prétraitées*

### **8.1.1** *Emmagasinement spécifique.*

Le coefficient d'emmagasinement spécifique *(quantité d'eau emmagasinée par unité de volume d'un aquifère)* peut se calculer à partir de la formule de Bredehoeft (1967) qui prend en compte l'effet de la marée terrestre. La formule étant :

$$S_s = \Delta\varepsilon \times \frac{1}{\Delta H}[1/L] \qquad \textbf{(8.1)}$$

Avec Ss: emmagasinement spécifique, Δε le coefficient de dilatation cubique induit par l'onde semi-diurne, ($\Delta\varepsilon = 2\times10^{-8}$ ),selon Melchior, 1960) et ΔH la variation liée à la marée (m).

L'analyse multirésolution permet d'isoler la composante semi-diurne pour en déterminer l'amplitude (ΔH).

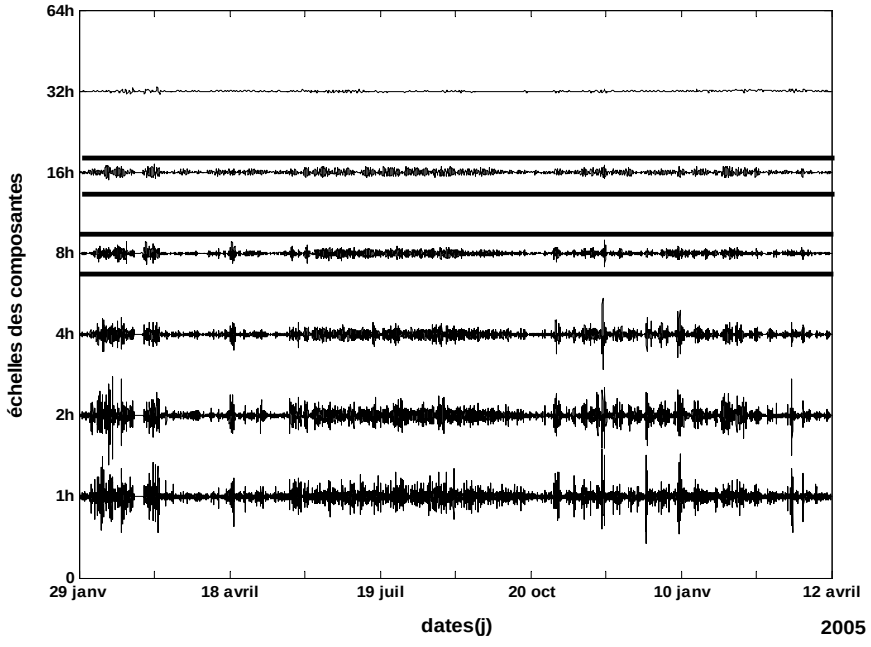



Figure 82: Analyse multirésolution de la pression relative du pore dans PP1 entre 29/01/04 et 12/04/05 Avec un pas de temps Δt=30min, k=1 .

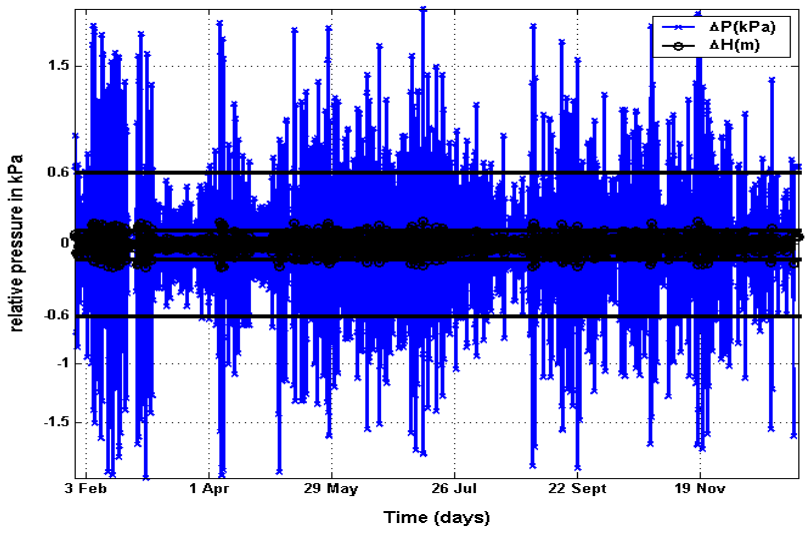



Figure 83: Analyse multirésolution de la composante 12h entre 29/01/04 et 12/04/05 avec Δt=30min de la pression relative du pore dans PP1 k=1, ΔH=0.06m.

Nous disposons de deux composantes également proches de l'échelle 12h :

- Echelle de composante 8h ;
- Echelle de composante 16h ;

Jusqu'ici nous avons choisi d'interpréter le signal de pression relative afin d'obtenir l'amplitude des fluctuations qui nous permet de calculer l'emmagasinement spécifique (Ss). L'estimation de Ss est effectuée à partir de l'amplitude de la composante à 8h. La raison de ce choix est que les fluctuations de la composante 8h sont plus cohérentes que celles de 12h. Pour plus d'explications sur le choix de la composante voir plus loin (figure 84).

La Figure 82 montre l'évolution des composantes en fonction du temps et en échelle, le but est d'isoler la composante semi-diurne dûe à l'effet de marée terrestre attribuée à la composante 8h.

La Figure 83 montre l'évolution de cette composante. Pour déterminer l'amplitude des fluctuations de cette composante il existe plusieurs critères synthétisés dans le Tableau 9.

| | |
|---|---|
| Norme $L_p$ : | $\sigma_{(p)} = \left( \frac{1}{N} \sum \left| X(i) - \overline{X} \right|^p \right)^{1/p}$ |
| Norme $L_{-1}$<br>Moyenne harmonique des écarts | $\sigma_{(-1)} = \left( \frac{1}{N} \sum \left| X(i) - \overline{X} \right|^{-1} \right)^{-1}$ |
| Norme $L_0$<br>Moyenne géométrique des écarts | $\sigma_{(0)} = \lim_{p \to 0} \left( \frac{1}{N} \sum \left| X(i) - \overline{X} \right|^p \right)^{1/p}$ |
| Norme $L_1$ :<br>Moyenne absolu des écarts | $\sigma^{(1)} = \left( \frac{1}{N} \sum \left| X(i) - \overline{X} \right| \right)$ |
| Norme $L_2$ :<br>écart type | $\sigma^{(2)} = \sqrt{\left( \frac{1}{N} \sum \left( X(i) - \overline{X} \right)^2 \right)}$ |
| Norme $L_\infty$ :<br>Maximum de l'écart absolu | $\sigma^{(\infty)} = \lim_{p \to \infty} \left( \frac{1}{N} \sum \left| X(i) - \overline{X} \right|^p \right)^{1/p} \approx \underset{(i)}{Max} \left| X(i) - \overline{X} \right|$ |
| Tableau 9 : Synthèse des normes utilisées pour la détermination de l'amplitude des fluctuations de la composante 12 h. | |

Nous avons choisi le critère intermédiaire de norme L1 car la meilleure approximation pour l'amplitude (Valeur absolue de La déviation moyenne des fluctuations maximales de cette composante). Dans la Figure 83 $\Delta H$ vaut 0.06m ce qui nous permet de calculer la valeur de l'emmagasinement spécifique en appliquant l'équation (**8.1**), on trouve $3.3 \times 10^{-7} m^{-1}$.

Nous avons appliqué cette méthode aux différentes périodes pour les sections de mesure PP1 et PP2, les Tableaux **10** et **11** montrent une synthèse des valeurs d'amplitudes et d'emmagasinements spécifiques associés.

N.B :

La composante encadrée signifie la moyenne globale des fluctuations des composantes 8h et 16h.

| La section de mesure PP1 | ΔH(m) Calcul avec Norme 1 | | | Emmagasinement spécifique $S_s(m^{-1})$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Composantes dyadiques | **C=8h** | **C=12h±4 h Encadrée** | **C=16h** | **C=8h** | **C=12h±4 h Encadrée** | **(C=16h)** |
| Période (02/04/1997-07/08/1997) | **0.070** | **0.089** | **0.166** | **$2.90\times10^{-7}$** | **$2.25\times10^{-7}$** | **$1.20\times10^{-7}$** |
| Période Pré-excavation Ga98 (06/10/1997-17/11/1998) | **0.080** | **0.069** | **0.121** | **$2.50\times10^{-7}$** | **$2.88\times10^{-7}$** | **$1.65\times10^{-7}$** |
| Période Syn-excavation Ga98 (17/11/1997-23/04/1998) | **0.120** | **0.138** | **0.251** | **$1.66\times10^{-7}$** | **$1.45\times10^{-7}$** | **$7.97\times10^{-8}$** |
| Période Post-excavation Ga98 (23/04/1997-31/05/1998) | **0.048** | **0.051** | **0.092** | **$4.20\times10^{-7}$** | **$3.95\times10^{-7}$** | **$2.18\times10^{-7}$** |
| Période (07/03/1999-06/04/1999) | **0.090** | **0.079** | **0.143** | **$2.16\times10^{-7}$** | **$2.53\times10^{-7}$** | **$1.39\times10^{-7}$** |
| Période (11/04/2000 06/06/2000) | **0.076** | **0.075** | **0.132** | **$2.62\times10^{-7}$** | **$2.67\times10^{-7}$** | **$1.51\times10^{-7}$** |
| Période (15/11/2000-07/05/2001) | **0.064** | **0.058** | **0.101** | **$3.14\times10^{-7}$** | **$3.45\times10^{-7}$** | **$1.98\times10^{-7}$** |
| Période (27/02/2002 - 24/01/2003) | **0.074** | **0.071** | **0.130** | **$2.71\times10^{-7}$** | **$2.81\times10^{-7}$** | **$1.53\times10^{-7}$** |
| Période (03/07/2003-07/10/2003) | **0.010** | **0.107** | **0.210** | **$2.01\times10^{-7}$** | **$1.86\times10^{-7}$** | **$9.52\times10^{-8}$** |
| Période (29/01/2004-12/04/2005) | **0.070** | **0.078** | **0.145** | **$2.84\times10^{-7}$** | **$2.56\times10^{-7}$** | **$1.37\times10^{-7}$** |

Tableau 10: Valeurs des emmagasinements spécifiques estimées pour différentes périodes dans la section de mesure PP1.

| La section de mesure PP2 | ΔH(m) Calcul avec Norme 1 | | | Emmagasinement spécifique $S_s(m^{-1})$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Composantes dyadiques | **C=8h** | **C=12h±4h Encadrée** | **C=16h** | **C=8h** | **C=12h±4h Encadrée** | **C=16h** |
| Période (02/04/1997-07/08/1997) | ****** | ****** | ****** | ******* | ****** | ******* |
| Période Pré-excavation Ga98 (03/10/1997-17/11/1997) | **0.042** | **0.052** | **0.092** | **$4.72\times10^{-7}$** | **$3.82\times10^{-7}$** | **$2.18\times10^{-7}$** |
| Période Syn-excavation Ga98 (17/11/1997-22/04/1998) | **0.100** | **0.139** | **0.248** | **$1.9\times10^{-7}$** | $1.43\times10^{-7}$ | **$8.05\times10^{-8}$** |
| Période Post-excavation Ga98 (22/04/1998-30/06/1998) | **0.052** | **0.041** | **0.061** | **$3.8\times10^{-7}$** | **$4.93\times10^{-7}$** | **$3.28\times10^{-7}$** |
| Période (01/04/1999-30/05/1999) | **0.032** | **0.034** | **0.060** | **$6.17\times10^{-7}$** | **$5.96\times10^{-7}$** | **$3.34\times10^{-7}$** |
| Période (16/11/1999-28/03/2000) | **0.055** | **0.046** | **0.076** | **$3.66\times10^{-7}$** | **$4.39\times10^{-7}$** | **$2.61\times10^{-7}$** |
| Période (28/09/2000 29/05/2001) | **0.057** | **0.050** | **0.085** | **$3.5\times10^{-7}$** | **$3.99\times10^{-7}$** | **$2.34\times10^{-7}$** |
| Période (06/03/2002-10/02/2003) | **0.054** | **0.053** | **0.097** | **$3.7\times10^{-7}$** | **$3.77\times10^{-7}$** | **$2.05\times10^{-7}$** |
| Période (03/07/2003-07/10/2003) | **0.067** | **0.071** | **0.136** | **$2.96\times10^{-7}$** | **$2.80\times10^{-7}$** | **$1.47\times10^{-7}$** |
| Période (07/11/2003-21/05/2005) | **0.060** | **0.061** | **0.112** | **$3.38\times10^{-7}$** | **$3.26\times10^{-7}$** | **$1.78\times10^{-7}$** |

Tableau 11: Valeurs des emmagasinements spécifiques estimées pour différentes périodes dans la section de mesure PP2.

La Figure 84 montre l'évolution pour différentes périodes de l'emmagasinement spécifique $S_s$ dans la chambre PP1.

On remarque que la composante choisie précédemment pour calculer l'emmagasinement spécifique (composante 8h) donne les valeurs d'emmagasinement spécifique les plus proches de celles obtenues à partir de la composante semi-diurne (12h).

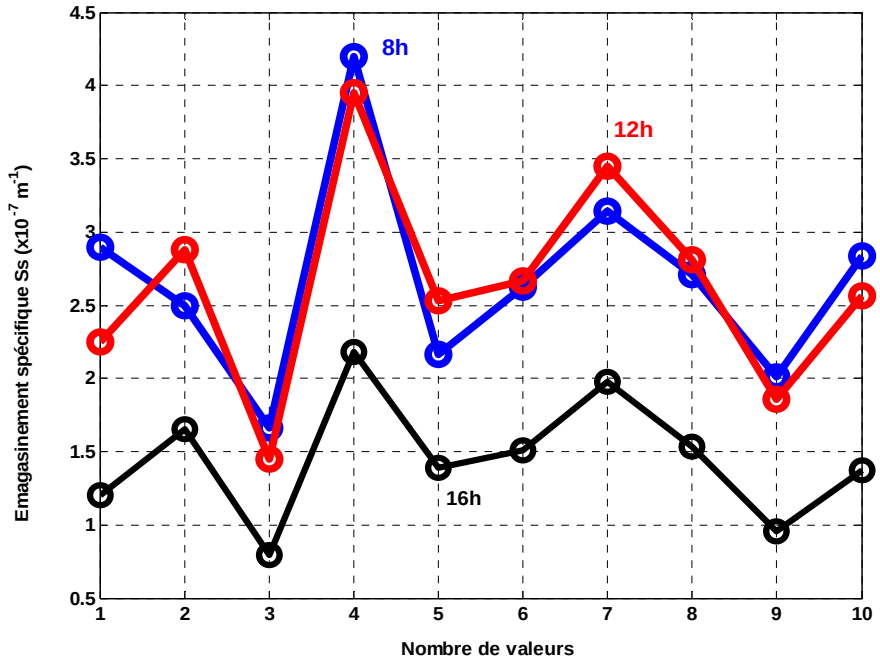



Figure 84 : Courbes d'emmagasinements spécifiques calculés par analyse du signal correspondant à trois composantes dyadiques 8h, 12h et 16h dans la section de mesure PP1.

On remarquera que les valeurs d'emmagasinement spécifique Ss calculées pour les chambres de mesure PP1 et PP2 sont globalement à un ordre de grandeur inferieure aux valeurs déduites des tests hydrauliques (Tableau 8).

### 8.1.2 *Porosité effective.*

La porosité effective (Porosité dynamique) est définie comme étant le rapport entre le volume de pore interconnecté (les pores dans lesquels l'eau est mobile) et le volume total.

Les composantes diurnes et hebdomadaires auraient pour origine l'effet de pression barométrique. Or, l'effet de la pression sur les aquifères captifs qui se traduit par l'efficience barométrique B, permet de calculer la porosité effective, d'après la formule de (Jacob, 1940).

$$\phi_{eff} = \frac{E_w \times S_s \times B}{\rho \times g} \qquad \textbf{(8.2)}$$

avec $\phi$eff la porosité effective(%), B l'efficience barométrique qui exprime la réponse élastique du système, $\rho$ la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur ($\rho \times g$=9800 kN/m$^3$) et $E_w$ le module d'élasticité de l'eau $2.05 \times 10^9$ Pa.

Afin de calculer la porosité, une analyse croisée de la relation pression atmosphérique avec la pression relative a été établie, au pas de 30 minutes, pour déterminer le gain d'un effet du à la pression barométrique.

Pour calculer la porosité nous avons effectué des analyses croisées entre la pression atmosphérique et la pression relative mesurées dans les deux chambres PP1 et PP2. La

fonction de gain est utilisée pour déterminer l'efficience barométrique B (Figure 85). L'emmagasinement spécifique utilisé et celui calculé par la composante 8h (Tableaux **10** et **11**).

Nous avons appliqué ces méthodes aux différentes périodes pour les chambres PP1 et PP2. Les résultats sont reportés dans les tableaux 12 et 13 :

| La section de mesure PP1 | Efficience Barométrique B (ADIM) | Porosité effective $\phi_{eff}$ (%) | | |
|---|---|---|---|---|
| Composantes dyadiques | B calcule pour 24 h | **C=8h** | **C=12h±4h Encadrée** | **(C=16h)** |
| Période (02/04/1997-07/08/1997) | **0.110** | **0.68** | **0.53** | **0.28** |
| Période Pré-excavation Ga98 (06/10/1997-17/11/1998) | **0.080** | **0.43** | **0.49** | **0.28** |
| Période Syn-excavation Ga98 (17/11/1997-23/04/1998) | **0.002** | **0.007** | **0.006** | **0.0037** |
| Période Post-excavation Ga98 (23/04/1997-31/05/1998) | **0.520** | **4.60** | **4.34** | **2.39** |
| Période (07/03/1999-06/04/1999) | **0.620** | **2.80** | **3.30** | **1.82** |
| Période (11/04/2000 06/06/2000) | **0.465** | **2.56** | **2.60** | **1.47** |
| Période (15/11/2000-07/05/2001) | **0.622** | **0.42** | **0.46** | **0.26** |
| Période (27/02/2002 - 24/01/2003) | **0.177** | **1.01** | **1.04** | **0.57** |
| Période (03/07/2003-07/10/2003) | **0.282** | **1.20** | **1.1** | **0.56** |
| Période (29/01/2004-12/04/2005) | **0.154** | **0.91** | **0.82** | **0.44** |

Tableau 12: Valeurs des porosités effectives calculées pour la section de mesure PP1.

| La section de mesure PP2 | Efficience Barométrique B (ADIM) | Porosité effective $\phi_{eff}$ (%) | | |
|---|---|---|---|---|
| Composantes dyadiques | B calculé pour 24 h | **C=8h** | **C=12h±4h Encadrée** | **(C=16h)** |
| Période (02/04/1997-07/08/1997) | ****** | ******* | | |
| Période Pré-excavation Ga98 (03/10/1997-17/11/1998) | **0.140** | **1.40** | **1.12** | **0.64** |
| Période Syn-excavation Ga98 (17/11/1997-22/04/1998) | **0.007** | **0.02** | **0.022** | **0.01** |
| Période Post-excavation Ga98 (22/04/1998-30/06/1998) | **0.090** | **0.72** | **0.93** | **0.62** |
| Période (01/04/1999-30/05/1999) | **0.340** | **4.46** | **4.30** | **2.41** |
| Période (16/11/1999-28/03/2000) | **0.030** | **0.27** | **0.33** | **0.196** |
| Période (28/09/2000-29/05/2001) | **0.080** | **0.60** | **0.69** | **0.40** |
| Période (06/03/2002-10/02/2003) | **0.110** | **0.84** | **0.86** | **0.47** |
| Période (03/07/2003-07/10/2003) | **0.420** | **2.65** | **2.50** | **1.31** |
| Période (07/11/2003-21/05/2005) | **0.094** | **0.66** | **0.64** | **0.35** |

Tableau 13: Valeurs des porosités effectives calculées pour la section de mesure PP2.

La Figure 85 montre un exemple de la fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative associée, mesurées dans la section PP1, on déduit la valeur du gain qui vaut 0.177, qui sera utilisé pour le calcul de la porosité effective.

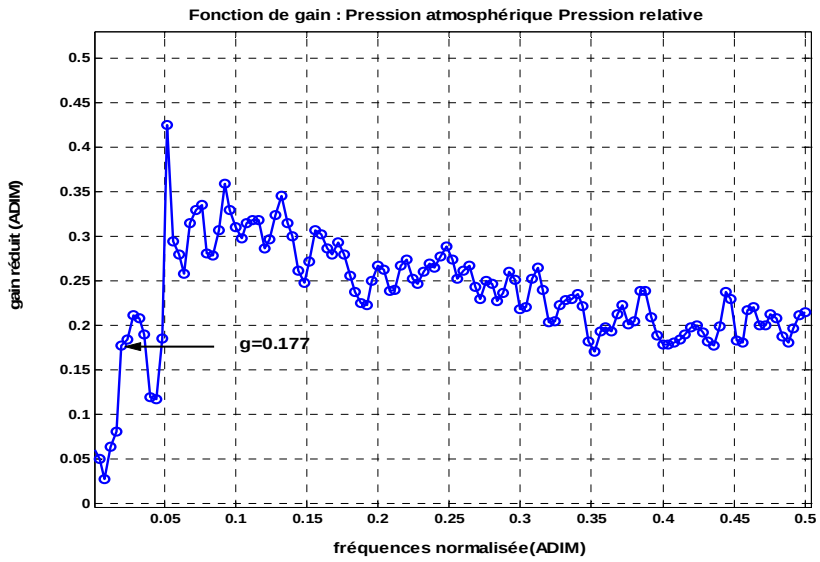



Figure 85: Fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative dans PP1 période allant du 27/02/2002 au 24/01/2003.

## *8.1 Caractérisation hydraulique par les chroniques non prétraitées*

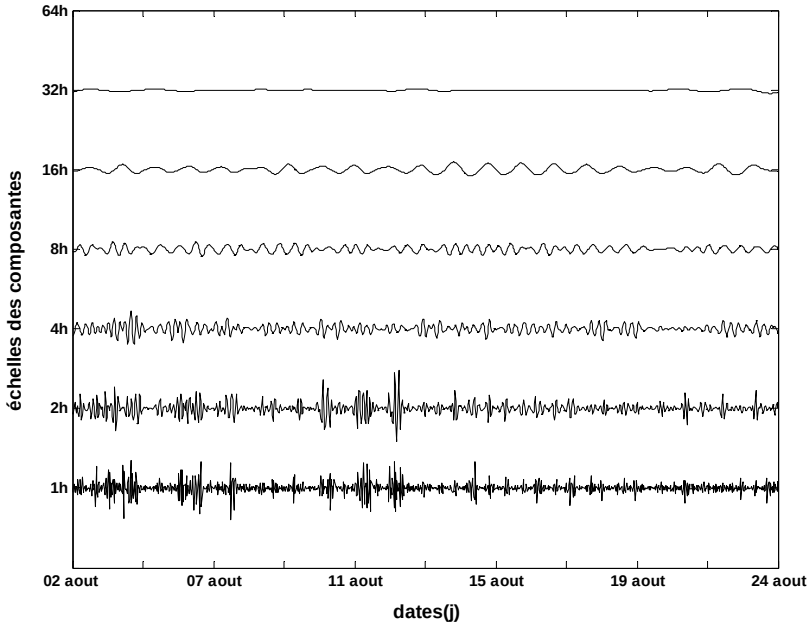



Figure 86: Analyse multirésolution de la pression relative du pore dans PP1 entre 02/08/02 et 24/08/02 Avec un pas de temps Δt=30min, k=1.

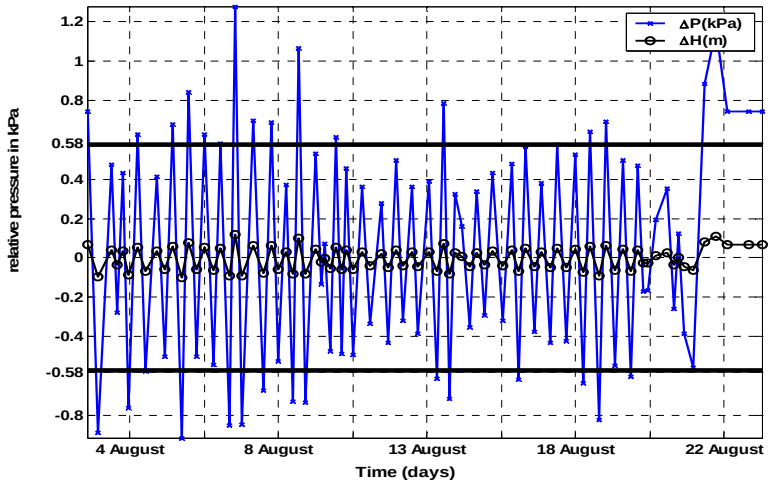



Figure 87: Analyse multirésolution de la composante 8h entre 02/08/02 et 22/08/02 avec Δt=30min de la pression relative du pore dans PP1, ΔH=0.058m.

Nous avons utilisé les mêmes méthodes appliquées ci-dessus. On obtient alors un coefficient d'emmagasinement spécifique de $3.4\times10^{-7}m^{-1}$ dans le cas d'une chronique d'échelle mensuelle (non prétraitée) (Figure 86 et Figure 87).

Il s'agit d'un coefficient d'emmagasinement faible et qui traduit l'existence d'un aquifère captif (confiné).

Les valeurs de porosité efficace présentées dans les tableaux 9 et 10 sur chroniques prétraitées et l'analyse effectuée sur données non prétraitées montrent des valeurs estimées très inférieures (d'un à deux ordres de grandeur) aux valeurs de porosité obtenues par mesures pétrophysiques ou par diffusion radiale. On remarque également une très forte réduction de la porosité efficace en période de syn-excavation. Passée cette phase, les valeurs de porosité efficace semblent retrouver leur valeur initiale.

## *8.2 Caractérisation par modèle poro-élastique de Biot*

Dans cette section nous proposons une estimation de Ss basée sur les relations entre paramètres hydro-mécaniques développés ainsi on a:

$$S_S = \rho g \left( \frac{1}{K_b} + \phi \frac{1}{K_f} \right) \qquad \textbf{(8.3)}$$

avec :

$\nu_d$=0.27 (coefficient de poisson drainé, note technique 2003-03 table 9 page 26)

$\nu_{nd}$=0.33 (coefficient de poisson non drainé, note technique 2003-03 table 9 page 26)

$K_u=2.74*10^9$ Pa (Module d'incompressibilité non drainé Paul Bossart) ;
Ed $=1.2*10^9$ Pa (Module de Young drainé, note technique 2003-03 table 9 page 26)
$\lambda=8.94*10^8$ Pa (Coefficient de Lamé calculé, $\lambda=Ed*\nu_d/(1-\nu_d)(\nu_d+1)$ ;
$\mu=4.72*10^8$ Pa (Coefficient de Lamé calculé, $\mu=Ed/2(\nu_d+1)$ ) ;
$K_b=1.81*10^9$ Pa (Module d'incompressibilité drainé) ;
$Eu=2.8*10^9$ Pa (Module de Young non drainé, Paul Bossart) ;

Ew=2.05∗$10^9$Pa (Module d'élasticité de l'eau équivalant à $K_f$ ).
Sachant que le Module d'incompressibilité « drainé », $K_b$ est calculé par l'équation :

$$K_b = \frac{3\lambda + 2\mu}{2} \text{ [Pa]}$$

Terminologie :

- Les modules drainés (« drained ») sont soit marqués par l'indice « d», soit non marqués (exemple : Kb est un module 'drainé').
- Les modules non drainés (« undrained ») sont marqués par l'indice « u » pour 'undrained') (exemple : Ku, Eu,…..).

*Relation entre modules d'incompressibilité (Ks) (Kb) drainé, et (Ku) non drainé.*
A partir des équations **(3.29; 3.30 et 3.36)** (**annexe 4**) nous avons :

$$K_u = K_b + \left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right)^2 \times \frac{1}{\left(\frac{\beta - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f}\right)} \qquad \textbf{(8.4)}$$

Ce qui donne

$$K_u = K_b \left[1 + \left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right)^2 \times \left[K_b \left(\frac{1 - \frac{K_b}{K_s} - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f}\right)\right]^{-1}\right] \qquad \textbf{(8.5)}$$

Ou encore :

$$K_u = K_b \left[1 + \left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right)^2 \times \left[\frac{K_b}{K_s}\left(1 - \frac{K_b}{K_s} - \phi + K_s \times \frac{\phi}{K_f}\right)\right]^{-1}\right] \qquad \textbf{(8.6)}$$

$$K_u = K_b \left[1 + \left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right)^2 \times \left[\frac{K_b}{K_s}\left(\left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right) + \phi\left(\frac{K_s}{K_f} - 1\right)\right)\right]^{-1}\right] \qquad \textbf{(8.7)}$$

Finalement :

$$K_u = K_b \left[1 + \left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right)^2 \times \left[\frac{K_b}{K_s}\left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right) + \phi\left(\frac{K_b}{K_f} - \frac{K_b}{K_s}\right)\right]^{-1}\right] \qquad \textbf{(8.8)}$$

A partir de l'équation **(8.8)** on déduit la valeur de Ks en écrivant l'équation **(8.8)** sous la forme d'une équation de deuxième degré comme suivant :

$$K_u = K_b \left[1 + \left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right)^2 \times \left[\frac{K_b}{K_s}\left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right) + \phi\left(\frac{K_b}{K_f} - \frac{K_b}{K_s}\right)\right]^{-1}\right] \qquad \textbf{(8.9)}$$

En insérant dans (8.9) la relation $\boldsymbol{\beta = 1 - \frac{K_b}{K_s}} \Rightarrow \boldsymbol{\frac{K_b}{K_s} = 1 - \beta}$ , on obtient :

$$\beta^2 \frac{K_u}{K_b} + \beta\left[(\phi - 1)\left(\frac{K_u}{K_b} - 1\right)\right] - \phi\left(\frac{K_u}{K_f} - \frac{K_b}{K_f}\right) = 0 \qquad \textbf{(8.10)}$$

ou encore :

$$\beta^2 + \beta\left[(\phi - 1)\left(1 - \frac{K_b}{K_u}\right)\right] - \phi\left(\frac{K_b}{K_f} - \frac{K_b^{\,2}}{K_f K_u}\right) = 0 \qquad \textbf{(8.11)}$$

On a:

$$\beta = 1 - \frac{K_b}{K_s} \qquad \textbf{(8.12)}$$

$$b = \left(1 - \frac{K_b}{K_u}\right)(\phi - 1) \qquad \textbf{(8.13)}$$

$$c = -\phi\left(\frac{K_b}{K_f} - \frac{K_b^{\,2}}{K_u K_f}\right) \qquad \textbf{(8.14)}$$

$$\beta^2 + \beta b - c = 0 \qquad \textbf{(8.15)}$$

Connaissant les valeurs de $K_b$ $K_u$ $\phi$ et $K_f$.(voir plus haut), en déduit la valeur du coefficient de Biot ß (éq. 8.15) et le module de Biot G (éq. 8.16) ensuite le coefficient de Skempton $B_s$ (éq. 8.17).

Après résolution de l'équation (**8.15**) on trouve finalement les résultats suivants :

avec une porosité dynamique de $\phi$=4.34% et les autres paramètres sont situés ci-dessus.
$\beta_1$=-0.0361 (Coefficient de Biot) solution écartée.

$\beta_2$=0.36 (Coefficient de Biot) solution physique ($\beta$=0.36 ca confirme 0<$\beta$<1)

A partir de cette valeur en déduit la valeur de Ks :

Ks=2.83*$10^9$ Pa (ca confirme Ks>Kb) module d'incompressibilité des grains solides)

Ensuite en déduit le module de Biot à partir de l'équation :

$$\boldsymbol{G = \left(\frac{\beta - \Phi}{K_s} + \frac{\Phi}{K_f}\right)^{-1}} \text{ [Pa]} \qquad \textbf{(8.16)}$$

G=7.52*$10^9$ [Pa] ou encore G=7.52GPa

Et le coefficient de Skempton Bs à partir de l'équation :

$$B_s = \left(\frac{G\beta}{K_b + \beta^2 G}\right) \qquad \textbf{(8.17)}$$

Bs=0.97 (cela confirme bien Bs $\leq$1)

Les tableaux 14 et 15 montrent les valeurs des emmagasinements spécifiques obtenus à partir du modèle poroélastique de Biot bien plus proches de ceux déterminés par tests hydrauliques que ceux obtenus par interprétation des fluctuations de pression à travers, notamment, la formule de Bredehoeft (1967).

| La section de mesure PP1 | Porosité dynamique $\phi$(%) | | | Emmagasinement spécifique estimation hydro-mécanique $S_s(m^{-1})$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Composantes dyadiques | **C=8h** | **C=12h±4h Encadrée** | **C=16h** | **C=8h** | **C=12h±4h Encadrée** | **(C=16h)** |
| Période (02/04/1997-07/08/1997) | **0.68** | **0.53** | **0.28** | **$5.72\times10^{-6}$** | **$5.65\times10^{-6}$** | **$5.53\times10^{-6}$** |
| Période Pré-excavation Ga98 (06/10/1997-17/11/1998) | **0.43** | **0.49** | **0.28** | **$5.60\times10^{-6}$** | **$5.63\times10^{-6}$** | **$5.53\times10^{-6}$** |
| Période Syn-excavation Ga98 (17/11/1997-23/04/1998) | **0.0077** | **0.006** | **0.0037** | **$5.40\times10^{-6}$** | **$5.40\times10^{-6}$** | **$5.40\times10^{-6}$** |
| Période Post-excavation Ga98 (23/04/1997-31/05/1998) | **4.61** | **4.34** | **2.39** | **$5.62\times10^{-6}$** | **$5.60\times10^{-6}$** | **$5.51\times10^{-6}$** |
| Période (07/03/1999-06/04/1999) | **2.8** | **3.30** | **1.82** | **$5.53\times10^{-6}$** | **$5.55\times10^{-6}$** | **$5.48\times10^{-6}$** |
| Période (11/04/2000 06/06/2000) | **2.56** | **2.60** | **1.47** | **$5.52\times10^{-6}$** | **$5.52\times10^{-6}$** | **$5.47\times10^{-6}$** |
| Période (15/11/2000-07/05/2001) | **0.42** | **0.46** | **0.26** | **$5.42\times10^{-6}$** | **$5.42\times10^{-6}$** | **$5.41\times10^{-6}$** |
| Période (27/02/2002 - 24/01/2003) | **1.01** | **1.04** | **0.57** | **$5.45\times10^{-6}$** | **$5.45\times10^{-6}$** | **$5.42\times10^{-6}$** |
| Période (03/07/2003-07/10/2003) | **1.19** | **1.10** | **0.56** | **$5.45\times10^{-6}$** | **$5.45\times10^{-6}$** | **$5.66\times10^{-6}$** |
| Période (29/01/2004-12/04/2005) | **0.91** | **0.82** | **0.44** | **$5.83\times10^{-6}$** | **$5.72\times10^{-6}$** | **$5.61\times10^{-6}$** |

Tableau 14: Valeurs des emmagasinements spécifiques et de porosité dynamique déterminées à partir du modèle poroélastique de Biot pour la section de mesure PP1.

| La section de mesure PP2 | Porosité dynamique $\phi$(%) | | | Emmagasinement spécifique estimation hydro-mécanique $S_s(m^{-1})$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Composantes dyadiques | **C=8h** | **C=12h±4h Encadrée** | **C=16h** | **C=8h** | **C=12h±4h Encadrée** | **C=16h** |
| Période (02/04/1997-07/08/1997) | ****** | ****** | ****** | ******* | ****** | ******* |
| Période Pré-excavation Ga98 (03/10/1997-17/11/1997) | **1.4%** | **1.12%** | **0.64%** | **$5.46\times10^{-6}$** | **$5.45\times10^{-6}$** | **$5.43\times10^{-6}$** |
| Période Syn-excavation Ga98 (17/11/1997-22/04/1998) | **0.02%** | **0.022%** | **0.01%** | **$5.40\times10^{-6}$** | $5.40\times$**$10^{-6}$** | **$5.40\times10^{-6}$** |
| Période Post-excavation Ga98 (22/04/1998-30/06/1998) | **0.72%** | **0.93%** | **0.62%** | **$5.43\times10^{-6}$** | **$5.44\times10^{-6}$** | **$5.43\times10^{-6}$** |
| Période (01/04/1999-30/05/1999) | **4.46%** | **4.30%** | **2.41%** | **$5.61\times10^{-6}$** | **$5.60\times10^{-6}$** | **$5.51\times10^{-6}$** |
| Période (16/11/1999-28/03/2000) | **0.27%** | **0.33%** | **0.196%** | **$5.41\times10^{-6}$** | **$5.41\times10^{-6}$** | **$5.41\times10^{-6}$** |
| Période (28/09/2000 29/05/2001) | **0.60%** | **0.69%** | **0.40%** | **$5.43\times10^{-6}$** | **$5.43\times10^{-6}$** | **$5.42\times10^{-6}$** |
| Période (06/03/2002-10/02/2003) | **0.84** | **0.86** | **0.47%** | **$5.44\times10^{-6}$** | **$5.44\times10^{-6}$** | **$5.42\times10^{-6}$** |
| Période (03/07/2003-07/10/2003) | **2.65%** | **2.50%** | **1.31** | **$5.52\times10^{-6}$** | **$5.52\times10^{-6}$** | **$5.46\times10^{-6}$** |
| Période (07/11/2003-21/05/2005) | **0.66%** | **0.64%** | **0.35%** | **$5.43\times10^{-6}$** | **$5.43\times10^{-6}$** | **$5.41\times10^{-6}$** |

Tableau 15 : Valeurs des emmagasinements spécifiques et de porosité dynamique déterminées à partir du modèle poroélastique de Biot pour la section de mesure PP2.

## *8.3 Conclusion Partielle*

Les résultats montrent que la formation d'argile à Opalines se comporte comme une formation partiellement captive. Grâce à cette propriété de confinement, il a été possible de déterminer certains paramètres hydrauliques : le coefficient d'emmagasinement spécifique $S_s$ et la porosité effective.

La porosité effective a été estimée par la méthode d'analyse des signaux de pression interstitielle mesurée dans le forage BPP-1 et de la pression atmosphérique mesurée dans la galerie de sécurité du site de Mont Terri. Les valeurs obtenues sont sensiblement inférieures à celles estimées par les méthodes pétrophysiques et par diffusion radiale de chlorure pour l'Argile à Opalines (Pearson et al., 2003). On note une très forte diminution de porosité en phase de syn-excavation puis un retour aux valeurs initiales juste après le passage du front au droit des capteurs.

Deux méthodes ont été appliquées pour calculer les emmagasinements spécifiques. La premier, qui passe par l'analyse des fluctuations de pression et la formule de Bredehoeft (1967) (éq. 7.26, 7.29 et 8.1) donne des valeurs systématiquement inférieures d'un ordre de grandeur à celles obtenues à partir du modèle poroélastique de Biot. Cette seconde méthode donne des résultats qui coïncident parfaitement aux valeurs références du Mont Terri (Marshall *et al,* 2004). Cependant, il faut noter que plusieurs paramètres issus de la littérature ont été utilisés pour obtenir ces résultats (données d'origines divers). Obtenues par essais hydrauliques, c'est-à-dire entre $2.10^{-6}$ et $9.10^{-6}$ $m^{-1}$. Comme pour la porosité effective, on note une légère diminution de l'emmagasinement spécifique lors du passage du front d'excavation au droit des capteurs puis un retour aux valeurs initiales non perturbées.

En conclusion, le passage de l'excavation à proximité de la section de mesure PP1, ainsi que sur PP2 un peu plus éloigné, provoque un changement des paramètres hydrauliques (Ss et la porosité effective). La coïncidence de la diminution de l'emmagasinement spécifique et de la porosité effective avec le passage du front d'excavation peut expliquer également la forte augmentation de pression interstitielle enregistrée lors de cette période par simple réduction de la porosité. On met ainsi en évidence un couplage hydro-mécanique lié aux contraintes appliquées par la machine de forage.

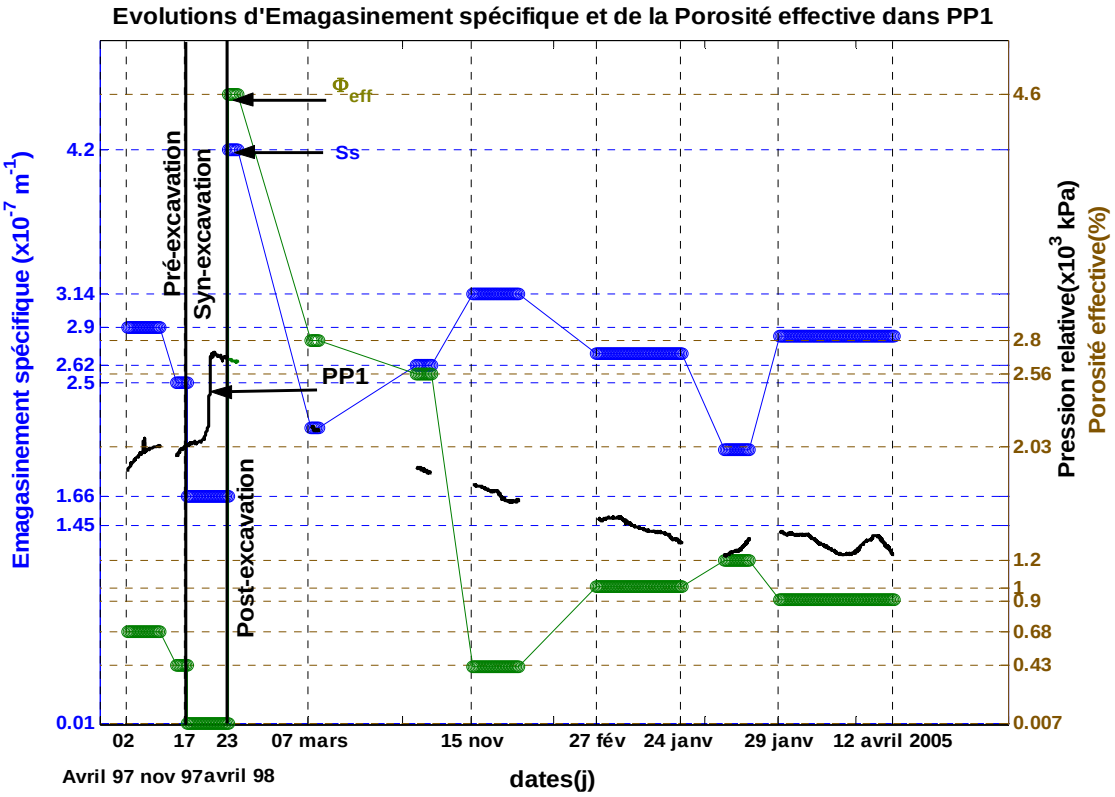



Figure 88: Evolution de l'emmagasinement spécifique et porosité effective corespondant à chaque période dans la section de mesure PP1 en fonction du temps (02/04/97 au 12/04/2005).

En perspective nous proposons d'utiliser une méthode encore plus performante basée sur l'analyse de l'enveloppe statistique d'un signal (enveloppe de Cramer-Leadbletter) qui permet d'étudier l'analyse évolutive des paramètres hydrauliques au cours du temps.

# *Partie5 : Site de Tour-nemire : prétraitement et analyses des signaux de pression interstitielle (forage PH2)*

# 9 *Prétraitement et analyses des données de pression du forage PH2 a Tournemire*

## *9.1 Introduction*

Dans cette partie, nous présentons les prétraitements et les analyses des chroniques de pression interstitielle du forage PH2, dans les trois chambres de mesure 1, 2 et 3. Dans un premier temps une description des données est présentée afin de suivre l'évolution des pressions et de l'EDZ dans les périodes pré-excavation, syn-exacavation et post-exacavtion de la galerie 2003.

Ensuite nous avons mis en évidence l'effet de la marée terrestre et l'effet barométrique pour déterminer certains paramètres hydrauliques (porosité effective, emmagasinement spécifique).

## 9.2 Description des données brutes dans les trois chambres

La Figure 89 montre l'évolution de la pression de pore dans les trois chambres 1, 2 et 3 du forage PH2 situé à côté de la galerie principale 2003 (Figure 91).

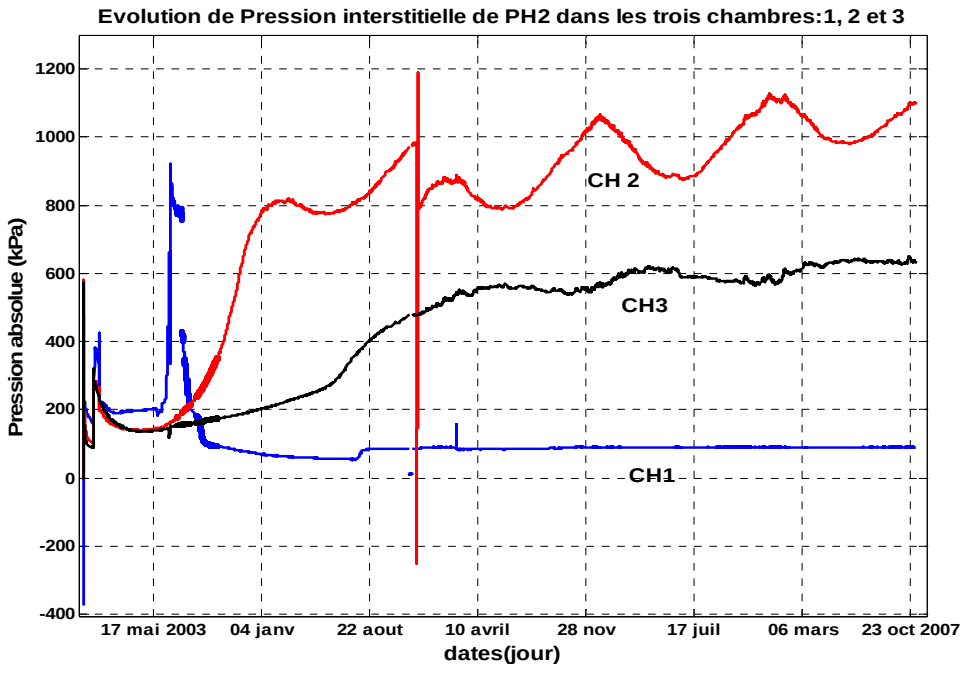



Figure 89: Evolution de la pression interstitielle de PH2 dans les trois chambres de mesure 1,2 et 3

Nous distinguons trois étapes dans l'évolution de la pression :

### *9.2.1 Phase pré-creusement*

La Figure 90 permet d'identifier quatre phases antérieures au creusement de la galerie 2003 :

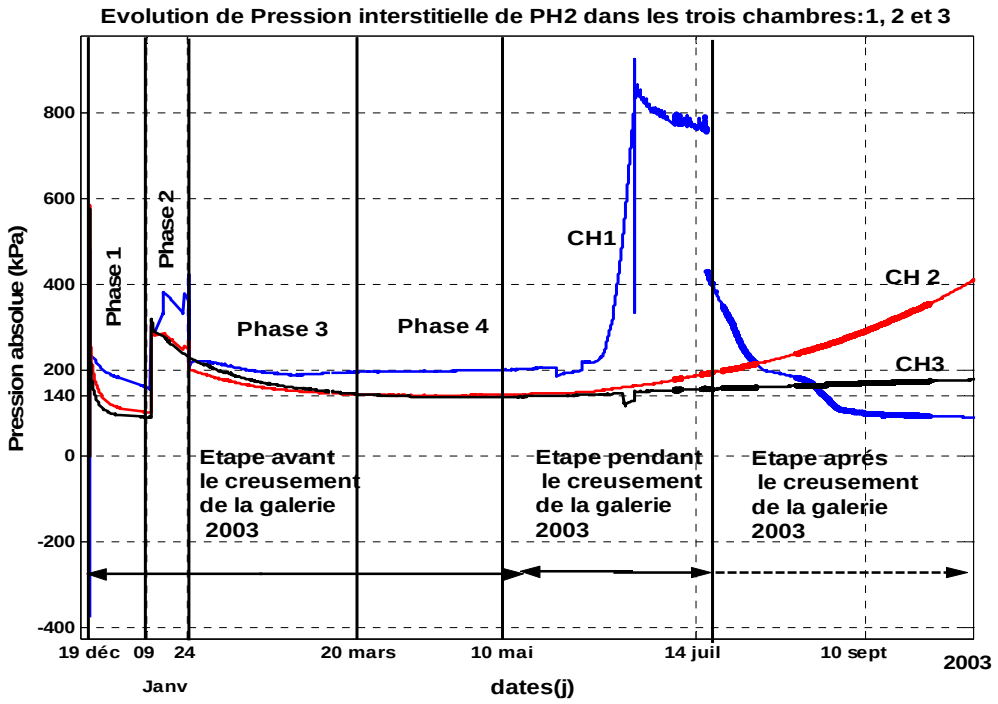



Figure 90: Evolution de la pression interstitielle dans les 3 chambres de mesure pré-excavation, syn-excavation et post-excavation avant changement du capteur de la chambre 1.

*Phase 1 :*

Cette phase a commencé le 19 décembre 2002 et a terminé le 09 janvier 2003 soit 20 jours après. Elle correspond à la phase de stabilisation des pressions avec piégeage vraisemblable d'air entraînant un début de succion caractérisée par des pressions subatmosphériques ou capillaires ayant nécessité la resaturation des chambres.

*Phase 2 :*

Elle a commencé le 09 janvier 2003 et a terminé le 24 janvier 2003, soit 15 jours. Lors de cette phase les obturateurs se sont dégonflés partiellement et il a fallu les regonfler à l'eau. Puis les chambres de mesure ont été de nouveau resaturées pour éliminer toute présence de bulle d'air.

*Phase 3 :*

Elle a commence le 24 janvier 2003 et a terminé le 20 mars 2003, soit après 55 jours. C'est la phase de récupération de la pression d'équilibre.

*Phase 4 :*

Elle a commencé le 20 mars 2003, et a terminé la première semaine de mai 2003, soit 50 jours. Dans cette phase, on obtient des pressions de pore d'équilibre, soit (200 kPa pour la chambre 1 et environ 140 kPa pour les chambres 2 et 3).

### 9.2.2 *Phase du creusement*

L'expérience de suivi du creusement (*mine-by test*) est dédiée à l'étude de la réponse hydromécanique de l'argilite au creusement de la galerie principale 2003. L'excavation a commencé le 05 mai 2003 et s'est achevée le 17 juillet 2003.

La galerie principale a une section semi-circulaire de 5m de diamètre et une longueur de 40 m, les premiers 15 mètres ont été revêtus de bétons de différents types et les 25 mètres suivants ont été équipés de cintres métalliques.

Le creusement a été réalisé à sec à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle munie d'un système d'évacuation de poussière comme le montre la photo ci-dessous **Figure 91**.



Figure 91: Creusement de la galerie principale de 2003 montrant le tronçon bétonné et celui avec cintres métalliques et grillage en voûte.

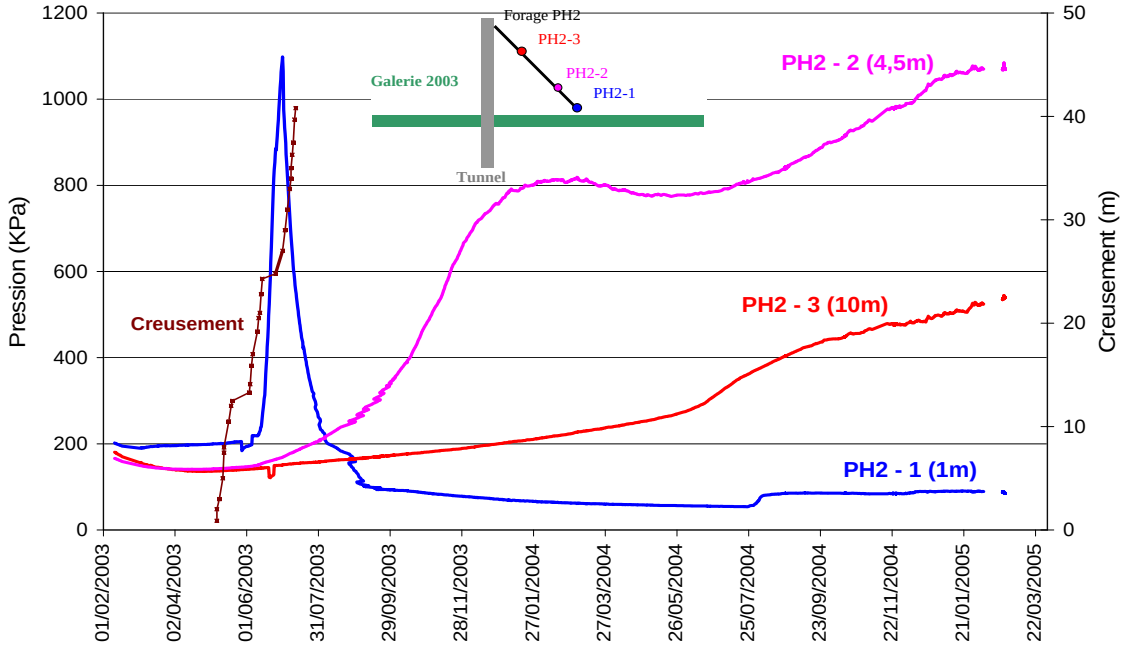



Figure 92: Evolution de la pression interstitielle dans le forage PH2 en fonction du temps avec le creusement de la galerie 2003. Noter que le capteur de la chambre 1 a dû être changé vers le 20 Juin 2003, en phase de creusement, pour accéder au maximum de pression enregistrée d'environ 1100kPa.

Les figures 91 et **92** montrent l'évolution de la pression interstitielle dans le forage PH2 et du creusement de la galerie 2003 en fonction du temps.

Dès le début du creusement initié le 05 mai 2003, le capteur connecté à la chambre de mesure PH2(1), située à proximité de la paroi, a enregistré une augmentation de plus en plus forte de la pression. Noter que l'augmentation était supérieure à celle attendue et qu'il aura fallu changer de capteur en cours de test par un capteur de gamme supérieure (0 – 20bars). Après changement de capteur, le maximum de pression est atteint vers le 20 juin aux environs de 1100 kPa, soit environ +900kPa, par rapport à la pression initiale avant creusement dans PH2(1). Immédiatement après, la pression chute brutalement. Cette chute soudaine sans dissipation d'effet hydraulique indique une décompression hydraulique rapide de la masse rocheuse qui pourrait être due à l'apparition d'une fracture. La pression dans PH2(1) continue de décroître jusqu'à atteindre des valeurs subatmosphériques.

La pression interstitielle de PH2(2) située à une distance de 4.5m de la paroi de la galerie principale augmente régulièrement après le creusement Jusqu'à atteindre voir dépasser la valeur maximale enregistrée sur PH2(1). Cette chambre de mesure montre une dépression suivie d'une remontée et qui pourrait traduire un effet saisonnier. PH2(3) située à 10m de la paroi de la galerie 2003 montre une augmentation plus lente mais continue de la pression. La dépression observée dans PH2(2) n'est plus présente dans PH2(3) mais pourrait être atténuée et déphasée. Ces observations tendent à montrer une réponse hydromécanique couplée avec fort déphasage qui pourrait être la conséquence de la très faible perméabilité de l'argilite.

## *9.3* Analyse des pressions relatives dans PH2 et de la pression atmosphérique dans le Tunnel de Tournemire

Dans cette partie, nous étudierons l'évolution et l'analyse de la pression atmosphérique mesurée dans le tunnel de Tournemire ainsi que l'évolution des pressions relatives après soustraction de la pression atmosphérique dans la chambre 1, avant, pendant et après l'excavation de la galerie principale 2003. Les analyses pour les chambres 2 et 3 sont présentées dans une autre annexe (non incluse ici).

Ces chroniques ont subi les mêmes méthodes de prétraitement que celles déjà utilisées précédemment (détection reconstitution des lacunes homogénéisation des pas de temps …).

### *9.3.1 Analyse pré-excavation de la galerie 2003*

#### *9.3.1.1 Pression atmosphérique*

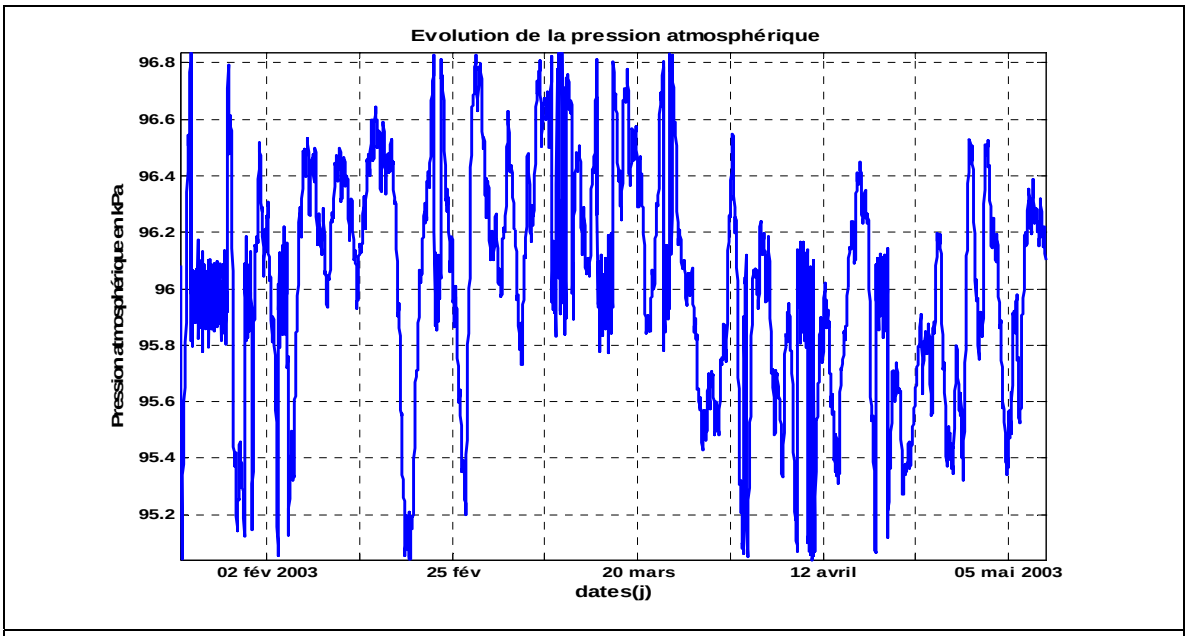



Figure 93: Evolution de la pression atmosphérique avec un pas de 30 min

Période anté-excavation (22/01/2003-10/05/2003).

La Figure 93 montre la chronique prétraitée d'évolution de la pression atmosphérique en kPa pendant la période d'avant excavation qui a commencé le 22 janvier 2003 et qui s'est achevée le 10 mai 2003.

Nous avons effectué un filtrage de type différenciation d'ordre 1 sur la chronique de pression atmosphérique (Figure 94) et ce, afin d'éliminer la tendance et de montrer les structures périodiques.

Le spectre réduit de densité de variance (normalisé à la variance) réalisé sur ce résidu montre l'existence (Figure 95) :

- d'un premier pic à 24 h attribué aux effets barométriques ;
- d'un pic plus important à 12 h attribué aux effets indirects de la marée terrestre.

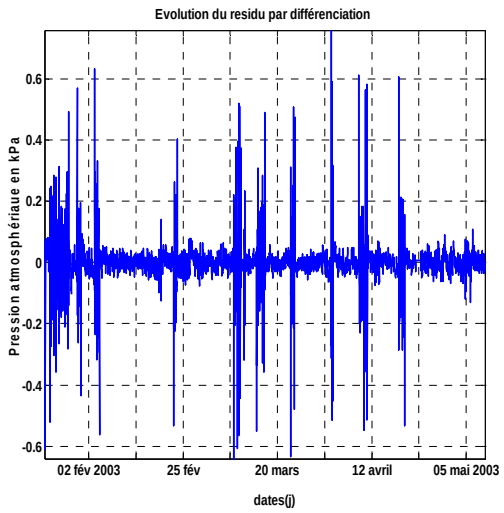



Figure 94: Résidu de la pression atmosphérique calculé par filtrage de type différenciation d'ordre 1 (Période 22/01/2003-10/05/2003)

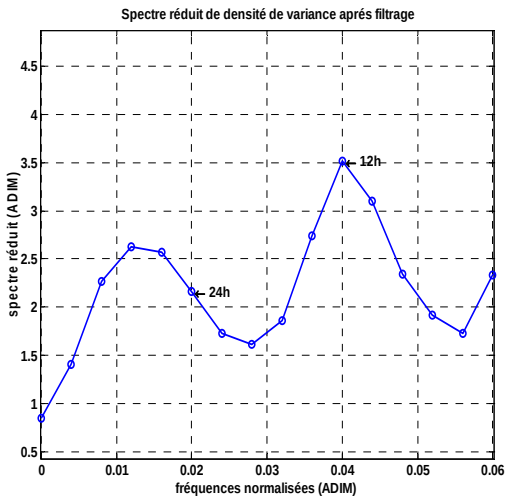



Figure 95: Spectre réduit du résidu de la pression atmosphérique ΔPatm(t) en kPa (Δt=30min)

### *9.3.1.2 Pression relative dans la chambre 1*

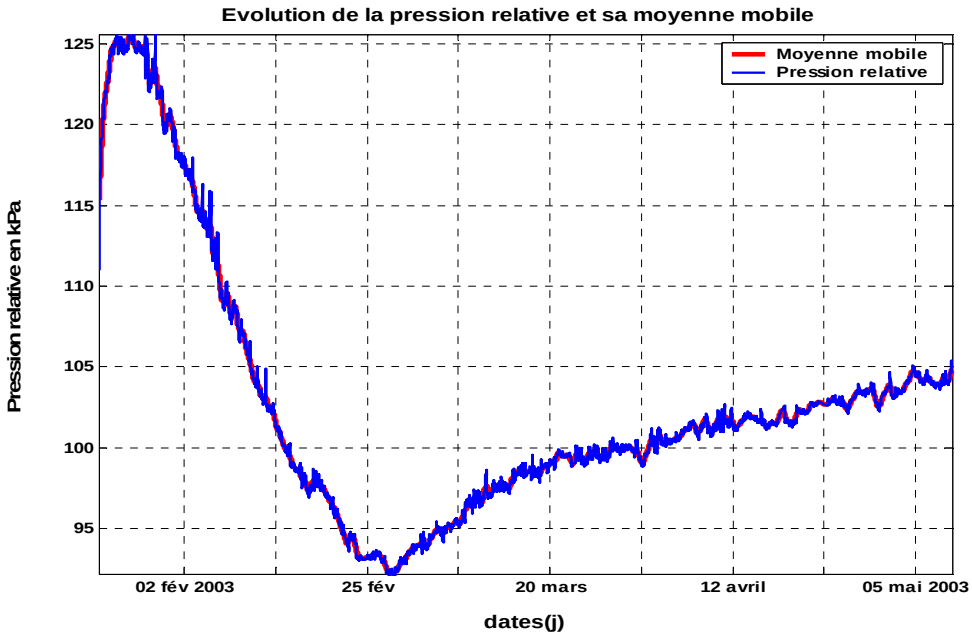



Figure 96: Evolution de la pression relative et sa moyenne mobile (wt=6h) avec un pas de 30 min dans le forage PH2 chambre 1 Période (22/01/2003-10/05/2003).

La **Figure 96** montre l'évolution de la pression relative et sa moyenne mobile.

Cette chronique est obtenue par soustraction de la pression atmosphérique (~96 kPa) à la chronique mesurée dans la chambre 1 située à une distance de 1m perpendiculairement à la paroi nord de la galerie 2003 et à 25 m de celle du tunnel.

Cette chronique commence le 22 janvier 2003 juste avant la fin de la phase 2 spécifique au regonflage des obturateurs et de restauration des chambres (Figure 90). Elle se traduit par une augmentation de la pression relative puis par une diminution de la pression (phase 3) attribuée à la récupération de la pression d'équilibre. Puis la pression se stabilise à environ 200 kPa pour la chambre 1, c'est à dire à environ 105 kPa en pression relative (phase 4). Cet épisode s'achève le 10 mai 2003.

Nous avons étudié cette chronique de manière plus approfondie en nous appuyant sur :

1) les analyses corrélatoires et spectrales qui permettent respectivement d'étudier l'évolution des événements dans le domaine temporel et qui traduisent la structure du signal ;
2) les analyses multirésolution et croisée qui permettent i) d'obtenir une relation de type temps-échelle des phénomènes localisés temporellement ou transitoires et ii) d'aboutir, si possible, à la détermination de certains paramètres hydrauliques (porosité effective et emmagasinement spécifique). Ces estimations seront détaillées plus loin (**9.5**).

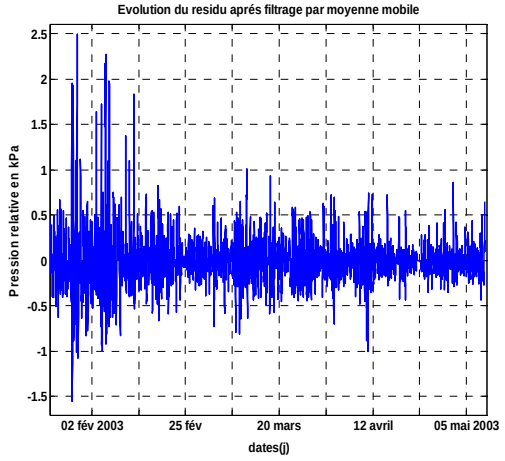



Figure 97: Evolution du résidu de la pression relative dans le forage PH2 chambre 1 calculé par filtrage moyenne mobile (wt=6h) (Période 22/01/2003-10/05/2003).

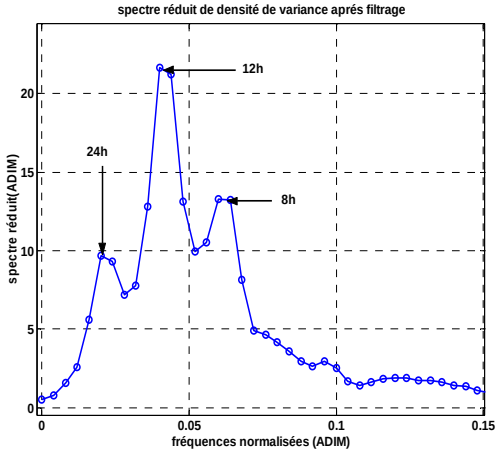



Figure 98: Spectre réduit du résidu de la pression relative en kPa avec Δt=30min. Délai de coupure M=125 pas de temps.

La Figure 97 montre l'évolution du résidu de la pression relative en kPa au pas d'acquisition Δt=30 min dans la chambre 1 du forage PH2. Ce résidu a été évalué par filtrage moyenne mobile de demi-fenêtre 6h. Cette chronique correspond à la période pré-excavation qui a débuté le 22 janvier 2003 et s'est terminée le 10 mai 2003. La Figure 98 représente le spectre réduit de densité de variance de ce résidu. On y distingue trois pics :

- Un pic dominant (ou encore absolu) à 12 h qui traduit l'effet de la marée terrestre ;
- Un pic relatif à 24h dû aux effets barométriques ;
- Un pic relatif à 8 h (inexpliqué).

La présence de la marée terrestre dans les chroniques de pression relative va nous permettre d'estimer l'emmagasinement spécifique.

#### *9.3.1.3 Analyse croisée Prel/Patm et calcule de BE dans la chambre 1*

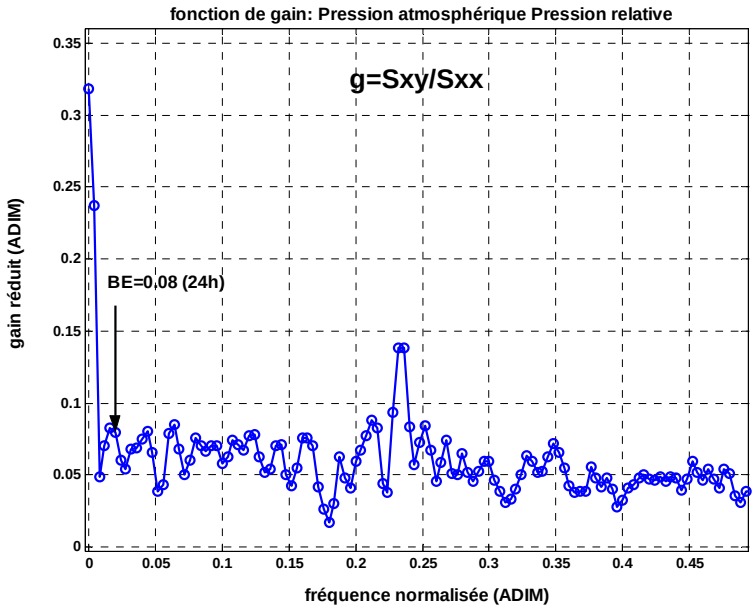



Figure 99: fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative correspondante dans la chambre PH2(1) période (22/01/2003-10/05/2003).

La fonction de gain montrée sur la Figure 99 nous permet de calculer l'efficience barométrique BE en chaque fréquence. En période diurne 24h, sa valeur est de 8%.

### *9.3.2 Analyse pendant l'excavation de la galerie 2003*

#### *9.3.2.1 Pression atmosphérique*

La Figure 100 montre l'évolution de la pression atmosphérique prétraitée pendant la période d'excavation de la galerie 2003 qui a commencé le 10 mai 2003 et s'est terminée le 25 juillet 2003.

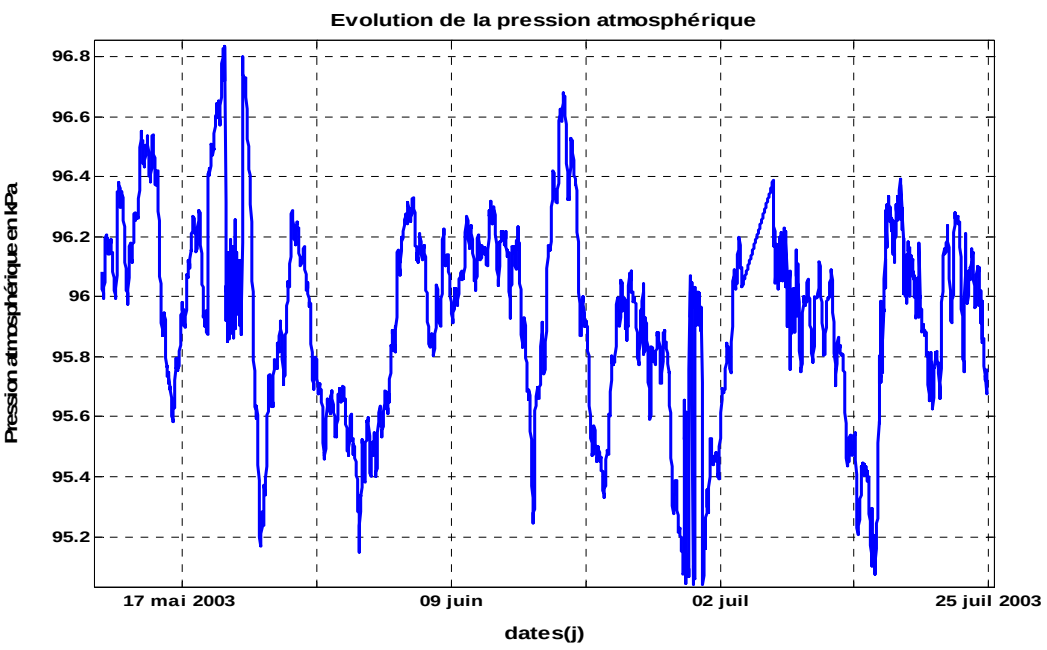



Figure 100: Evolution de la pression atmosphérique avec un pas de 30 min pour la période du 10/05/2003 au 25/07/2003, *i.e.* pendant l'excavation.

Nous avons effectué un filtrage de type différenciation d'ordre 1 de la chronique de pression atmosphérique (**Figure 100**).

La **Figure 101** présente la chronique de pression atmosphérique ΔPatm(t) centrée pour une moyenne nulle.

La **Figure 102** montre le spectre réduit de densité de variance de ΔPatm(t). On y observe deux pics :

- Un pic dominant à une période proche de 12 h, attribué aux effets indirects de la marée terrestre ;
- Un pic relatif à 24 h attribué aux effets barométriques. Ce pic est plus fort que celui observé dans l'analyse de la chronique de pression atmosphérique avant excavation (**Figure 93**). Cela est dû au fait que l'effet barométrique est plus important pendant la période d'excavation qu'avant celle-ci.

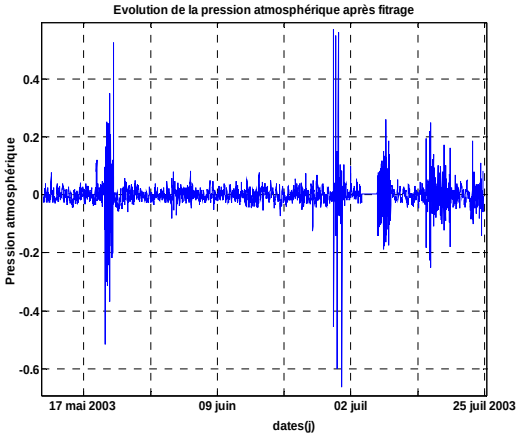



Figure 101: Chronique de la pression atmosphérique calculée par filtrage de type différenciation d'ordre 1. Période du 10/05/2003 au 25/07/2003.

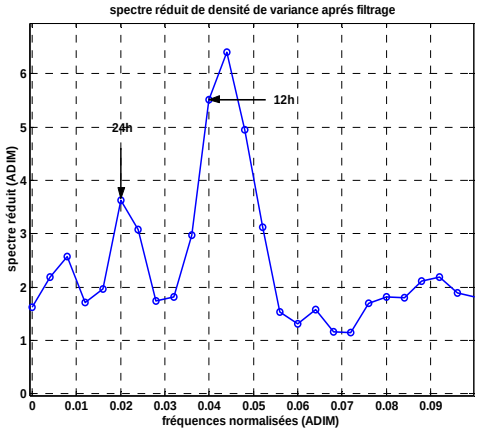



Figure 102: Spectre réduit du résidu de la pression atmosphérique ΔPatm(t) en kPa avec Δt=30min. Délai de coupure M=125 pas de temps.

### *9.3.2.2 Pression relative dans la chambre 1*

La Figure 103 montre l'évolution de la pression relative prétraitée dans la section de mesure 1 du forage PH2 située à 1 m de la paroi Nord de la galerie principale de 2003 et à 25 m de celle du tunnel. Cette chronique correspond à la période syn-excavation qui débute le 10 mai 2003 et se termine le 25 juillet 2003.

Noté que le capteur connecté initialement à la chambre 1 (gamme 0 - 10bars) a du être remplacé vers le 20 Juin 2003 par un autre capteur de gamme supérieure (0 – 20 bars). Ainsi l'évolution des pressions de la Figure 92 a été obtenue a partir du capteur gamme basse lors de la montée et du capteur gamme haute lors de la descente. La valeur maximale enregistrée dans PH2(1) est d'environ 1100kPa d'après la Figure 92.

Pour étudier plus profondément l'étape syn-excavation, nous avons décidé d'analyser plus en détail une séquence d'une chronique prétraitée de pression relative dans la chambre 1 du forage PH2 (laboratoire souterrain de Tournemire). Cette chronique d'échelle temporelle semestrielle coïncide avec la fin d'excavation de la galerie 2003, excavation qui s'accompagne d'une décompression du fluide interstitiel d'environ ~450 kPa.

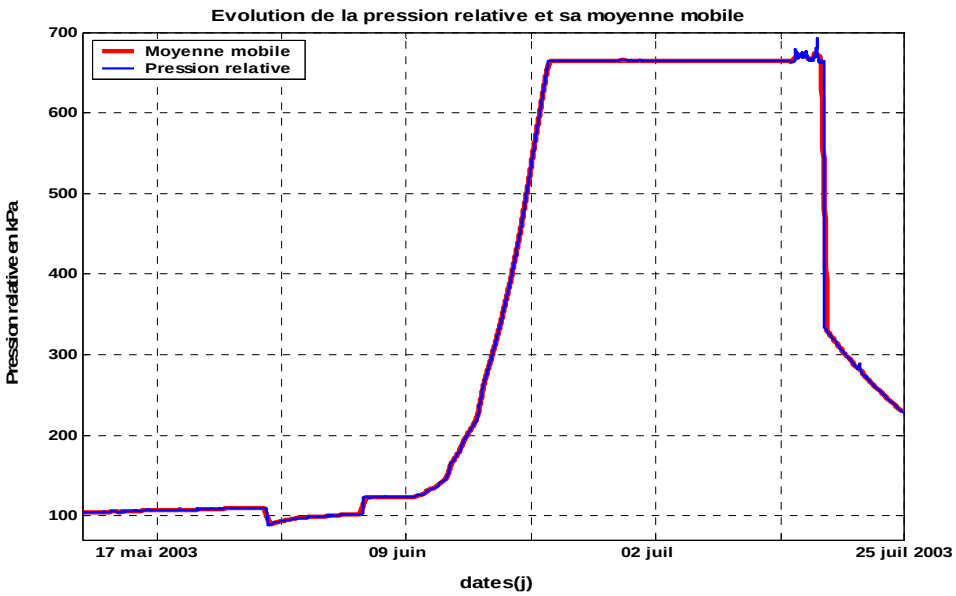



Figure 103: Evolution de la pression relative et sa moyenne mobile (Wt=6h) avec un pas de 30min dans la chambre 1 du forage PH2. Période du 10/05/2003 au 25/07/2003.

On observe une augmentation de pression suivie d'une dépression brutale (voir détails dans le paragraphe **9.2.2**).

Nous avons utilisé les mêmes analyses que précédemment. Les résultats sont exprimés en **Figure 104** et **Figure 105**.

On remarque que l'effet de marée terrestre est toujours présent et se traduit par la présence d'un pic très important à 12 h. Par contre il y a absence de l'effet barométrique contrairement à la période de pré-excavation.

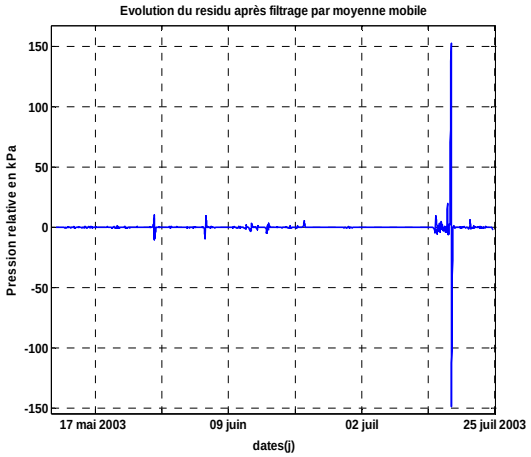



Figure 104: Evolution du Résidu, calculé par filtrage moyenne mobile (wt=6h), de la pression relative de la chambre 1 du forage PH2 . Période du 10/05/2003 au 25/07/2003.

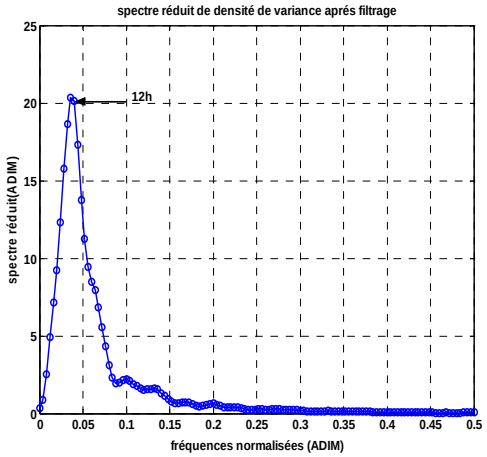



Figure 105: Spectre réduit du résidu de la pression relative en kPa avec Δt=30min Délai de coupure M=125 pas de temps.

### *9.3.2.3 Analyse croisée Prel/Patm et calcul de l'efficience barométrique BE pour la chambre 1*

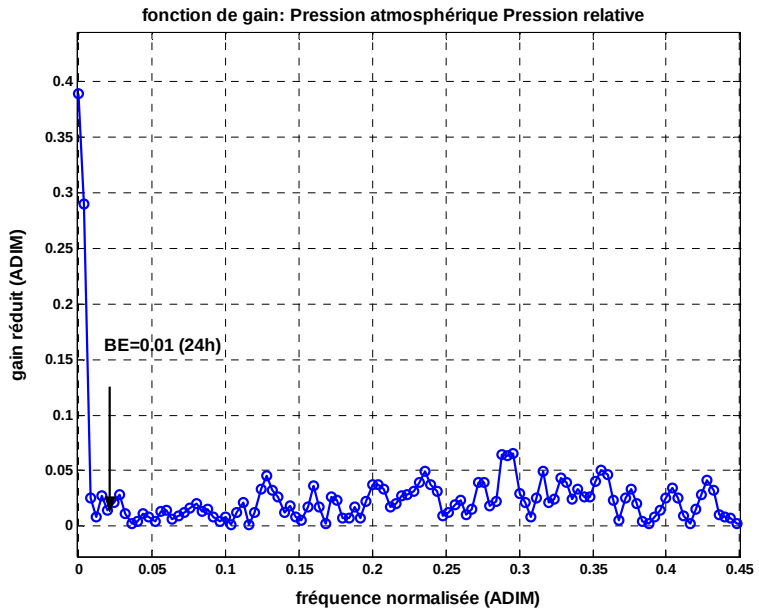



Figure 106: fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative correspondante dans la chambre PH2(1) période du 10/05/2003 au 25/07/2003.

La fonction de gain entre Prel/Patm montré dans la Figure 106, permet de calculer la valeur de BE à la période diurne 24h. Cette valeur est de 1%.

### *9.3.3 Analyse de la période post-excavation de la galerie 2003*

#### *5.3.4.5 Pression atmosphérique*

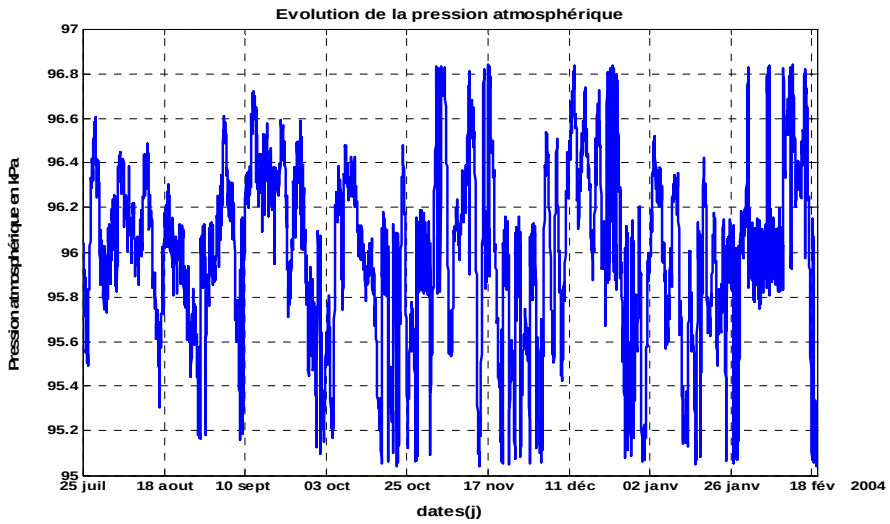



Figure 107: Evolution de la pression atmosphérique avec un pas de 30 min.

Période du 25/07/2003 au 21/02/2004 après excavation.

La Figure 107 montre l'évolution de la pression atmosphérique prétraitée correspondant à la période d'excavation de la galerie 2003 allant du 25/07/2003 au 21/02/2004

### *5.3.4.6 Pression relative dans la chambre 1*

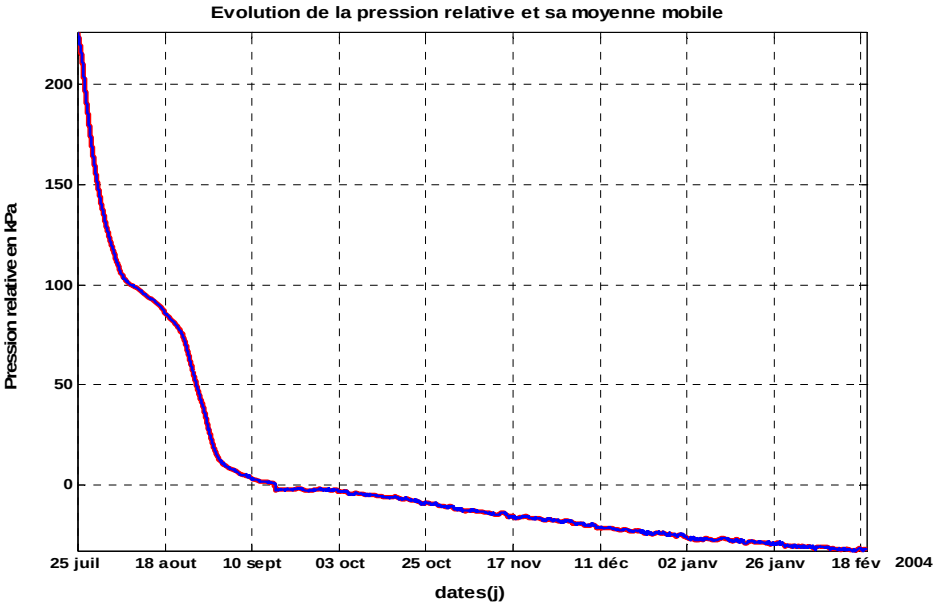



Figure 108: Evolution de la pression relative et sa moyenne mobile (Wt=6h) avec un pas de 30 min dans la chambre 1 du forage PH2. Période du 25/07/2003 au 21/02/2004.

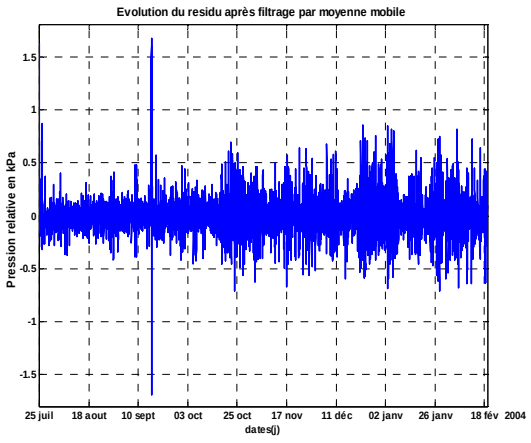



Figure 109 :Evolution du Résidu, calculé par filtrage moyenne mobile (wt=6h), de la pression relative dans la chambre 1 du forage PH2. Période du 25/07/2003 au 21/02/2004.

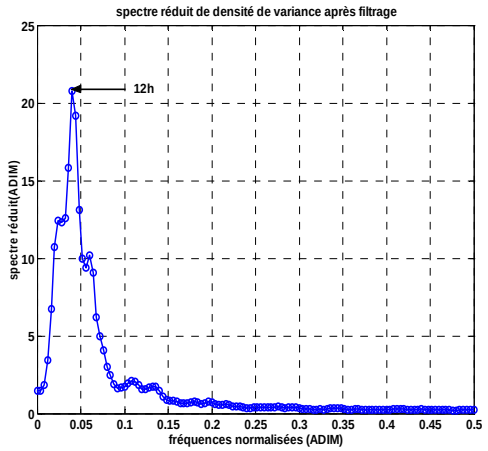



Figure 110: Spectre réduit du résidu de la pression relative en kPa (Δt=30min).

La Figure 108 montre l'évolution de la pression relative et sa moyenne mobile dans la chambre de mesure 1 du forage PH2. Cette chronique commence le 25/07/2003 et se termine le 21/02/2004. Elle correspond à la période post-excavation.

On observe une diminution sensible de la pression après le passage du front d'excavation au droit de PH2(1). Les pressions présentent des valeurs sub-atmosphériques caractéristiques de pressions capillaires (succion).

Nous avons utilisé les mêmes analyses que précédemment. Les résultats sont exprimés en Figure 109 et Figure 110. On remarque que l'effet de la marée terrestre est toujours présent est se traduit par la présence d'un pic très important à 12 h. On note aussi la disparition de l'effet barométrique (absence du pic à 24h).

#### *5.3.4.7 Analyse croisé Prel/Patm et calcul de l'efficience barométrique BE dans la chambre 1*

La Figure 111 illustre la fonction de gain entre Prel/Patm correspondant à la période post excavation. On remarque que la valeur de BE à la période diurne 24h vaut 10%, comme pour la période de syn-excavation.

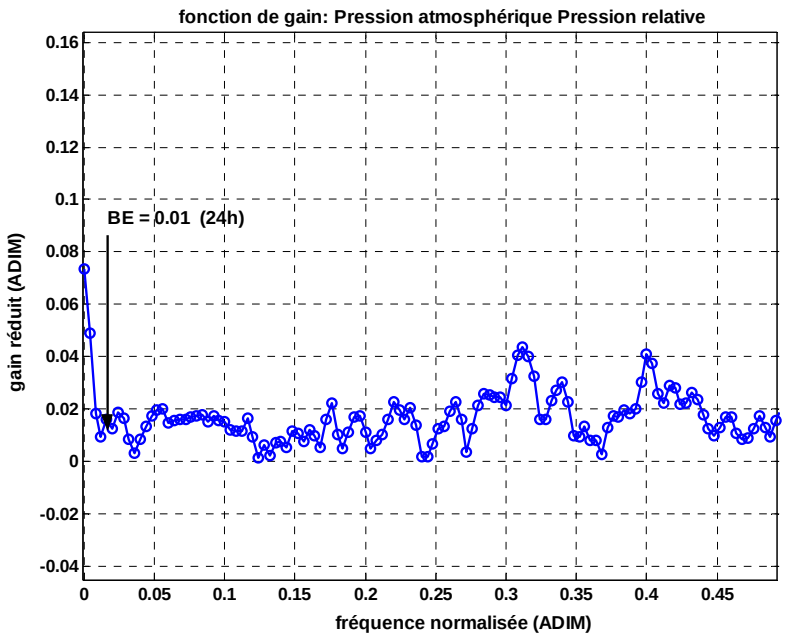



Figure 111: fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative correspondant dans la chambre PH2(1) période du 25/07/2003 au 21/02/2004.

## *9.4 Conclusion partielle*

L'analyse des effets de creusement de la galerie principale 2003, sur l'évolution de la pression interstitielle dans les chambres de mesures 1, 2 et 3 du forage PH2, a permis de démontrer le comportement différent des chambres de test selon les différentes phases de l'excavation.

La pression interstitielle de PH2(1) située à une distance de 1m de la paroi de la galerie principale montre un comportement différent en phase de pré et de syn-excavation.

En phase de pré-excavation nous avons pu montrer que les valeurs de pression absolue étaient pratiquement stabilisées autour de 200kPa. Cette valeur est très inférieure à celle attendue pour une formation surmontée d'un aquifère avec une hauteur d'eau d'environ 50m au dessus du tunnel. Ce constat corrobore l'existence d'une frange capillaire autour du tunnel (Matray *et al.*, 2007). L'analyse des pressions montre que le confinement du milieu est confirmé par la présence du pic semi-diurne de la marée terrestre alors que l'effet barométrique est partiellement présent.

En phase de syn-excavation, nous observons une augmentation brutale de la pression de pore dans la chambre de mesure 1 du forage PH2 qui se situe à 1m de la galerie 2003 (≈1100 kPa après changement de capteur, Cf. Figure 92) lors du passage du front d'excavation au droit du forage PH2. Immédiatement après, la pression chute brutalement. Cette chute soudaine sans dissipation d'effet hydraulique indique une décompression hydraulique rapide de la masse rocheuse qui pourrait être due à l'apparition d'une fracture. Les valeurs de pression continuent de décroître jusqu'à atteindre des valeurs subatmosphériques. Ce constat pourrait suggérer un dé confinement du milieu mais la présence de l'effet de marée terrestre pendant la chute de pression semble indiquer le contraire ce qui pourrait traduire une fermeture de la possible fissure générée lors du passage de l'excavateur.

La pression interstitielle de PH2(2) située à une distance de 4.5m de la paroi de la galerie principale augmente régulièrement après le creusement jusqu'à atteindre voir dépasser la valeur maximale enregistrée sur PH2(1). Cette chambre de mesure montre une dépression suivie d'une remontée et qui pourrait traduire un effet saisonnier. PH2(3) située à 10m de la paroi de la galerie 2003 montre une augmentation plus lente mais continue de la pression. La dépression observée dans PH2(2) n'est plus présente dans PH2(3) mais pourrait être atténuée et déphasée. Ces observations tendent à montrer une réponse hydromécanique couplée avec fort déphasage qui pourrait être la conséquence de la très faible perméabilité de l'argilite.

## 9.5 Caractérisation hydraulique par les chroniques prétraitées (Tournemire)

### 9.5.1 Emmagasinement spécifique

Ce coefficient peut se calculer à partir de la formule simplifiée de Bredehoeft (1967) qui prend en compte l'effet de la marée terrestre (éq. **8.1**).

Avec $S_s$: l'emmagasinement spécifique, $\Delta\varepsilon$ le coefficient de dilatation cubique induit par l'onde semi-diurne, ($\Delta\varepsilon \approx 2\times10^{-8}$ d'après Melchior, 1960) et $\Delta H$ la variation liée à la marée (m).

L'analyse multirésolution permet d'isoler la composante semi-diurne pour en déterminer l'amplitude ($\Delta H$). Cette amplitude peut se calculer de plusieurs façons : Moyenne harmonique des écarts, Moyenne géométrique des écarts, valeur absolue de la déviation moyenne, écart type (voir Tableau 9).

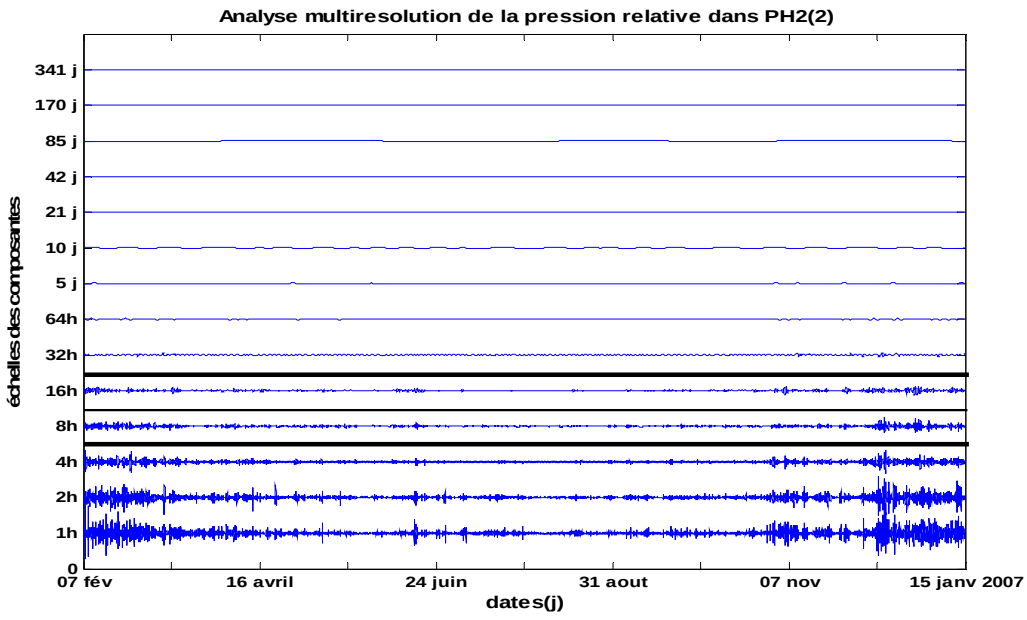



Figure 112: Analyse multirésolution de la pression relative de la chambre 2 du forage PH2 entre le 07/02/06 et le 15/01/07 pour un pas de temps $\Delta t$=30min, k=1 .

La Figure 112 montre l'évolution des composantes en fonction du temps et en échelle dyadique. Le but est d'isoler la composante semi-diurne dûe à l'effet de marée terrestre indiqué sur la même figure par la composante à 8 h qui est la plus proche de la composante semi-diurne à 12h.

La Figure 113 montre l'évolution de cette composante, en complétant la chronique d'échelle dyadique, puis en reprenant les valeurs de la chronique d'origine. La norme L1 a été utilisée pour déterminer l'amplitude des fluctuations de cette composante. Dans la Figure 113 $\Delta H$ vaut 0.031m ce qui nous permet de calculer une valeur de $6.53\times10^{-7}m^{-1}$ pour l'emmagasinement spécifique en appliquant l'équation (**8.1**).

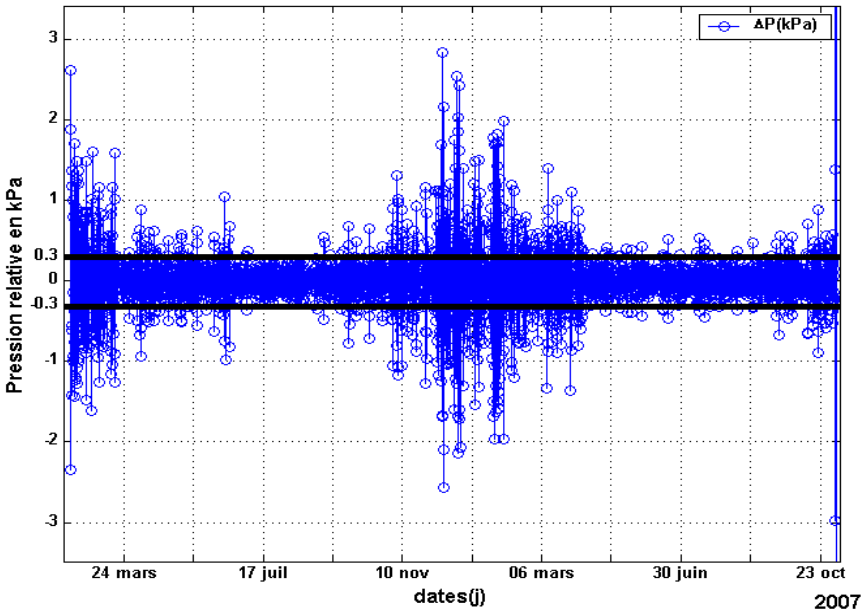



Figure 113: Analyse multi résolution de la composante 12h entre 07/02/06 et 06/11/07 avec Δt=30 min de la pression relative de la chambre 2 du forage PH2. k=1, ΔH(Norm1)=0.031 m.

Nous avons appliqué cette méthode aux différentes périodes pour les sections de mesure PH2(1), PH2(2) et PH2(3) les tableaux **16**, **17** et **18** constituent une synthèse des valeurs d'amplitudes et d'emmagasinements spécifiques associés.

| Période mesurée dans PH2(1) | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique Ss(m-1) |
|---|---|---|
| 22/01/2003 au 10/05/2003 | **0.019** | **$1.06\times10^{-6}$** Pré-excavation Ga 2003 |
| 10/05/2003 au 25/07/2003 | **0.207** | **$9.67\times10^{-8}$** Syn-excavation Ga2003 |
| 25/07/2003 au 21/02/2004 | **0.020** | **$9.89\times10^{-7}$** Post-excavation Ga2003 |
| 22/02/2004 au 15/11/2004 | **0.010** | **$1.96\times10^{-6}$** |
| 15/11/2004 au 23/11/2004 | **0.016** | **$1.24\times10^{-6}$** |
| 23/11/2004 au 07/02/2006 | **0.011** | **$1.78\times10^{-6}$** |
| 07/02/2006 au 06/11/2007 | **0.010** | **$1.95\times10^{-6}$** |

Tableau 16: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 1 du forage PH2) ou PH2(1).

| Période mesurée dans PH2(2) | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique $S_s(m^{-1})$ |
|---|---|---|
| 22/01/2003 au10/05/2003 | **0.015** | **$1.29\times10^{-6}$** Pré-excavation Ga 2003 |
| 10/05/2003 au 25/07/2003 | **0.021** | **$9.32\times10^{-7}$** Syn-excavation Ga2003 |
| 25/07/2003 au 03/12/2003 | **0.045** | **$4.39\times10^{-7}$** Post-excavation Ga2003 |
| 22/02/2004 au 15/11/2004 | **0.027** | **$7.30\times10^{-7}$** |
| 15/11/2004 au 23/11/2004 | **0.016** | **$1.23\times10^{-6}$** |
| 22/12/2004 au 24/03/2005 | **0.049** | **$4.06\times10^{-7}$** |
| 04/08/2005 au 04/10/2005 | **0.035** | **$5.72\times10^{-7}$** |
| 07/02/2006 -06/11/2007 | **0.031** | **$6.53\times10^{-7}$** |

Tableau 17: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 2 du forage PH2 ou forage PH2(2))

| Période mesurée dans PH2(3) | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique $Ss(m^{-1})$ |
|---|---|---|
| 31/01/2003 au 10/05/2003 | **0.020** | **$9.87\times10^{-7}$ Pré-excavation Ga 2003** |
| 10/05/2003 au 25/07/2003 | **0.015** | **$1.34\times10^{-6}$ Syn-excavation Ga2003** |
| 25/07/2003 au 31/12/2003) | **0.012** | **$1.72\times10^{-6}$ Post-excavation Ga2003** |
| 22/02/2004 au 15/11/2004 | **0.021** | **$9.50\times10^{-7}$** |
| 15/11/2004 au 23/11/2004 | **0.016** | **$1.24\times10^{-6}$** |
| 23/11/2004 au 07/02/2006 | **0.027** | **$7.50\times10^{-7}$** |
| 07/02/2006 au 06/11/2007 | **0.024** | **$8.38\times10^{-7}$** |

Tableau 18: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 3 du forage PH2 ou PH2(3)

### *9.5.2 Porosité effective*

***Définition :***

La porosité effective est définie comme étant le rapport entre le volume de pore interconnecté (les pores dans lesquels l'eau est mobile) et le volume total (Bear, 1972 ; de Marsily, 1986).

Les composantes diurnes et hebdomadaires auraient pour origine l'effet de pression barométrique. Or, l'effet de la pression barométrique sur les aquifères captifs se traduit par l'efficience barométrique B. Ce paramètre nous permet de calculer la porosité effective. D'après la formule de (Jacob,1940 ),(éq. **8.2**).

Pour calculer la porosité nous avons effectué des analyses croisées entre la pression atmosphérique et la pression relative mesurées dans les trois chambres PH2(1), PH2(2) et PH2(3) au pas de 30min. La fonction de gain est utilisée pour déterminer l'efficience barométrique B (Figure 114).

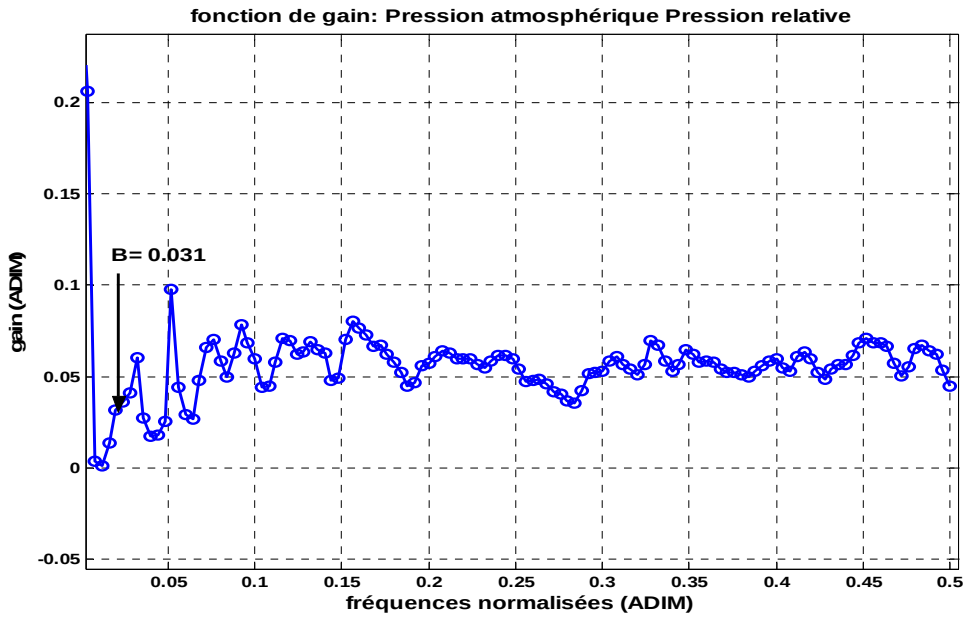



Figure 114: Fonction de gain réduit entre la pression atmosphérique et la pression relative dans PH2(2) période allant du 07/02/2006 au 06/11/2007.

Nous avons appliqué ces méthodes aux différentes périodes pour les sections de mesure PH2(1),PH2(2) et PH2(3). Les résultats trouvés sont illustrés dans les tableaux **Tableau 19**, **Tableau 20** et **Tableau 21** (les résultats marqués par un astérisque ' * ' sont peu fiables, les raisons en sont discutées plus bas).

| La section de mesure PH2(1) | B(ADIM) | Porosité effective ϕeff (%) |
|---|---|---|
| Période (22/01/2003-10/05/2003) | **0.079** | **1.76% Pré-excavation Ga 2003** |
| Période (10/05/2003-25/07/2003) | **0.014** | **0.02% Syn-excavation Ga2003** |
| Période (25/07/2003-21/02/2004) | **0.012** | **0.26% Post-excavation Ga2003** |
| Période (22/02/2004-15/11/2004) | **0.050** | **2.07%** |
| Période (15/11/2004-23/11/2004) | **0.99** | **25.99% *** |
| Période (23/11/2004-07/02/2006) | **0.49** | **18.45%*** |
| Période (07/02/2006-06/11/2007) | 1.48 | **60.%*** |

Tableau 19: Valeurs des porosités effectives dans la chambre 1 du forage PH2 ou PH2(1).

| La section de mesure PH2(2) | B(ADIM) | Porosité effective $\phi_{eff}$ (%) |
|---|---|---|
| Période (22/01/2003-10/05/2003) | **0.08** | **2.16 %Pré-excavation Ga 2003** |
| Période (10/05/2003-25/07/2003) | **0.05** | **1.09 %Syn-excavation Ga2003** |
| Période (25/07/2003-03/12/2003) | **0.01** | **0.18 %Post-excavation Ga2003** |
| Période (22/02/2004-15/11/2004) | **0.03** | **0.50%** |
| Période (15/11/2004-23/11/2004) | 1.07 | **27.80 %*** |
| Période (22/12/2004-24/03/2005) | **0.66** | **5.62%** |
| Période (04/08/2005-04/10/2005) | **0.11** | **1.34%** |
| Période (07/02/2006-06/11/2007) | **0.03** | **0.42%** |

Tableau 20: Valeurs des porosités effectives dans la chambre de mesure 2 du forage PH2 ou PH2(2).

| La section de mesure PH2(3) | B(ADIM) | Porosité effective $\phi_{eff}$ (%) |
|---|---|---|
| Période (31/01/2003-10/05/2003) | **0.06** | **1.25 %Pré-excavation Ga 2003** |
| Période (10/05/2003-25/07/2003) | **0.10** | **3.02 %Syn-excavation Ga2003** |
| Période (25/07/2003-31/12/2003) | **0.05** | **1.94 %Post-excavation Ga2003** |
| Période (22/02/2004-15/11/2004) | 0.02 | 0.49% |
| Période (15/11/2004-23/11/2004) | 0.99 | **25.84%*** |
| Période (23/11/2004-07/02/2006) | **0.01** | **1.56%** |
| Période (07/02/2006-06/11/2007) | **0.07** | **1.20%** |

Tableau 21: Valeurs des porosités effectives dans la chambre de mesure 3 du forage PH2 ou PH2(3).

Les porosités effectives marquées par un astérisque sont discutables. En effet, pour les résultats de la porosité effective (**Tableau 19**, lignes 6 et 7), on constate l'apparition de pression relative négative, sans doute dûe à une désaturation de l'instrument et/ou du milieu ambiant après l'excavation de la galerie Ga2003. Dans ce cas, l'interprétation de l'effet barométrique est entièrement à revoir. Dans d'autres cas (ligne 5, tableaux 19, 20 et 21), le problème provient sans doute de la très courte durée des signaux étudiés ; environ 8 jours, soit seulement 8 fluctuations diurnes (Mlag=125). De plus, il semble qu'il y a eu une chute de pression, dûe peut être à la coupure électrique.

On verra plus loin que, dans d'autres sites, les porosités effectives estimées sont très sensibles (ou peu robustes) par rapport au choix de la plage de données utilisée (choix des sous-séquences). Il est probable que la forte non-stationnarité du signal Prel(t) soit la cause de ce type de problème. Si ceci est confirmé, cela nécessite une modification de l'approche d'identification du gain entre Patm et Prel (en cours de développement).

## *9.6 Conclusion partielle PH2 Tournemire*

Les résultats montrent que la formation argileuse du Toarcien supérieur de Tournemire captée par le forage PH2 se comporte comme une formation confinée ou partiellement confinée. Grâce à cette propriété de confinement, il a été possible de déterminer

certains paramètres hydrauliques : le coefficient d'emmagasinement spécifique Ss et la porosité effective.

Les valeurs obtenues par les méthodes d'analyse décrites précédemment, pour les chroniques de Pression observées dans les formations d'argilite, sont comparables à celles estimées par tests hydrauliques dont les valeurs reportés par Boisson et al (1998) sont comprises entre $3.10^{-7}$ $m^{-1}$ et $1.10^{-6}$ $m^{-1}$. Ceci démontrerait que les essais hydrauliques, qui ont un rayon limité autour de l'ouvrage, donneraient une estimation de ce coefficient extrapolable à l'échelle du massif, puisque les méthodes de traitement des chroniques intègrent au contraire le comportement global de la formation.

Les valeurs de $S_s$ calculées par méthode d'analyse des chroniques sont de l'ordre de 5.4 $10^{-7}$ à $1.10^{-6}$ $m^{-1}$ dans la formation d'argile de Toarcien de Tournemire. La porosité effective varie de moins de 1% à près de 5% et varierait dans le temps, probablement en fonction de la pression et de l'évolution de EDZ (**Figure 92**). Pendant la période d'excavation de la galerie 2003 on note dans la section de mesure PH2(1) une diminution de l'emmagasinement spécifique ($9.67\times10^{-8}$ $m^{-1}$) par rapport à la période qui à précédé l'excavation ($1.06\times10^{-6}$ $m^{-1}$) puis à une augmentation après l'excavation ($9.89.10^{-7}m^{-1}$).

Pour la porosité effective on note aussi une diminution pendant l'excavation et une augmentation après excavation suivie d'un retour à l'équilibre. Cependant dans la chambre 3 la porosité effective devient faible dans la période (22/02/2004-15/11/2004), cela est dû au déphasage dans la réponse à la transmission du couplage hydromécanique le déphasage peut aller de 1ans à plusieurs années.

Dans certaines périodes les porosités effectives atteignent 25%* et 60%* (tableaux 19 et 21), il est possible que ces valeurs soient dûes aux :

- Non stationnarités liées aux variations saisonnières cycliques des pressions relatives et /ou désaturation du milieu (pression relative).
- A des périodes d'analyses trop courtes comme c'est clairement le cas pour la période allant du 15/11/2004 au 23/11/2004 (≈8jours).

L'estimation de la porosité effective, même entachée de nombreuses incertitudes, demeure néanmoins intéressante par rapport au changement des paramétres hydrauliques en fonction de l'évolution de l'excavation. Pour les essais de suivi de creusement de galeries, elles mettent clairement en évidence le comportement hydromécanique couplé lors du passage du front d'excavation. Même si cela a été pensé de longue date par les mécaniciens des roches pour expliquer l'augmentation instantanée de pression (+9bars lors du creusement de la Ga03).

Donc les valeurs de porosités effectives, calculées par la formule de Jacob(1940) en considérant une efficience barométrique (effet de pression atmosphérique sur le milieu confiné ou partiellement confiné), calculées par analyse croisée entre Patm et Prel, sont à considérer avec grande prudence.

On peut conclure d'une part que le passage de l'excavation à côté de la section de mesure PH2(1) a provoqué un changement des paramètres hydrauliques qui s'est traduit par une diminution de l'emmagasinement spécifique et de la porosité effective.

D'autre part, les analyses de pression interstitielles des forages TN2 et M2 qui coupent les formations fissurées dans le site de Tournemire, effectuées dans une étude ultérieur, ont put montrée que la marée terrestre est invisible dans les milieux fissurés, donc ils se comporteraient comme des milieux non confinés.

# *Partie 6 : Site de Meuse/Haute-Marne :prétraitement et analyses de signaux de pression (forage EST207).*

# 10 Prétraitement et analyses de données de pression du forage EST207 (laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, France)

## 10.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'analyse de certaines données de pression interstitielles mesurées dans différentes sondes du forage EST207. Pour des raisons de temps, nous nous sommes limités au traitement de 3 chambres de test parmi les données des 11 chambres que nous avons reçues (Figure 8).

Il s'agit de la chambre 1 la plus profonde sollicitant les carbonates du Bathonien supérieur (Dogger carbonaté) avec une sonde située à 564.26m, la chambre 5 placée dans les argilites du Callovo-Oxfordien au niveau du faciès C2b1 est une sonde installée située à 516.57m et enfin la chambre 11 sollicitant l'Oxfordien calcaire avec une sonde à profondeur de 302.95m.

Nous avons également analysé la pression atmosphérique associée à ces pressions interstitielles et mesurée en surface au niveau du laboratoire souterrain.

Cette partie sera présentée comme suit :

- Description et analyse des données brutes mesurées dans les trois chambres ;
- Caractérisation des propriétés hydrauliques de l'argilite du Callovo-Oxfordien (chambre 5) et comparaison avec celles de son encaissant carbonaté
- Conclusions partielles sur les analyses effectuées sur les données du forage EST207.

## 10.2 Description des données brutes dans les trois chambres (LSM/HM)

La Figure 115 montre l'évolution de la pression de pore enregistrée dans les trois chambres de mesure 1, 5 et 11 du forage EST207 (Figure 8) sur une période de 13 mois

Rappelons qu'il s'agit ici des données « brutes », c'est-à-dire, non pré-traitées. Les anomalies de type aberrations y sont nettement visibles. Ces anomalies peuvent être dues à des interventions humaines sur les capteurs.

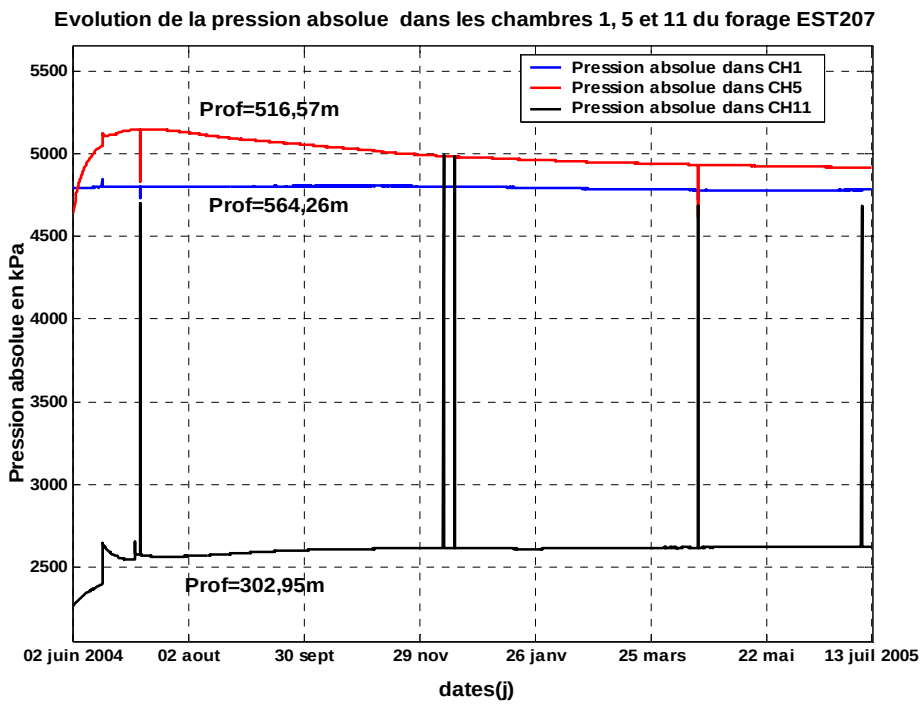



Figure 115: Chronique des pressions interstitielles absolues 'brutes' (sans pré-traitement) dans les trois chambres de mesure 1,5 et 11 du forage EST207.

Chambre 1 : encaissant calcaire inférieur.
Chambre 11 : encaissant calcaire supérieur.
Chambre 5 : Callovo-Oxfordien.

## *10.3 Transformation des pressions absolues en pressions corrigées par ACF (LSM/HM)*

Rappelons, comme indiqué plus haut, que les mesures de pression interstitielle ('*pore pressure*') sont obtenues au moyen de capteurs de pression absolue.

Afin d'exploiter au mieux les données de pression de fond acquises, le traitement proposé pour ces données est le suivant :

Une phase préalable de filtrage des variations du signal barométrique, partiellement transmis par la formation, est appliquée aux mesures de pressions brutes. On est amené à estimer un coefficient de correction (ACF : Atmospheric Correction Factor) qui détermine la proportion de l'amplitude des variations de pression atmosphérique qui est transmise par le terrain. Ce coefficient doit être évalué pour chaque chambre de mesure. Le coefficient de correction appelé *Atmospheric Correction factor* ou ACF est estimé en comparant l'amplitude des variations de pression atmosphérique mesurées en surface (par rapport à une moyenne annuelle de cette pression) aux amplitudes des variations attribuées à la pression atmosphérique dans les enregistrements de la pression de fond.

Concrètement, ce sont les écarts à la moyenne de la pression atmosphérique qui sont calculés à chaque temps t et retranchés, dans une proportion égale à l'ACF, à la mesure de pression brute.

Cette procédure reste une approximation, car elle ne tient pas compte du fait que l'ACF n'est pas constant et dépend en outre de l'amplitude de variation du signal initial, d'une façon qui n'est pas linéaire.

L'application de ce coefficient est donc réalisée selon la formulation suivante :

$$P^*_{filtrée} = P_{capteur} - (P_{atm} - P_{atm}moyenne) \times ACF \qquad \textbf{(10.1)}$$

La détermination de la colonne d'eau équilibrante en trou ouvert proposée pour les mesures sous packers implique le calcul d'une pression corrigée, qui est la pression filtrée (de ces variations « atmosphériques ») à laquelle on retire une pression atmosphérique moyenne, qui est par défaut la pression atmosphérique moyenne sur l'année écoulée. Cette pression moyenne est appliquée afin de ne pas altérer le signal filtré par l'application d'une pression atmosphérique brute.

Le **Tableau 22** montre les coefficients calculés par l'équation **10.1**, pour les trois sondes du forage EST207, dont nous avons étudié les chroniques. Les valeurs ACF sont celles utilisés dans les fichiers de données transmis par ANDRA le 10 août 2005 dans son courrier DP/EST/SS/05-0577.

| | EST207 | |
|---|---|---|
| Patm moyenne | 97.340 | |
| N° Sondes | Prof(m) | ACF |
| 1 | 564.26 | 0.20 |
| 5 | 516.57 | 0.65 |
| 11 | 302.95 | 0.50 |

Tableau 22: Correction atmosphérique des mesures de pression du site de Meuse/Haute-Marne (d'après un extrait du rapport Andra D.RP.0HYN 07.001/A).

## *10.4 Analyse des pressions corrigées du EST207 et de la pression atmosphérique (LSM/HM)*

Dans cette partie, nous avons choisi de présenter certaines analyses de pression corrigée ($P^*_{Corr}$) dans le forage EST207 enregistrées dans la chambre 5.

N.B :

$P^*_{Corr}$ : est une sorte de pression relative

La pression atmosphérique appliquée au calcul du niveau est par défaut celle de la centrale Westbay de chaque site.

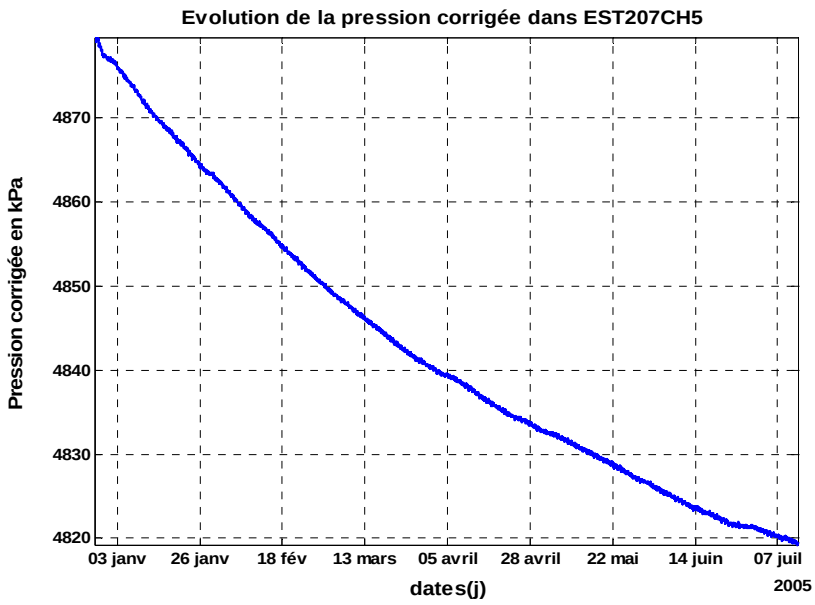



Figure 116: Evolution de la pression $P^*_{Corr}$ dans EST207 CH5, période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min.

La Figure 116 présente les variations de la pression $P^*_{Corr}$ pour la période allant du 27 décembre 2004 au 13 juillet 2005 dans la chambre 5 située à une profondeur de 516.57 dans le forage EST207.

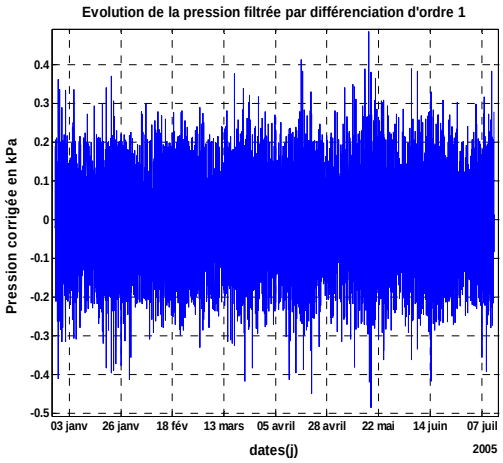



Figure 117: Evolution du résidu de la pression $P^*_{Corr}$ ΔPrel(kPa) dans EST207 chambre 5 période du 27/12/2004 au 13/07/2005.

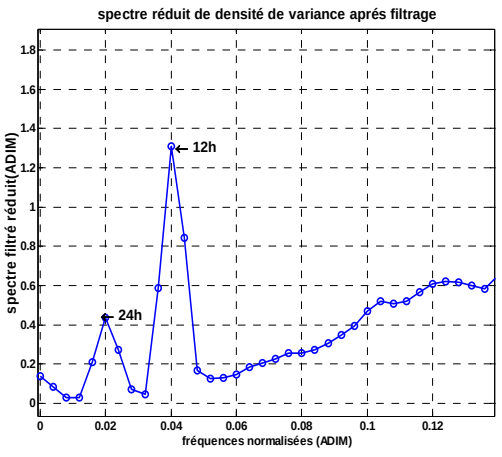



Figure 118: Spectre réduit de densité de variance de la pression $P^*_{Corr}$ après filtrage par différenciation d'ordre 1 avec Δt=30min, M=125 pas du temps.

La Figure 117 montre l'évolution du résidu de la pression corrigée en kPa au pas d'acquisition Δt=30 min dans le forage EST207 mesuré dans la chambre 5. et dont la sonde est installée à une profondeur de 516.57 m. Ce résidu a été évalué par filtrage de type différenciation d'ordre 1. La Figure 118 représente le spectre réduit de densité de variance de ce résidu. On y distingue deux pics :

- Un pic net à 12 h qui traduit l'effet de la marée terrestre ;
- Un pic faible à 24 h attribué aux effets barométriques ;

La présence de l'effet barométrique dans la pression corrigée est expliquée précédemment dans les analyses des données des forages BPP1 (site de Mont Terri) et PH2 (Tournemire).

## *10.5 Caractérisation des formations géologiques de LSM/HM par l'analyse des signaux de pression*

Dans ce chapitre, nous caractérisons les formations géologiques (Callovo-Oxfordien, encaissants) du laboratoire Souterrain de Meuse Haute Marne (LSM/HM) à partir des chroniques de pression prétraitées.

### *10.5.1 Emmagasinement spécifique*

Le coefficient d'emmagasinement spécifique *(quantité d'eau emmagasinée par unité de volume d'un aquifère)* peut se calculer à partir de la formule de Bredehoeft (1967) qui prend en compte l'effet de la marée terrestre. La formule étant donnée précédemment (**8.1**):

L'analyse multirésolution permet d'isoler la composante semi-diurne pour en déterminer l'amplitude ($\Delta H$).

Afin de lever l'incertitude sur le choix de l'échelle dyadique 12h, nous étudions séparément les deux composantes 8h et 16h qui encadrent l'échelle semi-diurne 12h.

La Figure 119 montre l'évolution des composantes en fonction du temps et en échelle, le but étant d'isoler la composante semi-diurne attribuée à l'effet de marée terrestre Nous avons isolé les deux composantes 8h et 16h pour encadrer la composante à 12h (Figure 120). Puis la moyenne des deux composantes à été calculée afin de déterminer la composante encadrée 12h qui est présentée dans la Figure 121.

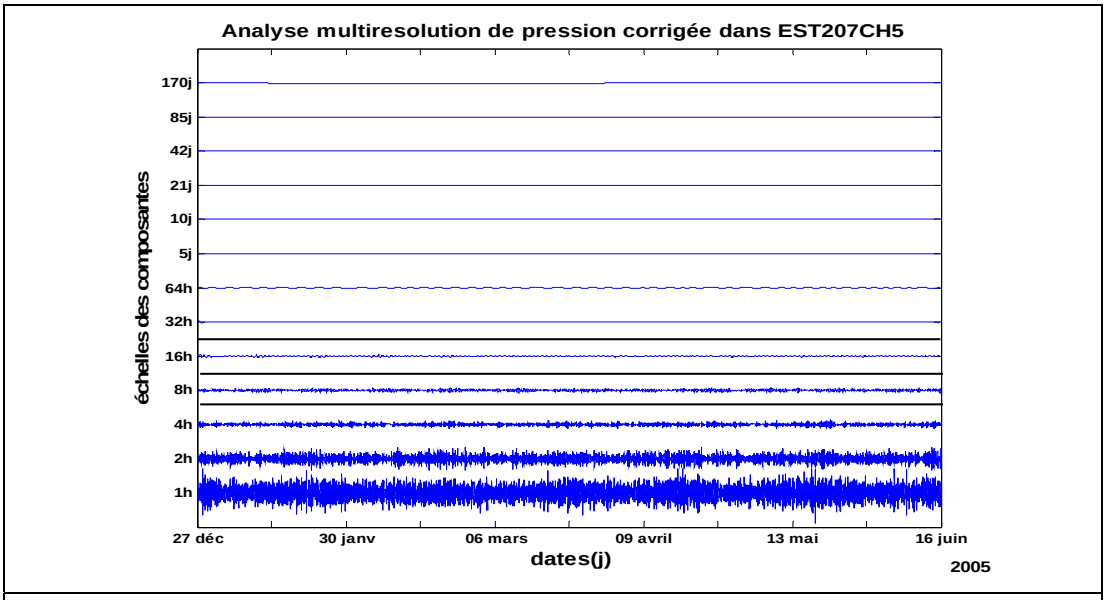



Figure 119: Analyse multirésolution de la pression relative dans EST207 CH5 période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps $\Delta t$=30min.

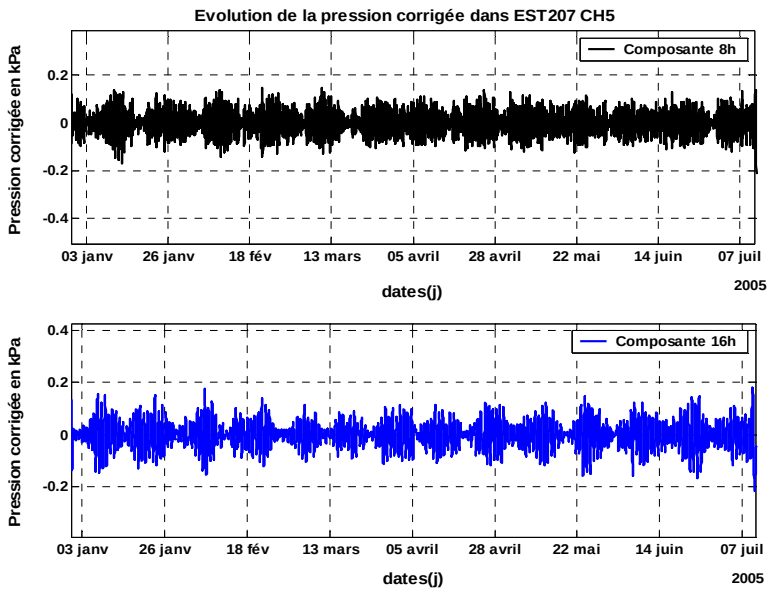



Figure 120: Evolution de la pression corrigée dans EST207 CH5 pour les composantes dyadiques 8h et 16h , période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min .

Nous avons choisi d'interpréter le signal de pression corrigée afin d'obtenir l'amplitude des fluctuations qui nous permettra de calculer l'emmagasinement spécifique (Ss) à l'aide de la composante encadrée 12h, obtenue à partir des deux composantes 8h et 16h

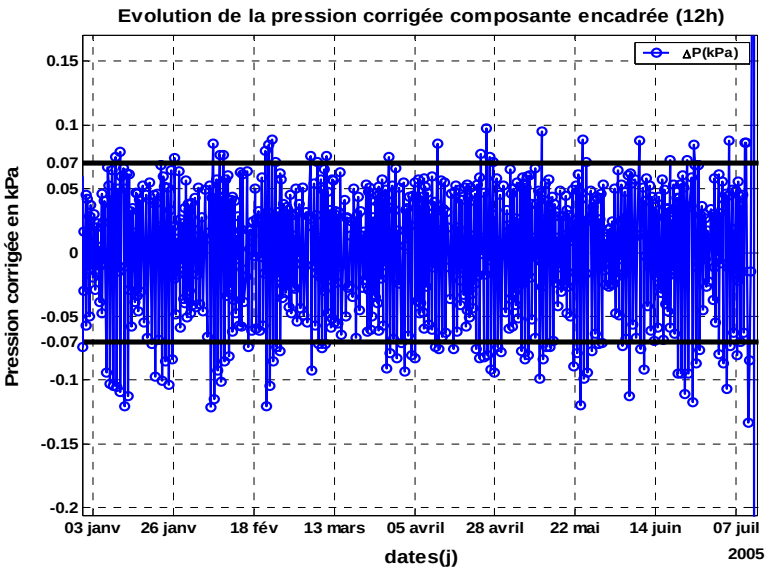



Figure 121: Evolution de la pression corrigée dans EST207 CH5 pour la composante encadrée semi-diurne 12h période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min.

La Figure 121 montre l'évolution de la composante encadrée 12h. Pour déterminer l'amplitude des fluctuations de cette composante, nous avons utilisé la norme L1 (la valeur absolue de la déviation moyenne des fluctuations maximales de cette

composante), l'amplitude ΔH vaut 0.007 m ce qui nous permet de calculer la valeur de l'emmagasinement spécifique. En appliquant l'équation, (**8.1**) on trouve une valeur de l'emmagasinement spécifique Ss égale à **$2.93\times10^{-6}$** $m^{-1}$.

Nous avons appliqué cette méthode aux différentes périodes des chroniques du forage EST207, et ce, pour les chambres 1, 5 et 11 les tableaux 23, 24 et 25 montrent une synthèse des valeurs d'amplitudes (ΔH1) et d'emmagasinements spécifiques associés.

| Section de mesure EST207 (chambre 1) au LSM/HM | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique Ss($m^{-1}$) |
|---|---|---|
| 16/06/2004 au 27/12/2004 | **0.01** | **$2.04\times10^{-6}$** |
| 23/01/2005 au 13/07/2005 | **0.009** | **$2.28\times10^{-6}$** |

**Tableau 23**: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 1 du Bathonien calcaire du forage EST207.

| Section de mesure EST207 (chambre 5) au LSM/HM | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique Ss($m^{-1}$) |
|---|---|---|
| 09/07/2004 au 27/12/2004 | **0.039** | **$5.11\times10^{-7}$** |
| 27/12/2004 au 13/07/2005 | **0.007** | **$2.93\times10^{-6}$** |

**Tableau 24**: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 5 du Callovo-Oxfordien argileux du forage EST207.

| Section de mesure EST207 (chambre 11) au LSM/HM | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique Ss($m^{-1}$) |
|---|---|---|
| 09/07/2004 au 27/12/2004 | **0.009** | **$2.12\times10^{-6}$** |
| 27/12/2004 au 13/07/2005 | **0.003** | **$6.17\times10^{-6}$** |

**Tableau 25**: Valeurs des emmagasinements spécifiques déterminées pour la chambre de mesure 11 de l'Oxfordien calcaire du forage EST207.

### 10.5.2 Porosité effective

Nous avons utilisé le même modèle de porosité effective que celui appliqué précédemment (Jacob,1940)(**8.2**).

Afin de calculer la porosité, une analyse croisée a été réalisée entre la pression atmosphérique et la pression corrigée au pas de Δt=30min, et ce dans le but de déterminer la réalité d'un effet dû à la pression barométrique. La fonction de gain est utilisée pour déterminer l'efficience barométrique B.(Figure 122).

La Figure 122 montre la fonction de gain entre Patm et Pcorr dans EST207CH5, et donne l'efficience barométrique BE=0.31% à 24h ce qui donne une porosité très faible d'ordre 0.2%. Les valeurs des porosités dépendent de l'efficience barométrique, et doivent être interprétées avec grande prudence (**voir 10.5.3**).

Nous avons appliqué ces méthodes aux différentes périodes pour les chambres 1, 5 et 11 du forage EST207. Les résultats sont donnés dans les tableaux 26, 27 et 28.

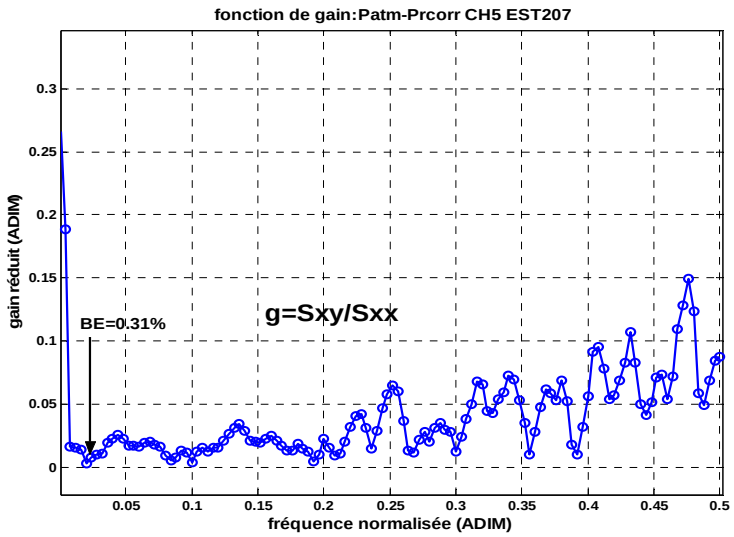



Figure 122: Fonction de gain entre la pression atmosphérique et la pression corrigée dans EST207 CH5, période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min.

| Section de mesure EST207 (chambre 1) au LSM/HM | B(ADIM) | Porosité effective $\phi_{eff}$ (%) |
|---|---|---|
| 16/06/2004 au 27/12/2004 | **0.410** | **17.84% *** |
| 23/01/2005 au 13/07/2005 | **0.026** | **1.25%** |

Tableau 26: Valeurs des porosités effectives dans la chambre 1 du forage EST207 LSM/HM dans le Bathonien (Patm non filrée ; $P^*_{Corr}$ non filtrée).

*La porosité effective calculée sera discuté dans le paragraphe 10.5.3

| Section de mesure EST207 (chambre 5) au LSM/HM | B(ADIM) | Porosité effective ϕeff (%) |
|---|---|---|
| 09/07/2004 au 27/12/2004 | **0.024** | **0.26%** |
| 27/12/2004 au 13/07/2005 | **0.0031** | **0.19%** |

Tableau 27: Valeurs des porosités effectives dans la chambre 5 du forage EST207 LSM/HM dans le Callovo-Oxfordien (Patm non filrée ; $P^*_{Corr}$ non filtrée).

| Section de mesure EST207 (chambre 11) au LSM/HM | B(ADIM) | Porosité effective $\phi_{eff}$ (%) |
|---|---|---|
| 09/07/2004 au 27/12/2004 | **0.017** | **0.78%** |
| 27/12/2004 au 13/07/2005 | **0.003** | **0.41%** |

Tableau 28: Valeurs des porosités effectives dans la chambre 11 du forage EST207 LSM/HM dans l'Oxfordien (Patm non filrée ; $P^*_{Corr}$ non filtrée).

### 10.5.3 La sensibilité des résultats : méthodes de prétraitement

Le test de sensibilité montré dans le tableau 29, illustre les résultats des paramètres hydrauliques calculés pour une chronique et également, pour deux sous-séquences de cette même chronique (chroniques 1 et 2 dans la Figure 123).

| Section de mesure EST207 (chambre 1) au LSM/HM | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique Ss(m-1) | B (ADIM) | Porosité effective ϕeff (%) |
|---|---|---|---|---|
| 16/06/2004 au 27/12/2004 | **0.01** | **$2\times10^{-6}$** | **0.41** | **18%*** |
| 23/01/2005 au 13/07/2005 | **0.009** | **$2.2\times10^{-6}$** | **0.17** | **8%*** |
| 02/06/2004 au 13/07/2005 | **0.009** | **$2.18\times10^{-6}$** | **0.06** | **2.9%*** |

Tableau 29: Valeurs des porosités effectives et emmagasinement spécifique dans la chambre 1 du forage EST207 dans le Bathonien (test de sensibilité trois plages de mesure). Les valeurs marquées (*) sont particulèrement sujettes à caution (voir discussion dans le texte).

La valeur de la porosité dans la première période atteint 18%*. On peut interpréter cette valeur surestimée par le fait que les fluctuations de la pression corrigée sont très importantes par rapport à la pression atmosphérique (BE grand). Les fluctuations rapides correspondent aux phénomènes diurnes et les fluctuations lentes, aux non stationnarités. La porosité calculée pour la deuxième période a passé de 1% à 8%* après prétraitement amélioré de Patm (voir plus bas Figures 124 et 125).

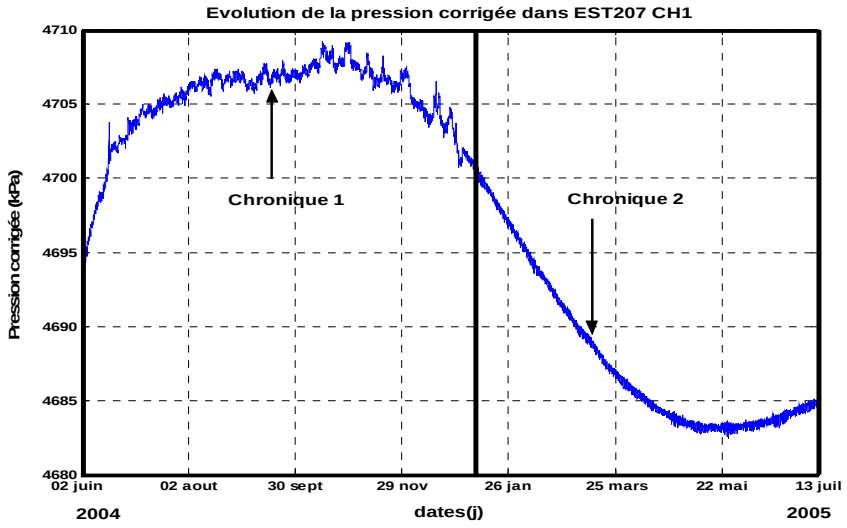



Figure 123: Evolution de la pression $P^*_{Corr}$ dans EST207 CH1, période allant du 02/06/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min.

Ensuite après combinaison des deux chroniques, la valeur de la porosité diminue et vaut 3%. Cette diminution est dûe au non stationnarité de la chronique $P^*_{Corr}$ (chronique 1+chronique 2, figure 123).

Ce test de sensibilité, pourrait être généralisé par des tests de type reéchantillonnage ou autres (Jacknife, Bootstrap).

| Section de mesure EST207 (chambre 11) au LSM/HM | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique Ss($m^{-1}$) | B (ADIM) | Porosité effective ϕeff (%) |
|---|---|---|---|---|
| 09/07/2004 au 27/12/2004 | **0.009** | **$2.12\times10^{-6}$** | **0.01** | **0.4%** |
| 27/12/2004 au 13/07/2005 | **0.003** | **$6.17\times10^{-6}$** | **0.05** | **6.6%** |

**Tableau 30** : Valeurs des porosités effectives et emmagasinement spécifique dans la chambre 11 du forage EST207 dans l'Oxfordien (prétraitement amélioré).

| Section de mesure EST207 (chambre 5) au LSM/HM | ΔH1(m) | Emmagasinement spécifique Ss ($m^{-1}$) | B (ADIM) | Porosité effective ϕeff (%) |
|---|---|---|---|---|
| 09/07/2004 au 27/12/2004 | **0.039** | **$5.11\times10^{-7}$** | **0.036** | **0.4%** |
| 27/12/2004 au 13/07/2005 | **0.007** | **$2.93\times10^{-6}$** | **0.09** | **5.6%** |

**Tableau 31**: Valeurs des porosités effectives et emmagasinement spécifique dans la chambre 5 du forage EST207 dans l'Oxfordien (prétraitement amélioré).

Les tableaux 30 et 31 montrent les résultats des paramètres hydrauliques calculés dans les chambres 5 et 11.

La chronique de Patm analysée initialement était le résultat d'un prétraitement erroné à cause d'un mauvais ajustement du seuil de détection des aberrations (figure 124). Un nouveau prétraitement avec un seuil de détection correct a été effectué, d'où le signal de Patm montré (figure 125).

La fonction de gain (Figure 126), calculée après prétraitement amélioré de la pression atmosphérique, présente un pic secondaire à la fréquence 0.05 (10h). Ceci montre que le choix du calcul de l'efficience barométrique à 24h, doit être examiné avec prudence.

On voit que la porosité effective estimée dépend de l'évolution des pressions corrigées et atmosphériques.

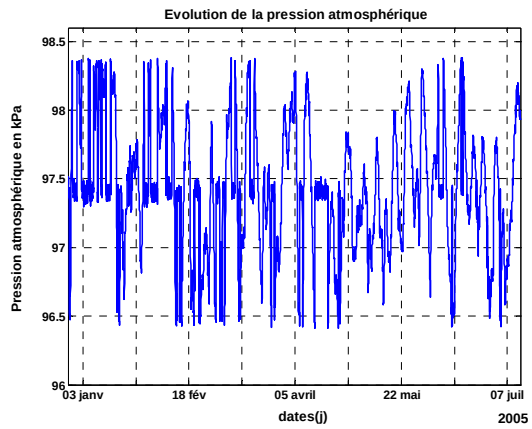



Figure 124: Evolution de la pression atmosphérique (kPa) entre le 27/12/2004 et 13/07/2005 après prétraitement. au pas de temps 30 mn (prétraitment non satisfaisant).

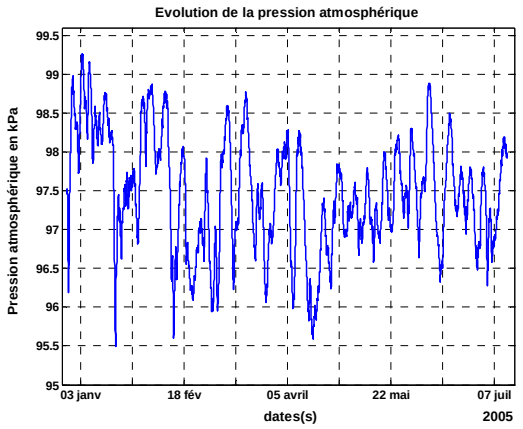



Figure 125: Evolution de la pression atmosphérique (kPa) entre 27/12/2004 et 13/07/2005 après prétraitement. au pas de temps 30 mn (nouveau prétraitement amélioré).

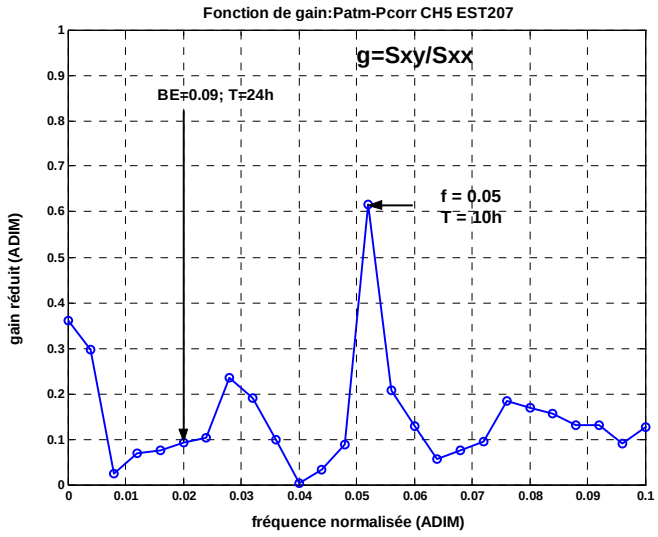



Figure 126:Fonction de gain entre la pression atmosphérique et la pression corrigée dans EST207 CH5, période allant du 27/12/2004 au 13/07/2005 avec un pas de temps Δt=30min (prétraitement amélioré, zoom sur les fréquences (0 0.1).

## *10.6 Conclusion partielle (Meuse/Haute-Marne)*

Les résultats montrent que la formation du Callovo-Oxfordien argileux ainsi que le Bathonien et l'Oxfordien carbonatés se comportent comme des formations captives. Grâce à cette propriété de confinement, il a été possible de déterminer leurs coefficients d'emmagasinement spécifique $S_s$ et leur porosité effective.

Les valeurs de $S_s$ obtenues par les méthodes d'analyse décrites précédemment seraient comprises entre $5.10^{-7}$ $m^{-1}$ et $2.10^{-6}$ $m^{-1}$ pour le Callovo-Oxfordien argileux, soit légèrement inférieures à celles estimées par chocs hydrauliques sur éprouvettes sous chargement triaxial. Elles seraient en revanche du même ordre de grandeur que celles évaluées à partir des modules de Biot (Ozanam et al., 2002) et des valeurs utilisées dans la modélisation des tests in situ, proches de $10^{-6}m^{-1}$ (Delay et al., 2006).

Les valeurs de Ss obtenues pour les encaissants seraient du même ordre de grandeur, voire légèrement supérieures à celles du Callovo-Oxfordien.

La porosité effective diffère d'une formation à l'autre. Elle dépasse le pourcent voire atteint 3.0% dans le Bathonien (intervalle 1) selon la période considérée. Elle varie entre 0.0% et 5.0% dans le Callovo-Oxfordien (intervalle 5) et varie entre 0.0% et 6% dans l'Oxfordien calcaire (intervalle 11). On note une fluctuation des valeurs dans le temps pour l'encaissant calcaire au contraire du Callovo-Oxfordien dont les valeurs sont très faibles et variables. L'analyse de nouvelles chroniques devrait permettre d'expliquer cette variation des valeurs de porosité effective et vérifier les très faibles valeurs de porosité effective déterminées pour le Callovo-Oxfordien.

D'une manière générale, les chroniques étudiées sont vraisemblablement trop courtes pour obtenir des résultats d'emmagasinement spécifique et de porosité effective significatifs et susceptibles d'expliquer les variations enregistrées (e.g. porosité effective sur chambre 1) comme d'identifier des effets à plus long-terme. Nous recommandons donc d'analyser ces chroniques sur des périodes plus longues et sur un plus grand nombre de chambres de mesure. Le forage EST207 se prêterait parfaitement à ce type d'analyse.

On peut également noter que les valeurs de facteur de correction atmosphérique (ACF) fournies par l'Andra avec le tableau de données, sont fonction de la profondeur et du type de formation traversée : les valeurs les plus faibles se trouvent dans la chambre la plus profonde mais on note aussi une valeur plus élevée dans le Callovo-Oxfordien par rapport à celles de son encaissant carbonaté.

Les résultats marqués par un astérisque '*' (ligne 1 Tableaux 29 et 26) de porosité effective sont en cours de révision vu les dernières analyses qui ont fait apparaître une sensibilité du résultat selon la plage de données utilisées et /ou selon la plus au moins forte non-stationnarité du signal Prel(t). Ceci nécessite une approche différente en cours de développement.

# *Conclusions générales et recommandations*

## *Conclusions générales pour les sites d'argilites*

L'objectif de cette étude a été de traiter les séries temporelles de pression, de température et d'humidité relative acquises au laboratoire de recherche souterrain du Mont Terri (Suisse), et les séries temporelles de pression relative et atmosphérique acquises sur les sites de Tournemire et Bure (ANDRA), afin de les valoriser par les analyses suivantes.

- Mise en évidence des effets de la pression barométrique, et des marées terrestres à court, moyen et long terme sur les pressions mesurées.
- Estimation des caractéristiques hydrauliques des formations de l'argile à Opalines en les comparant à celles déduites de la littérature (Tableau 8).
- Estimation des caractéristiques hydrauliques de la formation argileuse du Toarcien supérieur de Tournemire.
- Estimation des caractéristqiques hydrauliques de la formation du Callovo-Oxfordien argileux et carbonatés du Bathonien et de l'Oxfordien du site de Bure.
- Analyse des effets du creusement d'une galerie en 1998 sur l'évolution des propriétés hydrauliques et des pressions des pores dans le site de Mont Terri.
- Analyse des effets du creusement d'une galerie en 2003 sur l'évolution des propriétés hydrauliques et pressions interstitielles dans le site de Tournemire.
- Analyse des effets de la fracturation sur la détermination des paramètres hydrauliques dans les forages TN2 et M2 du site de Tournemire.

❖ <u>Mont Terri</u> :

Parmi les mesures traitées dans cette étude, nous traitons celles qui proviennent du forage BPP-1 du Mont Terri situé dans la niche PP et équipé de deux sections de mesure PP1 et PP2. Ce forage capte la couche d'argile à Opalines au niveau du faciès argileux.

Ce forage est équipé d'un capteur de pression absolue et de température par section de mesure. Tous les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition commune à d'autres forages. Les données sont enregistrées depuis près de 9 ans.

Dans le cas du Mont Terri, où l'on a pris en main les chroniques de données les plus longues (1996 à 2005) les problèmes de lacunes, aberrations, inhomogénéité du $\Delta t$ d'acquisition, ont finalement nécessité l'application systématique de méthodes de pré-traitement. Celles-ci ont permis d'obtenir des chroniques plus homogènes et relativement longues (~1.5 année) mais forcément moins longues que les quelques 9 années disponibles en signaux bruts. Ainsi, la chronique de pression prétraitée la plus longue ne fait plus que 13 mois, soit 10% de la durée totale exploitée.

Il a été possible d'analyser les données par « séquences » de signaux sur une durée totale de près de 3 ans pour la pression des pores dans PP1 et d'environ 4 ans et demi pour PP2 (la plus longue séquence continue est de 13 mois dans PP1, 18 mois dans PP2). Toutes ces chroniques ont pu être analysées et comparées aux chroniques de pression atmosphériques (kPa). Les analyses corrélatoires, spectrales, ondelettes continue de Morlet et les analyses ondelettes multirésolutions de toutes ces chroniques ont été comparées à l'analyse d'une chronique dépourvue d'anomalie (lacunes, aberration,…) d'une durée d'un mois.

Nous avons aussi traité presque 5 années de données d'humidité relative et de température en séries discontinues (2 ans pour la plus longue avec un pas d'acquisition de 30 min), en utilisant les analyses corrélatoires, et spectrales, des bruits 1/f, l'analyse en ondelette continue et multi-résolution simple.

Les résultats suggèrent que l'argile à Opalines se comporte au Mont Terri comme une formation captive ou sans doute partiellement captive. Nous avons aussi pu noter que pendant l'excavation de la galerie Ga98, la pression interstitielle a augmenté, masquant les effets de la marée terrestre (17/11/97-23/04/98) qui demeure toujours présente malgré tout (Figure 71). Cette pression interstitielle a ensuite diminué après l'excavation.

Grâce à cette propriété de confinement, il a été possible de déterminer certains paramètres hydrauliques : le coefficient d'emmagasinement spécifique Ss (*specific storativity*), et la porosité effective $\phi$ (*effective porosity*). Les valeurs calculées sont comparables à celles estimées en particulier par Nussbaum et Bossart (2004), et comprises entre $3.10^{-5}$ et $4.10^{-7}$ $m^{-1}$ pour le coefficient Ss.

Les valeurs de $S_s$ sont relativement homogènes, dans le temps et varient entre $1.6\times10^{-7}$ $m^{-1}$ et $4.2\times10^{-7}$ $m^{-1}$ pour PP1 et entre $1.9\times10^{-7}$ $m^{-1}$ et $6.17\times10^{-7}$ $m^{-1}$ pour PP2. La porosité effective quant à elle varie entre 0.0% et 5%. Les valeurs les plus basses de l'emmagasinement spécifique et de la porosité effective sont respectivement $1.6\times10^{-7}$ $m^{-1}$ et 0.0% et correspondent au passage de l'excavation à la proximité de la section de mesure PP1. Nous pouvons conclure que l'excavation de la galerie 1998 a provoqué un changement des caractéristiques hydrauliques de la formation d'argile détectable par traitement de signal.

Enfin la comparaison des variations d'humidité relative et de température indique que ces paramètres sont liés l'un à l'autre et dépendent tous les deux de la pression atmosphérique mesurée dans la galerie de sécurité.

En perspective, dans le futur nous utiliserons pour le prétraitement une méthode encore plus performante basée sur la probabilité conditionnelle de Bayes qui permet d'améliorer la reconstitution des données manquantes et aberrantes.

- Tournemire :

Les mesures traitées qui proviennent du site de Tournemire montrent que la formation argileuse du Toarcien supérieur de Tournemire captée par le forage PH2 se comporte comme une formation captive ou partiellement confinée. Grâce à cette propriété de confinement, il a été possible de déterminer là aussi le coefficient d'emmagasinement spécifique Ss et la porosité effective.

Les valeurs obtenues par les méthodes d'analyse décrites précédemment, pour les chroniques de pression observées dans les formations d'argilite du site de Tournemire, sont comparables à celles estimées par les tests hydrauliques dont les valeurs reportées par Boisson et al (1998) sont comprises entre $3.10^{-7}$ $m^{-1}$ et $1.10^{-6}$ $m^{-1}$. Ceci démontrerait que les essais hydrauliques, qui ont un rayon limité autour de l'ouvrage, donneraient une estimation de ce coefficient extrapolable à l'échelle du massif, puisque les méthodes de traitements des chroniques intègrent le comportement global de la formation.

Les valeurs de $S_s$ calculées par les méthodes d'analyse des chroniques de pression sont de l'ordre de $5.4\ 10^{-7}$ à $1.10^{-6}$ $m^{-1}$ dans la formation d'argile de Toarcien de Tournemire. La porosité effective varie de moins de 1% à près de 5% et varierait dans le temps,

probablement en fonction de la pression et de l'évolution de l'EDZ (**Figure 92**). Pendant la période d'excavation de la galerie (2003), nous avons constaté dans la section de mesure PH2(1), une diminution de l'emmagasinement spécifique ($9.67\times10^{-8}$ $m^{-1}$) par rapport à la période qui à précédé l'excavation ($1.06\times10^{-6}$ $m^{-1}$) puis à une ré-augmentation après l'excavation ($9.89.10^{-7}m^{-1}$). Pour la porosité effective, on note aussi une diminution pendant l'excavation et une ré-augmentation après excavation suivie d'un retour à l'équilibre.

On peut conclure que le passage de l'excavation à côté de la section de mesure PH2(1) a provoqué un changement des paramètres hydrauliques qui s'est traduit par une diminution de l'emmagasinement spécifique et de la porosité effective.

Enfin, à partir des analyses des pressions interstitielles dans les forages TN2 et M2 qui coupent les formations fissurées du site de Tournemire effectuées dans une étude ultérieure, il a pu être montré que la marée terrestre est « invisible » dans les milieux fissurés. Ces milieux se comportent donc comme non confinés.

En perspective nous aborderons la possibilité d'estimer la perméabilité K à partir de l'étude de déphasage des réponses entre PH2(1), PH2(2) et PH2(3).

- ❖ <u>LSM/HM (Bure)</u> :

Enfin, au Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute Marne (Bure) la formation du Callovo-Oxfordien argileux ainsi que le Bathonien et l'Oxfordien carbonatés se comportent également comme des formations partiellement captives. Grâce à cette propriété de confinement, il a été possible de déterminer leurs coefficients d'emmagasinement spécifique $S_s$ et leurs porosités effectives.

Les valeurs de $S_s$ obtenues par les méthodes d'analyse décrites précédemment seraient comprises entre $5.10^{-7}\ m^{-1}$ et $2.10^{-6}\ m^{-1}$ pour le Callovo-Oxfordien argileux, soit légèrement inférieures à celles estimées par chocs hydrauliques sur éprouvettes sous chargement triaxial. Elles seraient en revanche du même ordre de grandeur ($10^{-6}\ m^{-1}$) que celles évaluées à partir des modules de Biot par Ozanam et al. (2002) ainsi qu'aux valeurs utilisées dans la modélisation des tests *in situ* (Delay et al., 2006).

Les valeurs de Ss obtenues pour les encaissants seraient du même ordre de grandeur, voir légèrement supérieures à celles du Callovo-Oxfordien.

La porosité effective diffère d'une formation à l'autre. Elle dépasse 1% voir atteint 3.0% dans le Bathonien (intervalle 1) selon la période considérée. Elle varie entre 0.4% et 5.0% dans le Callovo-Oxfordien (intervalle 5) et varie entre 0.4% et 6% dans l'Oxfordien calcaire (intervalle 11). On note une fluctuation des valeurs dans le temps pour l'encaissant calcaire au contraire du Callovo-Oxfordien dont les valeurs sont très faibles et constantes. L'analyse de nouvelles chroniques devrait permettre d'expliquer cette variation des valeurs de porosité effective et vérifier les très faibles valeurs de porosité effectives déterminées pour le Callovo-Oxfordien.

D'une manière générale, les chroniques étudiées sont vraisemblablement trop courtes pour obtenir des résultats d'emmagasinement spécifiques et de porosité efficace significatif et susceptibles d'expliquer les variations enregistrées (e.g. porosité effective sur chambre 1) comme d'identifier des effets à plus long-terme. Nous recommandons donc d'analyser ces chroniques sur des périodes plus longues et sur un plus grand nombre de chambres de mesures. Le forage EST207 se prêterait parfaitement à ce type d'analyse.

On peut également noter que les *valeurs* du facteur de correction atmosphérique *(ACF - Atmospheric Correction Factor)* dépendent de la profondeur et du type de formation traversée : les valeurs les plus faibles se trouvent dans la chambre la plus profonde, mais on note aussi une valeur plus élevée dans le Callovo-Oxfordien par rapport à celle de son encaissant carbonaté. Nous avons recalculé les valeurs de l'ACF par intercorrélation de Pabs(t) et Prel(t) en analyse ondelette (composantes 24h) et par régression linéaire 'globale'. Ces résultats sont en cours d'analyse ; ils peuvent mener à court terme à une autre définition de la notion de gain barométrique en comparaison avec le gain fréquentiel.

En conclusion, en ce qui concerne l'effet barométrique, les porosités obtenues à partir de l'analyse du gain fréquentiel réduit (gain spectral entre pression atmosphérique et pression relative) doivent être considérées avec grande prudence. Les perspectives sur l'étude du transfert de pression atmosphérique dans les formations semi-perméables, et sur leur comportement confinés ou partiellement confiné, restent ouvertes. Quoiqu'il en soit, les porosités obtenues sont certainement à interpréter comme des porosités effectives 'dynamiques' ou 'élastiques'.

Il reste clairement des améliorations à apporter aux interprétations (signaux de pression) mises en oeuvre dans ce travail, notamment concernant l'analyse croisée des signaux de pression atmosphérique et de pression relative en vue d'identifier l'effet barométrique (d'où l'on tire la porosité effective ayant déjà déterminé l'emmagasinement spécifique). En effet, des tests partiels ont montré que, pour certaines chroniques, la porosité effective ainsi déterminée était peu fiable et/ou peu robuste par rapport au choix de la plage de donnée analysée.

Ces problèmes d'interprétation (localisé à certaines chroniques) ont été à peu près identifiés et analysés. Ils sont semble-t-il directement liés à la forte non-stationnarité du signal de pression interstitielle (absolue et relative). Cette analyse devrait mener à court terme à une modification de notre technique de calcul de l'effet barométrique via la notion de gain, de façon à obtenir une estimation plus robuste de la porosité effective dans les quelques cas « difficiles ». Dans la plupart des cas (sauf ceux notés explicitement dans le texte), cette modification de traitement ne devrait pas modifier sensiblement les porosités effectives obtenues jusqu'ici.

L'existence d'un effet barométrique sur la pression relative (gain et ACF) peut s'expliquer comme suit :

i) L'effet barométrique serait dû au confinement, total ou partiel du milieu. Le coefficient d'efficience barométrique dans un aquifère confiné représente le rapport entre la pression relative et la pression atmosphérique (Jacob 1940). Ce coefficient est habituellement compris entre 20% et 75% pour des aquifères dits confinés (Freeze et Cherry, 1979 ; Todd, 1959).

ii) Le confinement est confirmé par la présence du pic semi-diurne de la marée terrestre dans la pression relative analysée sur les trois sites (Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute Marne). Ce pic semi-diurne a aussi été observé par d'autres (Mangin et Marsaud, 1984).

❖ Synthèse :

En résumé, la synthèse des trois sites montre trois catégories de milieux :

- Des milieux 'sains' : les argilites à Opalinus du Mont Terri etudiées par le forage BPP-1 (section PP1 et PP2) ; la formation du Toarcien de Tournemire capté par le forage PH2 chambres 1, 2 et 3. Et la formation du Callovo-Oxfordien argileux ainsi que le Bathonien et l'Oxfordien carbonatés de site Bure capté par le forage EST207 chambres 5, 1 et 11. Le point commun entre ces types de formations qu'elles se comportent comme les formations confinées ou partiellement confinée. La présence de la marée terrestre nous a permis de déterminer certains paramètres hydrauliques.
- Des milieux ayant vu apparaître une zone endomagée par l'excavation (EDZ), associés aux perturbations d'origine anthropique liées au comportement hydro-mécanique de la roche lors du creusement de galeries. Il s'agit des galeries Ga98 dans le site de Mont Terri, et Ga2003 dans le site de Tournemire. Dans ces types de formations, il y a eu un masquage de l'influence des marées terrestres, même si elle est demeurée toujours présente. Nous avons pu aussi observer un changement sur les paramètres hydrauliques calculés avant, pendant et après l'excavation.
- Des milieux fracturés. Ce type de formation est observé dans les forages TN2 et M2 de Tournemire (grandes fractures transmissives d'origine tectoniques). Les analyses précédentes montrent que dans ce type de formation la marée terrestre est invisible. Le milieu se comporte donc comme un aquifère libre et aucun paramètre hydraulique ne peut être déterminé par nos méthodes.

### *Recommandations spécifiques à l'expérience LP du Mont Terri*

Notre recommandation principale pour le consortium du Mont Terri est donc de mettre à disposition une centrale d'acquisition dédiée au seul forage BPP-1 et aux données atmosphériques. Ceci afin de ne pas subir l'interférence des autres forages (*e.g.* lors des tests hydrauliques) et de récupérer des données exemptes d'anomalies avec un pas d'acquisition constant, de préférence de 30 min ou si possible nettement inférieur afin d'améliorer l'analyse ondelette en échelle dyadique.

Les données atmosphériques de pression, humidité et de température acquises dans la galerie de reconnaissance pourraient de même être raccordées à cette centrale. Pour ce genre de traitement à très long terme, il serait préférable à l'avenir d'utiliser (en plus des capteurs de pression absolue) des capteurs de pression relative pour les mesures de pression interstitielle et ce, afin d'éviter les éventuels effets de déphasage avec la pression atmosphérique.

L'idéal serait donc de disposer de mesures directes de $P_{REL}(t)$ par des capteurs de pression relative, en plus des capteurs de mesures de $P_{ABS}(t)$ et des capteurs de $P_{ATM}(t)$, ceci afin de disposer au total d'un meilleur contrôle des trois variables ($P_{ABS}(t)$, PATM(t), $P_{REL}(t)$) du point de vue du traitement des signaux.

En résumé, pour l'expérience LP du Mont Terri :

- ♦ Recommandation 1 : Centrale d'acquisition dédiée au forage BPP1.
- ♦ Recommandation 2 : Mesure directe de pression relative
- ♦ Recommandation 3 : Mesure directe de pression atmosphérique dans la niche PP.

- Recommandation 4 : Δt constant et plus petit, de manière à améliorer les analyses fréquentielles et les analyses ondelettes dyadiques (Δt $\approx$ *2 mn à 4 mn et très inférieur à 30 mn si possible*).

Par ailleurs, nous étudions actuellement l'intérêt d'acquérir des profils de capteurs ou de pression assez rapprochés spatialement avec Δx << 1m. Rappelons que dans le forage BPP-1, nous disposons de deux capteurs dans les chambres PP1 et PP2 respectivement, distantes de 1.65m. L'analyse d'interférences et de déphasage spatiaux capteur-capteur serait facilitée par l'existence d'une ligne de capteurs relativement proches les unes des autres (Δx << 1m).

## *Perspectives :*

Jusqu'à présent, on s'est intéressé aux effets des fluctuations de pression à court terme (semi-diurne et diurne) ; cependant les durées des chroniques analysées (après post-traitement) ne dépassaient pas un an et demi. Dans le futur, nous essayerons d'analyser les fluctuations de plus long terme, tels que les cycles saisonniers. Les outils conceptuels utilisés jusqu'ici peuvent être valorisés dans ce cadre (intercorrélations temporelles, analyse spectrale Fourier, et analyse ondelettes).

Pour les sites d'argilite, il existe déjà quelques chroniques d'une dizaine d'années ou plus, mais dans certains cas, la durée exploitable est plus faible, d'où l'intérêt de développer en parallèle des méthodes de prétraitement efficace pour reconstruire des chroniques à long terme. Ces méthodes de reconstruction peuvent être basées, moyennant certaines extensions sur les prétraitements développés dans cette thèse (par exemple, méthodes bayesiennes paramétriques ou non).

Nous pouvons également inclure directement des signaux astronomiques dans nos analyses (fluctuations gravimétriques) ainsi que les chroniques de données sur le comportement mécanique des argilites (déplacements, taux de déformations). La prise en compte de ces signaux peut mener à une meilleure analyse des effets de marée terrestre.

D'autre part, on s'est penché tout au long de cette thèse sur l'analyse croisée entre deux signaux (Patm(t), Prel(t)). Dans le futur, nous envisageons d'analyser conjointement, dans un cadre plus général, une collection de 'N' chroniques de données acquises dans différents capteurs. De plus, ce type d'approche s'appliquera aussi au prétraitement conjoint des 'N' signaux. Car ceux-ci souffriront certainement de problèmes de lacunes, valeurs aberrantes, ou temps d'acquisition irréguliers, de façon non synchrone.

Dans ce rapport nous avons effectué des tests partiels de l'influence des paramètres de prétraitement et d'analyse sur les résultats des analyses statistiques. Cependant il n'y a pas un test systématique pour toute la chaine de traitement. Pour cela, il faudrait peut être générer par modélisation hydromécanique une réalité virtuelle complète (ε(t), P(t), Patm(t), g(t),…..).

Enfin, on l'a déjà souligné, les modèles hydromécaniques utilisés dans cette étude sont des modèles élastiques simplifiés. Ils sont basés notamment sur la loi de Hooke et sur le modèle de contrainte effective de Terzaghi et ils dépendent de plus d'une estimation indirecte du taux de déformation dû aux marées terrestres. Nos calculs de coefficients couplés hydromécaniques (poro-élastiques) indiquent que le coefficient de Biot ($\beta$) est significativement inférieur à l'unité. Or le modèle de Terzaghi que nous avons utilisé correspond au cas spécial où $\beta = 1$.

Dans le futur, nous considérons donc la possibilité d'inclure directement le modèle couplé de Biot dans notre interprétation des signaux de pression (effet barométrique, etc.). De plus, à terme, il serait certainement utile de combiner à nos analyses des signaux, un modèle spatio-temporel couplé des transferts hydromécaniques (Système d'Equations aux Dérivées Partielles). Les méthodes permettant de combiner ces deux types d'informations restent à développer, par exemple dans le cadre des problèmes inverses ou de l'assimilation de données.

# *ANNEXES*

*ANNEXE 1 :*

# Structure et contenu des boites à outil Matlab pour prétraitement et analyse des chroniques des données (Structure and contents of Matlab toolboxes for pre-processing and analysis of time series)

## 1.1 : Pré-traitement (*Pre-processing*)

### 1.1.1) Description du programme principal « appelant » :

#### a. Appel de la fonction F1_PLAGSEQ.m (indexe lacunes)

Cette fonction (PLAGSEQ = PLAGES SEQUENTIELLES) est appelée plusieurs fois dans le programme principal :

- Dans un premier temps le programme commence par la Lecture de fichier X(t) sous forme tableau rectangle (6 colonnes, 9 colonnes,…), plus flexible ici avec d'autre options de lecture de X(t) et T(t) séparés. Changement éventuel (facultatif) du type de marker de lacunes.
- Elle permet aussi de faire l'extraction du tronçon continu le plus long, puis calcule complet des pointeurs répertoriant toutes les plages de lacunes par leur ensemble complémentaire toutes les plages de données contiguës.
- En particulier (aussi) dans le cas ou il y a des lacunes en début/fin
- (début et/ou fin de chronique, i.e sur le 1er et/ou le dernier Δt). Dans ce dernier cas, la décision est prise de tronquer le fichier X(t), On élimine la plage de lacunes de gauche et/ou celle de droite ,X(t).et Plot et sauvegarde de la nouvelle chronique X(t), le cas échéant

#### b. Appel de la fonction F2_STATISTIC.m

Cette fonction est appelée avant et après détections de valeurs aberrantes avant et après reconstitutions des lacunes.

Elle permet de calculer les paramètres statistiques de la chronique et de les enregistrer dans un fichier STATISTICS_INOS_N°(1,2…)

- Xmean : valeur de la moyenne constante pondérée (Δt variable)

  De la plus long séquence continue Xsubseq
- Xmoy1 : valeur de la moyenne constante pondérée (Δt variable hors lacunes)
- Xmoy0_MOB: valeur de la moyenne de la moyenne mobile
- Xmoy0 : valeur de la moyenne constante pondérée (Δt variable y compris les lacunes)
- Xsig00 : valeurs de l'écart type du signale xnew00 (lacunes reconstitué par la moyenne Xmoy1).
- Xsig_MOB : valeur de l'écart type de la moyenne mobile
- Xsig_MOBMM : valeur de l'écart type de xnew00(t) autour de sa moyenne mobile XMOYMOB(i)

#### c. Appel de la fonction F3_DETECTION.m

Cette fonction permet d'utiliser différents critères de détections des valeurs aberrantes (Outlier, spurious data, or aberrations) :

- détection des valeurs aberrantes par critère du seuil entre deux valeurs successives(X(i+1) et X(i))
- détection des valeurs aberrantes par critère du seuil basé sur la distance à la moyenne globale à Δt variable
- détection des valeurs aberrantes par le critère du seuil basé sur la distance à la moyenne mobile (locale)
- détection des valeurs aberrantes par le critère du seuil basé sur la distance à la moyenne mobile (locale) avec l'écart type de x(t) autour de sa moyenne mobile

### d. Appel de la fonction F4_RECONSTITUTION.m

Cette fonction permet de faire la reconstitutions préliminaires des lacunes dans un premier temps avec les méthodes expliques ci-dessous :

- Reconstitution par moyenne constante pondérée à Δt variable hors lacunes (Xmoy1)
- Reconstitution par moyenne constante globale pondérée à Δt variable (Xmoy0)
- Reconstitution par moyenne mobile à Δt variable (Xmoy0_MOB)

Et dans un deuxième cas avec d'autres méthodes plus générales explicites montrés suivant :

- Reconstitution par HYDRAT (valeur antérieure, postérieur)
- Reconstitution par moyenne mobile à Δt variable
- Reconstitution par interpolation linéaire modèle : 1 lacunes isoles
- Reconstitution par interpolation linéaire modèle : 2 groupe de lacunes
- Reconstitution par modèle autorégressive signal stationnaires en construction
- Reconstitution par modèle bayésienne (Ximul) en cour d'étude….

Cette fonction fais appel à une autre fonction nommé F4_RECONS_AR1.m qui permet de faire la reconstitution en utilisant le modèle autorégressif pour les chroniques stationnaire

La fonction F4_RECONSTITUTION.m est appelée par le programme principale M0_PREPROCESS.M

### e. Appel de la fonction F5_FRACTION

Cette fonction est appelée sauf si on a un très grand nombre de lacunes non reconstituables. Il existe deux options : F5_FRACTION1.m fractionnement basé sur la plage de lacune la plus grand NxLac , et F5_FRACTION2.m fractionnement basé sur le seuil minimal du pas de temps dt_SEUIL (exemple : deux jours).

### f. Appel de la fonction F6_HOMOGENEISATION.m

Cette fonction est appelée sauf si notre signal est reconstitué et qui ne demande pas de fractionnement. Son objectif est l'homogénéisation du pas de temps Δt(i) dans une chronique ayant un Δt(i) variable.

L'algorithme est de tout ramener à un Δt_max constant qui s'appelle (Dt_HOM).

On distingue deux cas :

- Tous les Δt(i) sont diviseurs exacts de Δt_max, dans ce cas on ne fait que sélectionner des temps t(k*i).
- Au moins un des Δt(i) n'est pas diviseur exact de Δt_max, dans ce cas on procède à des interpolations linéaires.
- Si de plus il existe des Δt(i) >> Dt_HOM, l'algorithme d'interpolation linéaire doit être formulé plus généralement.

Il existe une autre option d'homogénéisatrices des pas de temps utilisant un temps de décalage. Cette fonction est utilisée plus haut pour l'analyse croisée F6_HOMOGENAISATIONbeta.m.

### g. Appel de la fonction F8_SYNCHRONISATION.m

Ce programme contient les étapes suivantes :

- Importation du tableau 1 qui contient temp1 et X1(t) après homogénéisation des pas de temps Δt variable.
- Importation du tableau2 qui contient temp2 et X2(t) après homogénéisation des pas de temps Δt variable.
- Calcul du temps Tdebut_T1T2 (la valeur maximale du temps absolu au début correspond aux vecteurs Temp1(1) et Temp2(1)).
- Nous choisissons la valeur DT_HOM, le pas du temps après homogénéisation qui sera commune aux deux vecteurs Temp1 et Temp2.
- Nous choisissons la valeur tdebut (Temps absolu en début de la chronique à homogénéiser, qui devrait être commune pour les deux vecteurs Temp1 et Temp2.

En général, la valeur tdebut prend la valeur Tdebut_T1T2 = max(Temp1(1), Temp2(1)), sinon on pourra choisir une autre valeur plus grande mais pas plus petite que Tdebut_T1T2.

- test sur tdebut (si Temp2(1)>=Temp1(N1)) ou (Temp1(1)>=Temp2(N2)). On ne pourra pas faire l'homogénéisation car le programme s'arrête. Sinon, on fait appel aux étapes suivantes :
- calcul de tdecal le temps de décalage entre Tdebut_T1T2 et Temps1(i) ou Temp2(i).

Cette fonction fait appel à la fonction F6_HOMOGENAISATIONbeta.m, pour faire l'homogénéisation du pas de temps de la première chronique choisie X1(t).

### h. Appel de la fonction F7_TRONCATION.m

Cette fonction est appelée pour l'analyse croisée, donc il faut charger deux chroniques.

Voici l'algorithme de la fonction de troncation des chroniques :

Calcul de tdebut_XT, tfin_XT, ip1_debut; ip2_debut; ip1_fin ; ip2_fin :

- tdebut_XT : la valeur maximale du temps absolu au début entre les vecteurs Temp1(1) et Temp2(1).
- tfin_XT : la valeur minimale du temps absolu à la fin entre les vecteurs Temp1(N1_NEW) et Temp2(N2_NEW).
- test : si tdebut_XT>tfin_XT, le programme s'arrête.

Calcul des indices suivants:

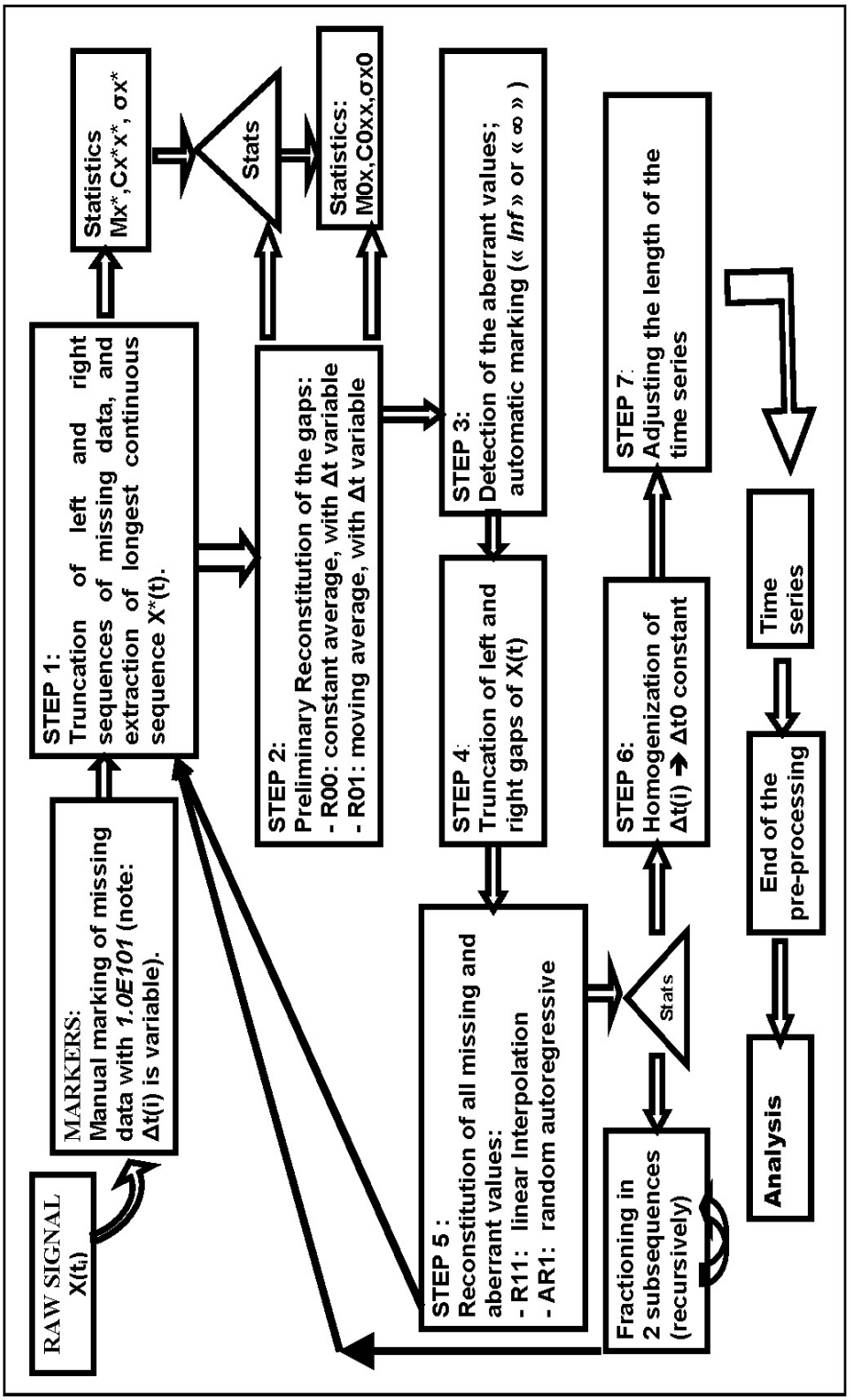
- ip1_debut : indice qui correspond à tdebut pour le vecteur Temp1.
- ip2_debut : indice qui correspond à tdebut pour le vecteur Temp2.

- ip1_fin : indice qui correspond à tfin pour le vecteur Temp1.
- ip2_fin : indice qui correspond à tfin pour le vecteur Temp2.

### 1.1.2) Listes des fonctions « PRE-TRAITEMENT » :

a) F1_PLAGSEQ.m
b) b) F2_STATISTIC.m
c) F3_DETECTION.m
d) F4_RECONSTITUTION.m
e) F4_RECONS_AR1.m
f) F5_FRACTION1.m
g) F5_FRACTION2.m
h) F6_HOMOGENAISATION.m
i) F6_HOMOGENAISATIONbeta.m
j) F7_TRONCATION.m
k) F8_SYNCHRONISATION.m

### 1.1.3) Organigramme de pré-traitement :




APPENDIX : Flowchart of Pre-Processing Tasks

### 1.1.4) Prétraitement : test de reconstitution de lacunes de Patm (2 ans) à l'aide du modèle AR1

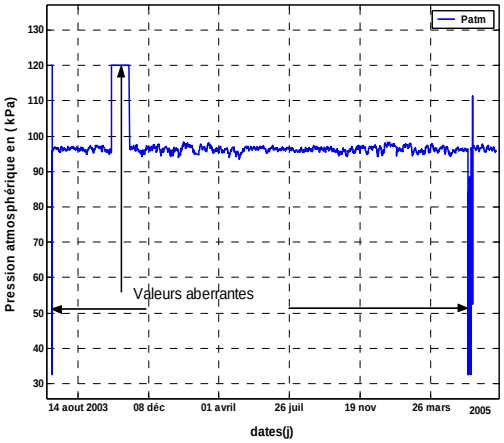



Figure 1.1 : Evolution de la pression atmosphérique X(t) avant détection des valeurs aberrantes, avec Δt variable, pour la période (03/07/2003-30/06/2005), mesurée dans la galerie de sécurité de site du Mont Terri.

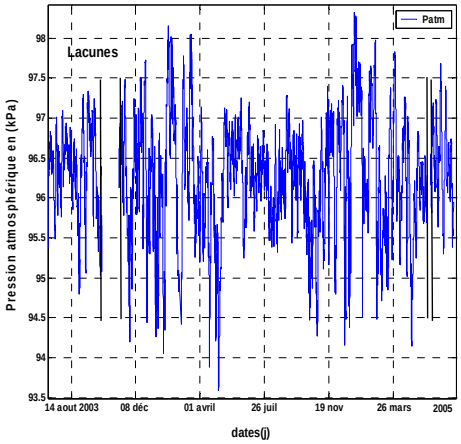



Figure 1.2 : Evolution de la pression atmosphérique après détection des valeurs aberrantes, $X_d(t)$ remplacer par des lacunes avec Δt variable, pour la période (03/07/2003-30/06/2005), mesurée dans la galerie de sécurité de site du Mont Terri.

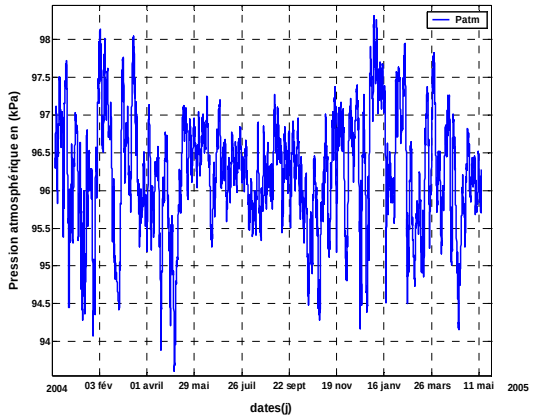



Figure 1.3 : Evolution de la subséquence continue la plus longe $X_{sub}(t)$ de pression atmosphérique avec Δt=30 min, pour la période (11/12/2003-30/06/2005), mesurée dans la galerie de sécurité du site du Mont Terri.

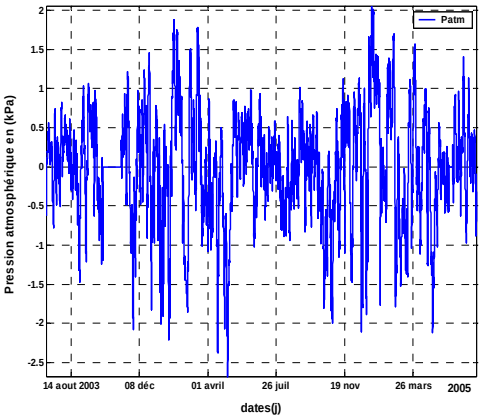



Figure 1.4 : Evolution du résidu $X_r(t)$ de la pression atmosphérique $X_0(t)$ après reconstitution préliminaire des lacunes par moyenne constante pondéré à Δt variable, pour la période (03/07/2003-30/06/2005), mesurée dans la galerie de sécurité de site du Mont Terri.

| | Δt=30 min | Δt variable |
|---|---|---|
| Moyenne de $X_{sub}(t)$ | 96.24 | 96.24 |
| Ecart type de $X_{sub}(t)$ | 0.76 | 0.76 |
| Variance de $X_{sub}(t)$ | 0.58 | 0.58 |

Tableau 1-1 : Moments statistiques de la chronique de pression atmosphérique originale $X_{sub}$ pour Δt constante, (Δt=30 min) et Δt variable.

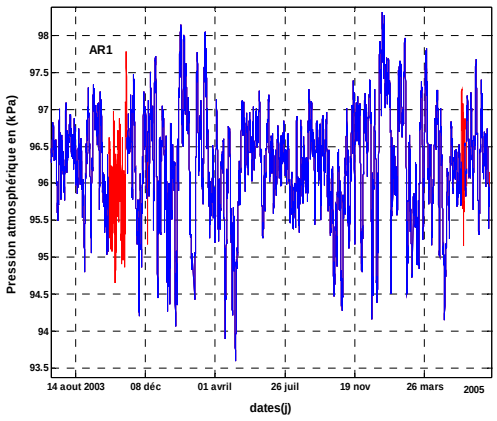



Figure 1.5 : Evolution de la pression atmosphérique après reconstitution des lacunes par AR1 $X_{AR1}(t)$ avec Δt variable, pour la période (03/07/2003-30/06/2005), mesurée dans la galerie de sécurité du site du Mont Terri.

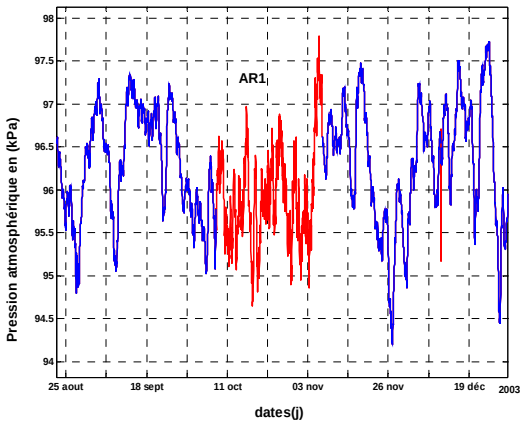



Figure 1.6 : Evolution de la pression atmosphérique après reconstitution AR1 des lacunes $X_{AR1}(t)$ avec Δt variable, Zoom sur la période (25/08/2003-19/12/2003), mesurée dans la galerie de sécurité de site du Mont Terri.

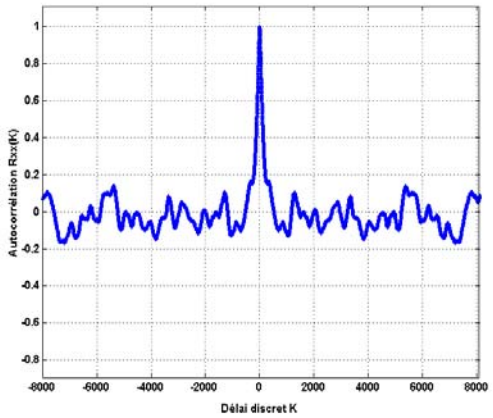



Figure 1.7 : Fonction de corrélation Rxx(k) de la sub-séquence la plus longe $X_{sub}(t)$, de pression atmosphérique mesurée dans la galerie de sécurité du site du Mont Terri avec Δt=30min, M=±8000 période du (11/12/2003 au 30/06/2005)

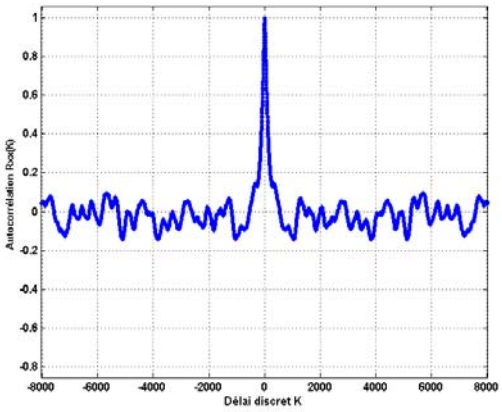



Figure 1.8 : Fonction de corrélation Rxx(k) du chronique $X_{AR1}(t)$ de la pression atmosphérique après reconstitution des lacunes et homogénéisation des pas de temps Δt mesurés dans la galerie de sécurité du site du Mont Terri avec Δt=30 min, M=±8000 période du (03/07/2003-30/06/2005)

| | Δt=30 min | Δt variable |
|---|---|---|
| Moyenne de $X_{AR1}(t)$ | 96.25 | 96.25 |
| Ecart type de $X_{AR1}(t)$ | 0.71 | 0.71 |
| Variance de $X_{AR1}(t)$ | 0.50 | 0.50 |

Tableau 1-2 : Moments statistiques de la chronique de pression atmosphérique après reconstitution des lacunes par AR1 pour Δt constante (Δt=30 min) et Δt variable.

## 1.2. Analyse (*statistical analyses of time series*)

### 1.2.1) Description du programme principal « appelant » :

#### a. Appel de la fonction FILTER_DATA.m

Cette fonction est spécifique à la pression. Elle permet de passer de la pression interstitielle de pore en kPa à la pression relative kPa, en faisant la soustraction de la pression atmosphérique afin d'éviter l'effet d'interférence de la pression atmosphérique avec la pression de pore.

#### b. Appel de la fonction MOYMOB.m

Cette fonction permet de calculer la moyenne mobile d'une chronique même quand $\Delta t$ est variable, en choisissant le demi fenêtre wt en unité de temps et le nombre de la taille (Wmax) de cette demi fenêtre, en nombre de « $\Delta t$ « (ex :Wmax=0), puis de calculer le résidu.

#### c. Appel de la fonction CORRELOGRAM.m

Cette fonction permet de faire un calcul du corrélogramme univarié, avec x le fichier à traiter,

k le pas choisi et m la troncature. Cette dernière doit être obligatoirement inférieure ou égale à N/3.

Le résultat de cette fonction donne le corrélogramme noté R.

#### d. Appel des fonction SPECTRE.m et SPECTRE1.m

Ces fonctions sont basées sur la transformée de Fourier discrète. Leur but est de calculer le spectre simple avec la méthode Jenkins et Watts, x le fichier à traiter, k le pas choisi et m la troncature.

Cette dernière doit être obligatoirement inférieure ou égale à N/3. La fenêtre utilisée est celle de Tukey. Le résultat donne le vecteur S en fonction de la fréquence adimensionnelle (spectre.m), puis S1 en fonction de la fréquence en Hz (spectre1.m).

#### e. Appel de la fonction LOGSPECTRE.m

Elle permet de faire l'étude du bruit, de calculer le spectre en coordonnées logarithmiques, x étant la série à traiter. Le résultat correspondant est le vecteur lS.

#### f. Appel de la fonction CROSCORRELOGRAM.m

Cette fonction permet de calculer le corrélogramme croisé ; avec x le fichier d'entrée, y le fichier de sortie, k le pas choisi et m la troncature. Cette dernière doit être obligatoirement inférieure ou égale à N/3. Le résultat est la matrice [R1,R2], avec R1 correspondant aux $k \geq 0$, et R2 aux $k \leq 0$.

#### g. Appel de la fonction MULTIRE.m

Cette fonction permet de faire ***l'analyse ondelettes <u>multirésolution</u>*** (avec les ondelettes multirésolution de type Daubechies 20).

a. X=fichier m=n+1-L, L est le nombre de lignes analysées, le nombre de valeurs traitées est de $2^n$ depuis la première.

b. Le résultat est wtx.

c. Il s'agit des composantes reconstituées et normées.

#### h. Appel de la fonction contin.m

Elle permet de faire l'analyse en ondelettes continues de Morlet, le nombre de valeurs traitées est de $2^n$ depuis la première.

#### i. Appel de la fonction ISOL_AMPL_GEN.m

Cette fonction permet d'isoler n'importe quelle composante, est de calculer son amplitude avec différentes normes, afin de déduire l'emmagasinement spécifique.

j. **Appel de la fonction Isol_TC_FUNCTION .m**

Cette fonction permet d'isoler toutes les composantes soit superposées dans le même figures, ou bien dans différentes figures.

**k. Appel des fonctions gain_H.m et gain_H1.m**

Ces fonctions permettent de calculer la fonction de gain adimensionnel (gain_H) et dimensionnel (gain_H1), et de déduire le gain correspondant à 24h, afin de calculer la valeur de la porosité effective.

**l. Appel de la fonction gain_MAX.m**

Cette fonction permet de calculer le gain maximum (ADIM) en fonction de la fréquence.

**m. Appel de la fonction gain_GLOB.m**

Cette fonction déduit le gain global (ADIM) pour toutes les fréquences (intégrale du gain_H).

**n. Appel de la fonction HU_STAT5_V3.m**

Cette fonction permet de calculer et tracer la fonction de transfert temporel h(t) pour une durée choisie M, entre l'entrée et la sortie, et fait appel à d'autres sous fonctions hu_statb1.m (K_acorest1.m, K_xcorest1.m) et optim_hu1.m.

**o. Appel de la fonction coherence.m**

Cette fonction calcule la cohérence entre l'entrée et la sortie, en utilisant le spectre.

**p. Appel de la fonction croison.m**

Cette fonction calcule l'intercorrélation entre le signal d'entrée et le signal de sortie.

**q. Appel de la fonction phase.m**

Cette fonction calcule la phase entre le signal d'entrée et le signal de sortie.

**r. Appel de la fonction croisonisol.m**

Cette fonction calcule l'intercorrélation entre la composante dyadique du signal d'entrée et la composante dyadique du signal de sortie. Il existe d'autres fonctions secondaires, comme la fonction 'PENTE.m' qui permet de calculer la pente d'une droite.

### 1.2.2) Liste des fonctions « ANALYSE » :

a. FILTER_DATA.m
b. MOYMOB.m
c. CORRELOGRAM.m
d. SPECTRE.m, SPECTRE1.m
e. LOGSPECTRE.m
f. CROSCORRELOGRAM.m
g. MULTIRE.m
h. CONTIN.m
i. ISOL_AMPL_GEN.m

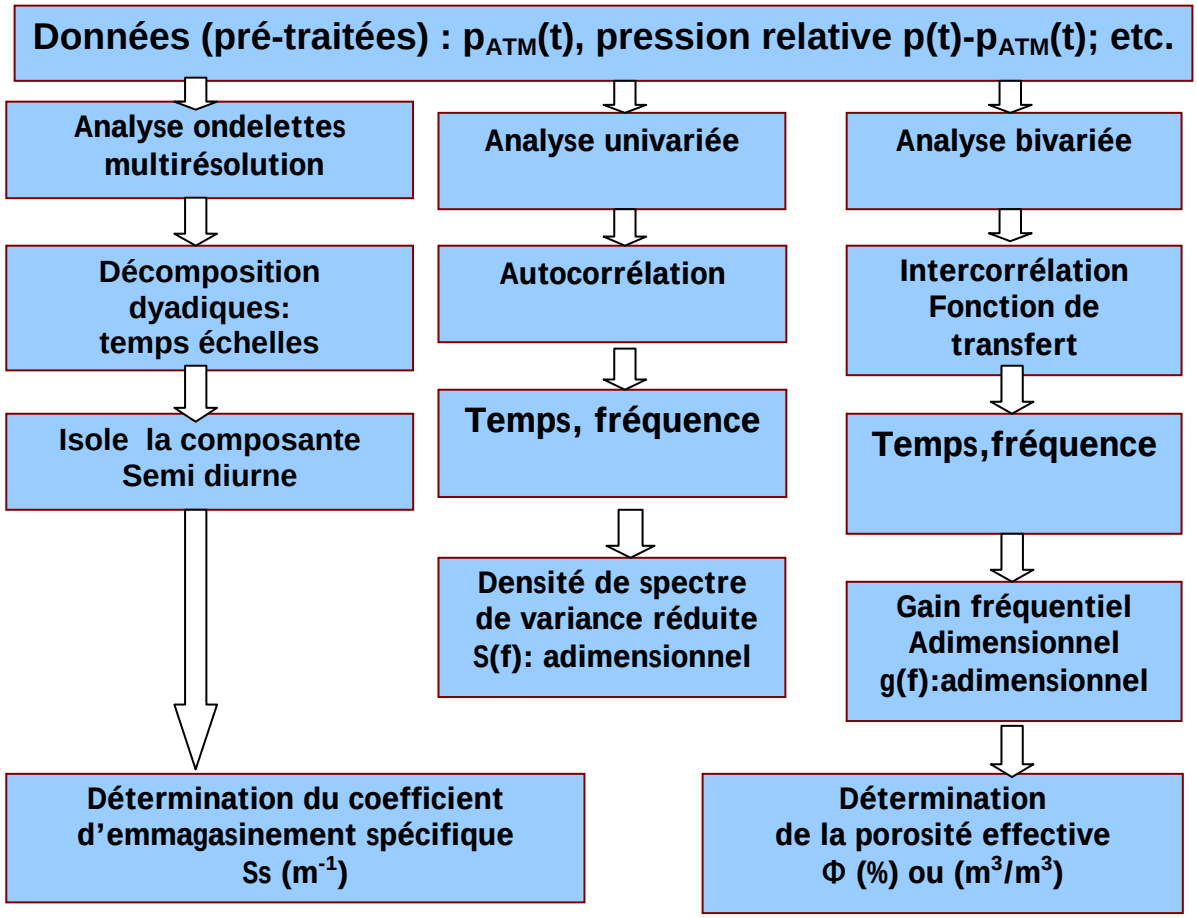
j. ISOL_TC_FUNCTION.m
k. GAIN_H.m, GAIN_H1.m
l. GAIN_MAX.m
m. GAIN_GLOB.m
n. HU_STAT5_V3.m
o. COHERENCE.m
p. CROISON.m
q. PHASE.m
r. CROISONISOL.m

Ces fonctions Matlab utilisent d'autres scripts et sous-fonctions, non signalés ci-dessus.

Pour l'analyse en ondelettes voir les sites de 'Wavelab' et 'Wavelet' ci-dessous :

- Wavelab802 (Université Standford) :
  http ://www-stat.stanford.edu/~wavelab/
- Wavelet (Torrence et Compo) :
  http ://paos.colorado.edu/research/wavelets.

### 1.2.3) Organigramme d'analyse :



*ANNEXE 2 :*

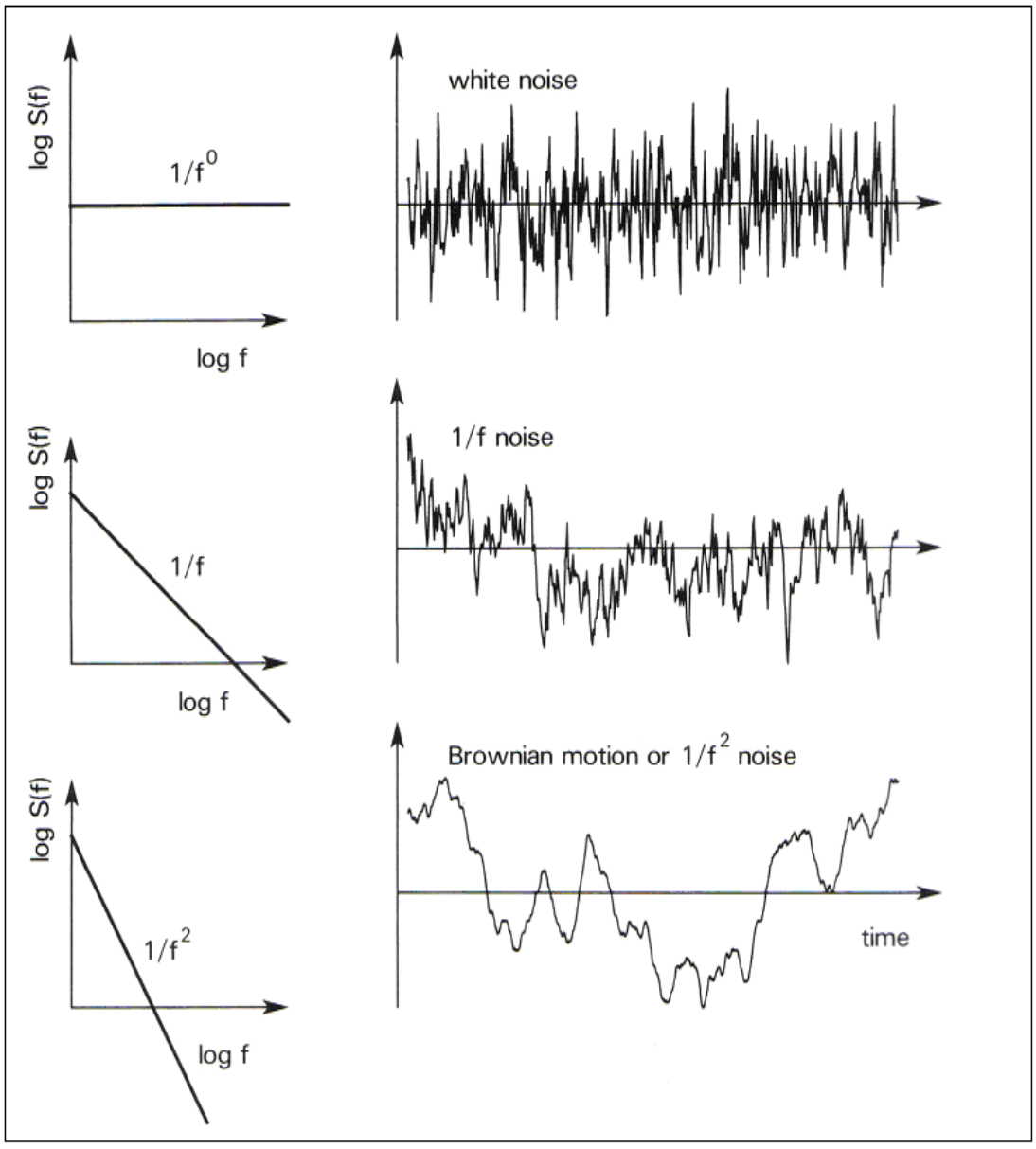



Figure 2.1 : courbes représentant, à droite les bruits 1/f, et à gauche leurs spectre en loglog.

*ANNEXE 3:*

*Analyse de la pression relative à Mont Terri (PP2) sur 1.5 ans*

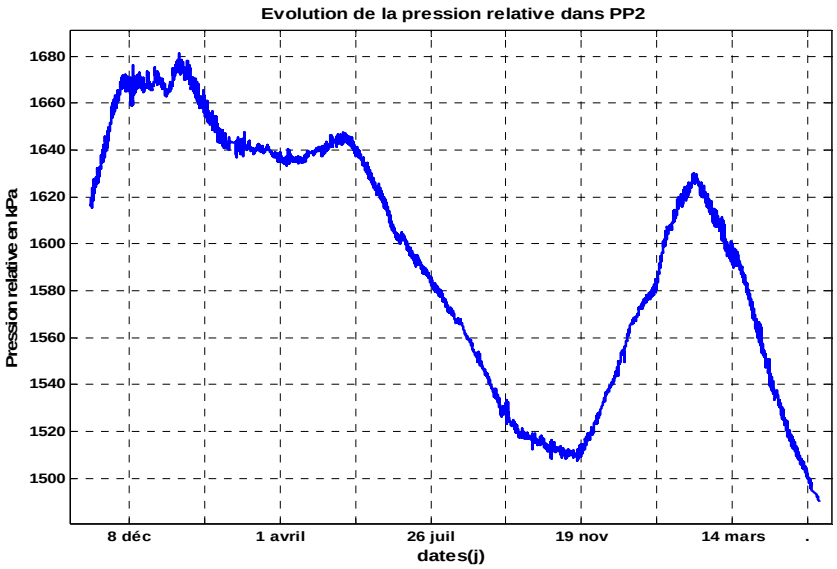



Figure **3.1**: Pression relative de pore dans PP2 (Mont Terri) du 07/11/2003 et 21/05/2005 (1 an, 6 mois et 16 jours : 26929 Δt avec Δt=0.5h).

La **figure 3.1** montre l'évolution de la pression relative en kPa mesurée dans la chambre PP2 pour la période allant du 07 novembre 2003 au 21 mai 2005. La tendance générale est similaire à PP1.

L'analyse corrélatoire et spectrale **(figure 3.2**) reflète la non stationnarité qui représente l'évolution à long terme avec de fortes valeurs aux basses fréquences.

Pour analyser le bruit on procède de la même façon que précédemment, c'est-à-dire en étudiant le spectre en coordonnées bilogarithmiques (analyse 1/f). La pente trouvée est de -1,6 indicatrice d'un bruit brownien, c'est-à-dire aléatoire mais structuré (**figure 3.3**). Les oscillations rapides surtout aux fréquences élevées sont dues au fluctuations statistiques, tandis que le pic visible aux basses fréquences correspond à une périodicité de 24 h.

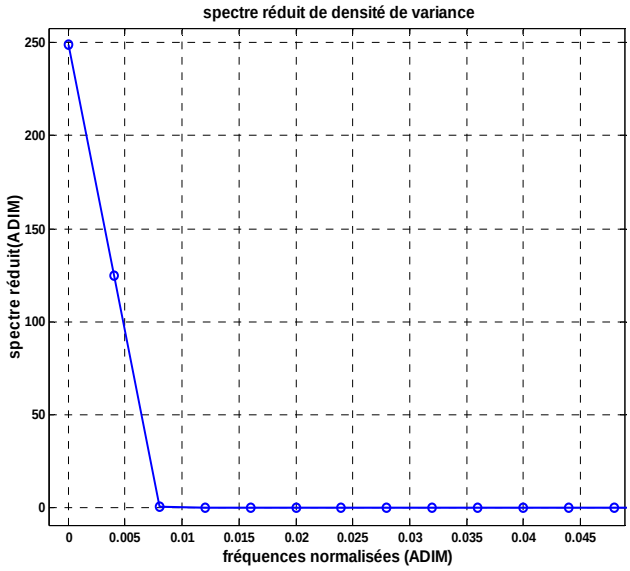



Figure **3.2**: Spectre réduit de la pression relative de pore en kPa de PP2(t) en fonction de la fréquence normalisée.

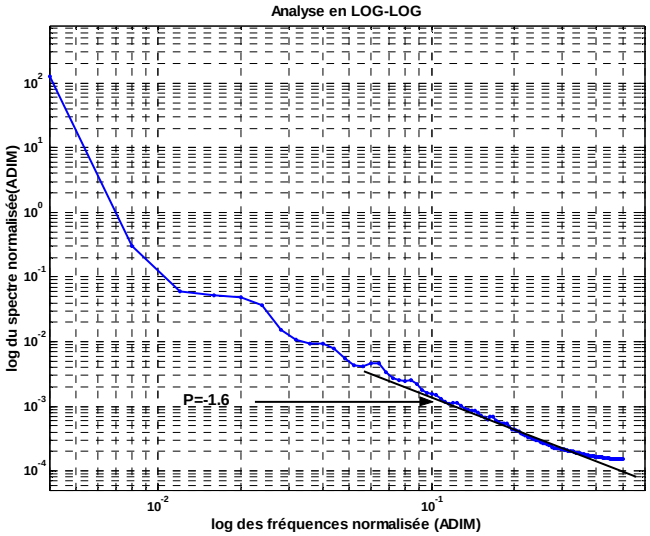



Figure **3.3**: Analyse en log spectre du spectre réduit de la pression interstitielle dans PP2 (Mont Terri).

Un filtrage par différenciation d'ordre 1 a été utilisé pour éliminer le bruit et rendre ainsi ces évènements indépendants. Le spectre réduit de densité de variance de la chronique de pression relative dans PP2 filtré par différenciation noté ΔPP2(t) (**figure 3.4**) montre les deux phénomènes diurne et semi-diurne et l'apparition d'autres pics nets à 8 h, 6 h,…, la variation à 24 h étant brutale.

L'analyse en ondelette de Morlet (**figure 3.5**) fournit une bonne synthèse des résultats obtenus. On constate, sur le scalogramme l'existence de deux composantes, stationnaires et discontinues à 12 h et 24 h bien marquées, avec la disparition des composantes à 8 h et à 6 h.

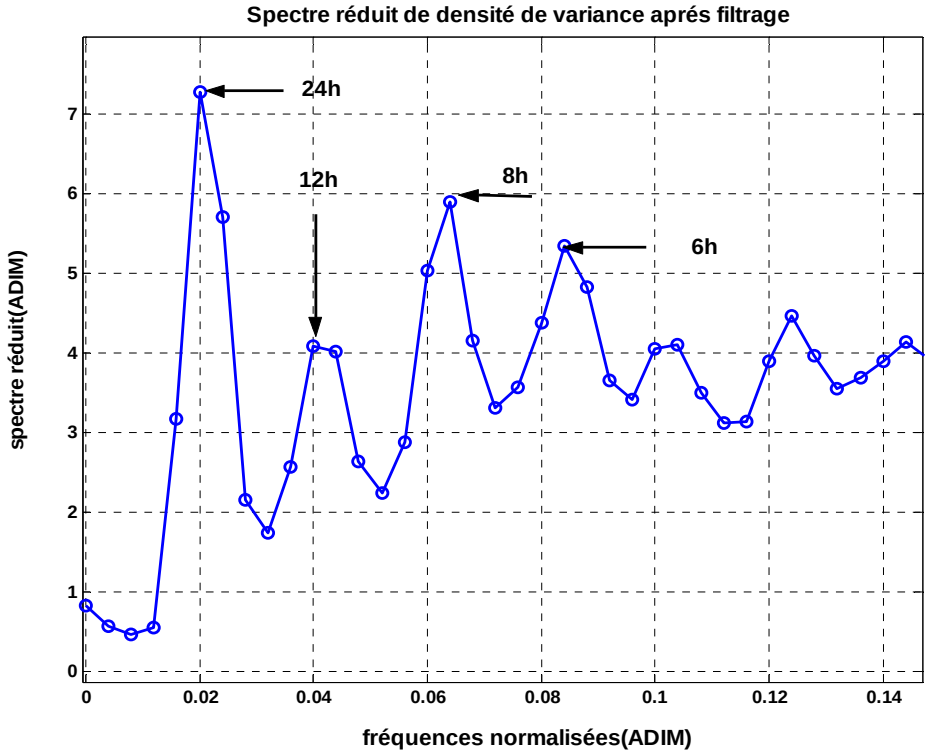



Figure **3.4**: Spectre réduit de pression relative de pore en kPa de ΔPP2(t), où ΔPP2(t) est la chronique de PP2(t) filtrée par différenciation d'ordre 1. Délai de coupure M=125 pas de temps (Δt=30min).

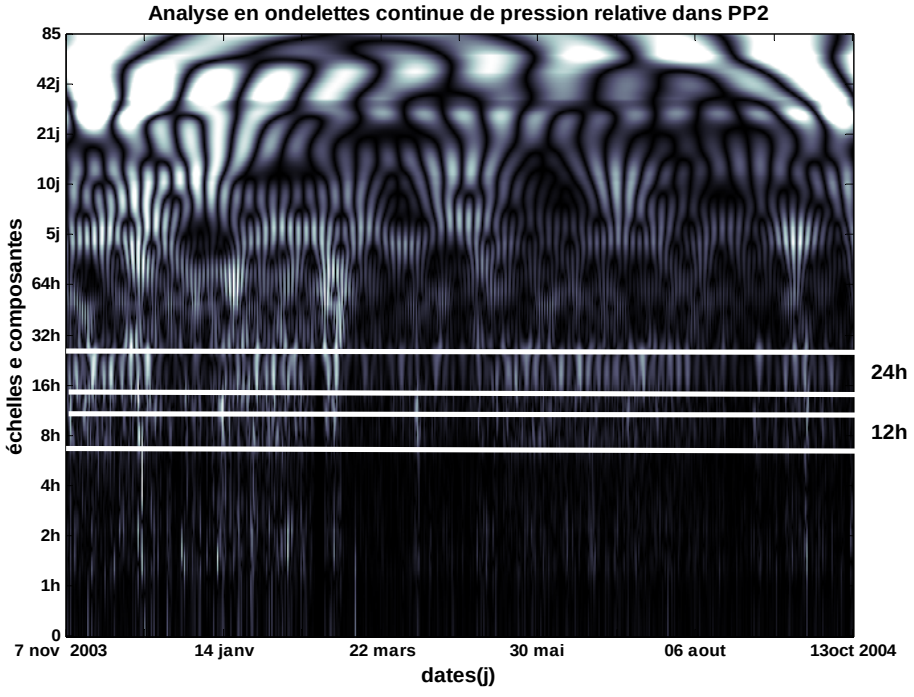



Figure **3.5** : Scalogramme de PP2(t) en ondelettes continues de Morlet : Les rectangles superposés mettent en évidence les échelles (composantes) 12h et 24h, déjà mises en évidence dans le spectre de Fourier.

*ANNEXE 4:*

# *Modèle poro-élastique de Biot en formulation drainée et non drainée*

## 3.1 Introduction

Dans cette partie, nous avons détaillé les équations poro-élastique de Biot dans les deux cas non orthotrope et isotrope en formulation drainée afin de déterminer le module de Young $E_d$, le coefficient de poisson $\nu$ et les coefficients de Lamé , ($\lambda$, $\mu$).

Ensuite nous allons montrer la relation entre Biot et Terzaghi en introduisant la notion de contrainte effective en géotechnique. Nous avons illustré aussi les équations poro-élastiques isotropes en formulation non drainée et déterminé certains coefficients poro-élastique (Young, Biot, Skempton,……).

Nous avons procédé à la détermination de ces coefficients dans la logique suivante **:**

Connaissant le module de Young Ed dans le cas drainé et le coefficient de Poisson $\nu$ nous avons calculé les coefficients de Lamé $\lambda$ et $\mu$ et, à partir de ces coefficients le module d'incompressibilité dans le cas drainé $K_b$ voir plus loin l'équation (**3.31**)

Ceci nous permet de calculer l'emmagasinement spécifique Ss connaissant la porosité effective déjà estimée par la méthode de traitement du signal, et connaissant aussi le coefficient $K_b$ et le module d'élasticité de l'eau Ew donné par la littérature.

Enfin nous allons démontrer une relation entre le module d'incompressibilité des grains solide ($K_s$) et le coefficient d'incompressibilité respectivement drainé ($K_b$) et non drainé ($K_u$). Ceci pourrait permettre, si l'on connaît Ks d'en déduire le coefficient de Biot ß (éq. **3.29**) et le module de Biot G (éq. **3.30**), et enfin, le coefficient de Skempton $B_s$ (éq. **3.31**).

Une partie des équations et des relations poro-élastiques ou hydro-mécaniques utilisées comme base dans ce chapitre sont empruntées aux travaux de modélisation hydromécanique en roche fracturée et anisotrope par Ababou *et al*., (1994 a, b).

## 3.2 Equations poro-élastiques de Biot (formulation drainée)

Convention de signe de la mécanique des milieux continus :

Les contraintes sont positives en extension, et négatives en compression (convention de signe de la mécanique des milieux continus). Le tenseur de contrainte dans l'eau est donc ($-p\delta_{ij}$) avec $p > 0$. Nous adoptons partout cette convention, sauf exception qui sera explicitement mentionnée (cf. contrainte effective de Terzaghi plus loin).

### 3.2.1 Equations poro-élastiques non orthotropes (formulation drainée)

Prenons le cas général « non orthotrope » (voir Ababou *et al., 1994* pour la modélisation en « continum équivalent » d'une roche poreuse élastique irrégulièrement fracturée). La formulation drainée du problème poro-élastique s'écrit sous la forme d'un système de relations tensorielles comme suit (avec une notation indicielle pour les tenseurs):

$$\sigma_{ij} = T_{ijkl}\varepsilon_{kl} - B_{ij}\,p \qquad (p>0) \qquad \textbf{(3.1)}$$

$$p = -G(B_{kl}\varepsilon_{kl} - \xi) \qquad \textbf{(3.2)}$$

$$\xi = \Phi(\varepsilon_{kk} - e_{kk}) \qquad \textbf{(3.3)}$$

avec :

$$\boldsymbol{T}_{ijkl} = \Lambda_{ijkl} + 2\boldsymbol{M}_{ijkl} \qquad \textbf{(3.4)}$$

Les coefficients et les variables sont définis dans la **PLANCHE 1** (ci-dessous).

Ici, dans la formulation drainée, on voit que si l'on procède à une expérience de déformation en conditions drainées (drained), i.e. sur un échantillon non chemisé ('unjacketed'), alors le terme de pression s'annule relativement à la pression atmosphérique ambiante (p = 0) et il reste une loi de déformation de type 'Hooke' ($\sigma = T.\varepsilon$), où 'T' représente le ou les coefficients de raideur de la loi de Hooke.

### 3.2.2 Equations poro-élastiques isotropes (formulation drainée)

Pour un milieu élastique isotrope (orthotrope), on a plus particulièrement :

$$\boldsymbol{T}_{ijkl} = \Lambda_{ijkl} + 2\boldsymbol{M}_{ijkl} \text{ avec: } \begin{cases} \boldsymbol{M}_{ijkl} = \mu\delta_{ki}\delta_{lj} \\ \Lambda_{ijkl} = \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} \end{cases} \text{ et } B_{ij} = \beta\,\delta_{ij}. \qquad \textbf{(3.5)}$$

Alors, la formulation drainée précédente se réduit à :

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = (\lambda + 2\mu)\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} - \beta\boldsymbol{p} \quad (p \geq 0) \qquad \textbf{(3.6)}$$

$$\boldsymbol{p} = -\boldsymbol{G}(\beta\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} - \xi) \qquad \textbf{(3.7)}$$

$$\xi = \Phi(\varepsilon_{kk} - e_{kk}) \qquad \textbf{(3.8)}$$

avec :

$$\mu = E_d \big/ 2(\upsilon + 1) \qquad \textbf{(3.9)}$$

$$\lambda = E_d \upsilon \big/ (1 - 2\upsilon)(\upsilon + 1) \qquad \textbf{(3.10)}$$

et:

$E_d$ : Module de Young en condition drainée

$\nu$ : Coefficient de Poisson.

$\lambda$ et $\mu$ : Coefficients de Lamé.

Noter que la variable $\xi$ représente le terme de production de masse pour la phase fluide. Plus précisément, $\xi(\mathbf{x},t)$ est, en tout point, la variation nette de volume de fluide par unité de volume du milieu poro-élastique déformable (Ababou et al 1994 a,b)

**« PLANCHE 1»**
**Définitions des variables d'état et des coefficients.**

*Définition des variables d'état*

$\boldsymbol{\sigma_{ij}}$ = Total Homogenized Stress Tensor

p = Fluid Pressure (the fluid stress being - $p\delta_{ij}$)

$\boldsymbol{\varepsilon_{ij}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$ = Solid Strain Tensor

$u_i$ = Solid Displacement

$\boldsymbol{e_{ij}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$ = Fluid Strain Tensor

$U_i$ = Fluid Displacement

$\xi$ = Fluid Production Term

(Variation of Volumetric Water Content)

*Définition des coefficients non orthotropes (formulation drainée)*

$T_{ijkl} = \Lambda_{ijkl} + 2M_{ijkl}$

$\Lambda_{ijkl}$ = Tensorial Compression Coefficient ($\lambda$)

$M_{ijkl}$ = Tensorial Shear Coefficient ($\mu$)

$B_{ij}$ = Tensorial Biot Coefficient ($\beta$)

$G$ = Scalar Biot Modulus

$\Phi$ = Porosity (due to fractures)

*Définition des coefficients non orthotropes (formulation non drainée*)*

$T_{ijkl}^{*} = \Lambda_{ijkl}^{*} + 2M_{ijkl}^{*}$

$\Lambda_{ijkl}^{*} = \Lambda_{ijkl} + G\, B_{ij}B_{kl}$ = Undrained Compression Coefficients

$M_{ijkl}^{*} = M_{ijkl}$ = Undrained & Drained Shear Coefficients

### 3.2.3 Interprétation et relation entre Biot et Terzaghi

Pour compléter l'exposé précédent, nous allons montrer la relation entre Biot et Terzaghi, lequel a introduit la notion de contrainte effective en géotechnique.
Tout d'abord, notons que la convention de signe concernant le tenseur de contraintes est sujette à discussion dans la littérature.

Ainsi, dans la littérature 'géotechnique' (problèmes de consolidation) et en calcul de structures (résistance des matériaux), les contraintes sont prises positives en compression, contrairement à la convention de signe adoptée en mécanique des milieux continus (cette dernière étant celle que nous adoptons partout dans le présent travail, sauf exception).

Dans les deux cas, on a toujours une pression $p \geq 0$.

Pour la commodité de l'exposé, on suppose ici l'isotropie du milieu élastique et l'on abandonne la formulation tensorielle des contraintes-déformations. Avec cette simplification, qui ne change rien à l'interprétation, les relations poro-élastiques équivalentes aux précédentes deviennent, en notation 'mécanique' :

$$\sigma = \sigma_E - \beta p \quad \text{(contraintes} \leq 0 \text{ en compression)} \qquad \textbf{(3.11)}$$

avec :

$$\sigma_E = (\lambda + 2\mu)\varepsilon \qquad \textbf{(3.12)}$$

La nouvelle variable $\sigma_E$ est la 'contrainte effective'.

La contrainte effective représente la contrainte s'exerçant entre les parties solides ou entre les 'grains' du milieu poreux, c'est-à-dire, la contrainte régnant au sein du squelette solide seul (hors fluide interstitiel).

Avec la convention de signe opposée, en notation 'géotechnique', ceci devient :

$$\sigma = \sigma_E + \beta p \quad \text{(contraintes} \geq 0 \text{ en compression )} \qquad \textbf{(3.13)}$$

d'où :

$$\sigma_E = \sigma - \beta p \quad \text{(contraintes} \geq 0 \text{ en compression )} \qquad \textbf{(3.14)}$$

On s'aperçoit alors que cette relation (la loi de Biot) est une généralisation de la loi de Terzaghi qui supposait une décomposition additive de la contrainte totale ($\sigma$) en contrainte effective et pression. On retrouve bien la loi de Terzaghi en prenant un coefficient de Biot $\beta$ égal à l'unité :

*Terzaghi* :

$$\sigma_E = \sigma - p \leftarrow \beta = 1 \quad \text{(contraintes} \geq 0 \text{ en compression)} \qquad \textbf{(3.15)}$$

Dans le cas plus général, on s'attend à avoir un coefficient de Biot $\beta$ inférieur à l'unité, soit :

*Biot :*

$$\sigma_E = \sigma - \beta p \leftarrow 0 \leq \beta \leq 1 \quad \text{(contraintes} \geq 0 \text{ en compression} \qquad \textbf{(3.16)}$$

## *3.3 Equations poro-élastique de Biot (formulation non drainée)*

Dans la formulation non drainée, les relations poro-élastiques précédentes sont simplement reformulées, de façon équivalente, comme suit :

$$\sigma_{ij} = T_{ijkl}{}^{*}\varepsilon_{kl} - GB_{ij}\xi \qquad \textbf{(3.17)}$$

$$\boldsymbol{p} = -\boldsymbol{G}(\boldsymbol{B_{kl}\varepsilon_{kl}} - \boldsymbol{\xi}) \qquad \textbf{(3.18)}$$

$$\xi = \Phi(\varepsilon_{kk} - e_{kk}) \qquad \textbf{(3.19)}$$

La différence avec la formulation 'drainée' est dans la première relation exprimant le tenseur de contrainte. Ici, dans la formulation 'non drainée', on constate que si l'on procède à une expérience de déformation en condition non drainée (undrained), i.e. sur un échantillon chemisé ('jacketed'), alors le terme de production fluide s'annule forcément ($\xi = 0$). On voit alors apparaître une loi de déformation de type 'Hooke' ($\sigma = T^*.\varepsilon$), où 'T*' représente une sorte de coefficient ou tenseur de raideur 'non drainé' (différent du coefficient classique de Hooke).
Voir **PLANCHE 1** pour la formulation complète du tenseur $T_{ij}$* 'non drainé', exprimé en termes de coefficients de Lamé 'non drainés' (étoilés « * »).

### 3.3.1 Equations poro-élastiques isotropes (formulation non drainée)

Pour un milieu élastique isotrope (orthotrope), on a plus particulièrement :

$$\boldsymbol{T_{ijkl}}^{*} = \Lambda_{\boldsymbol{ijkl}}{}^{*} + 2\boldsymbol{M_{ijkl}}{}^{*} \qquad \textbf{(3.20)}$$

avec:

$$\begin{cases} \boldsymbol{M_{ijkl}}^{*} = \boldsymbol{\mu}^{*}\boldsymbol{\delta_{ki}\delta_{lj}} \\ \Lambda_{\boldsymbol{ijkl}}{}^{*} = \boldsymbol{\lambda}^{*}\boldsymbol{\delta_{ij}\delta_{kl}} \end{cases} \qquad \textbf{(3.21)}$$

et

$$B_{ij} = \beta\,\delta_{ij} \qquad \textbf{(3.22)}$$

Dans le cas orthotrope/isotrope, $T_{ij}$* s'écrit donc uniquement en fonction de coefficients de Lamé scalaires non drainés ($\lambda^*,\mu^*$). Ceux-ci sont obtenus en fonction des coefficients de Lamé classiques ($\lambda,\mu$) comme suit (Ababou *et al., 1994*) :

$$\begin{aligned} \lambda^{*} &= \lambda + G\beta^{2} \\ \mu^{*} &= \mu \end{aligned} \qquad \textbf{(3.23)}$$

Rappelons que $\lambda$ et $\mu$ sont les coefficients classiques de Lamé, tandis que $\lambda^*$ et $\mu^*$ sont leurs équivalents 'non drainés'. Les autres coefficients ($G,\beta$) sont le module et le coefficient de Biot, déjà définis plus haut dans la formulation 'drainée'.

Ainsi, finalement, on voit que la formulation non drainée s'écrit dans le cas isotrope :

$$\boldsymbol{\sigma_{ij}} = (\boldsymbol{\lambda}^{*} + 2\boldsymbol{\mu}^{*})\boldsymbol{\varepsilon_{kl}} - \boldsymbol{\beta p} \quad (p \geq 0) \qquad \textbf{(3.24)}$$

$$\boldsymbol{p} = -\boldsymbol{G}(\boldsymbol{\beta\varepsilon_{kl}} - \boldsymbol{\xi}) \qquad \textbf{(8.25)}$$

$$\xi = \Phi(\varepsilon_{kk} - e_{kk}) \qquad \textbf{(3.26)}$$

## *3.4 Coefficients poro-élastiques en milieux isotropes (Young, Biot, Skempton, etc.)*

### 3.4.1 Remarques préalables concernant l'ensemble solide-liquide

Dans les équations de Biot, le tenseur totale des contraintes $\sigma_{ij}$ a été interprété comme la contrainte moyenne exercé sur la matrice solide-fluide [*Coussy, 1991, p.36*]. Ainsi, on peut récrire par exemple l'équation (2-1) sous la forme :

$$\sigma_{ij} = (1-\Phi)\ \sigma_{ij}{}^{S} + \Phi\ \sigma_{ij}{}^{F} \qquad \textbf{(3.27)}$$

où $\sigma_{ij}{}^{S}$ satisfait la loi de type Hooke pour le solide, alors que $\sigma_{ij}{}^{F}$ est liée linéairement aux deux déformations, la déformation du liquide et celle du squelette solide (matrice). Le coefficient $\Phi$ représente, a priori, la porosité.

Cette interprétation 'solide-liquide' peut mener à une définition un peu différente des coefficients de rigidité « *à un facteur porosité près* ».

Ainsi, si T est un coefficient de rigidité pour le milieu poro-élastique, i.e., pour la matrice solide-liquide ('mixture'), alors on peut définir un coefficient To tel que :

$$\boldsymbol{T} = (1-\Phi)\boldsymbol{T}_0 \qquad \textbf{(3.28)}$$

où To est le coefficient correspondant relatif au squelette solide seul (matrice poreuse sans le liquide interstitiel).

En outre, les propriétés du milieu poro-élastique solide-liquide, ou même ceux de la matrice solide elle-même, ne devraient pas être confondues avec ceux des « grains » solides individuels. *En d'autres termes, ne pas confondre, par exemple, la rigidité du squelette solide global (bulk) avec la rigidité des grains individuels.*

NB. Les coefficients présentés ci-dessous sont relatifs au milieu poro-élastique complet (mélange solide-liquide ou 'mixture') et non pas à la seule matrice solide, sauf indication contraire.

### 3.4.2 Coefficients poro-élastique tensoriels dans le cas isotrope

#### 3.4.2.1 Introduction (motivation)

Dans cette section, on détaille et on interprète les coefficients poro-élastiques obtenus dans le cas isotrope (par exemple le coefficient de couplage de Biot) en termes d'autres coefficients connus en mécanique des milieux continus et en géotechnique (par exemple le coefficient de Skempton, entre autres). Dans le texte, on utilisera ces relations pour estimer par exemple la storativité spécifique Ss.

Rappels :

$\Phi$ = Porosité du milieu;

$\beta$ = Coefficient de Biot scalaire du milieu poro-élastique isotrope ;

$\lambda$ , $\mu$ = coefficients de Lamé du milieu poro-élastique isotrope (drainé).

### 3.4.2.2 Expression du Coefficient de Biot (β)

Nous donnons au-dessous d'une relation classique connue sous le nom de « relation de Biot », qui s'applique en principe seulement « à un milieu isotrope » des grains solide et des pores remplis de fluide. La relation est :

$$\beta = 1 - \frac{K_b}{K_s} \qquad [-] \qquad \textbf{(3-29)}$$

Avec:

$K_b$: Module de compressibilité effective (bulk) du milieu poroélastique drainé

$K_S$ : Module de Compressibilité des grains solides.

### 3.4.2.3 Module de Biot (G)

Le module de Biot (G) est toujours un scalaire par définition. La relation classique développée pour « les milieux isotropes » est :

$$\boldsymbol{G} = \left( \frac{\boldsymbol{\beta} - \Phi}{\boldsymbol{K_s}} + \frac{\Phi}{\boldsymbol{K_f}} \right)^{-1} \qquad [\text{Pa}] \qquad \textbf{(3.30)}$$

où Ks est défini plus haut et, $K_f$ le module de compressibilité du fluide.

Pour un milieu poro-élastique ayant la structure non isotrope, il est probable que le module scalaire G doive être lié aux coefficients tensoriels. Par exemple, une version plus générale de G peut être obtenue par le remplacement de β avec (Bii/3), où Bii est la trace du tenseur de Bij.

### 3.4.2.4 Module de compressibilité (Kb)

Pour un milieu isotrope, il est bien connu que les coefficients de Lamé d'un milieu isotrope soient liés au module de compressibilité du matériau (sphérique) volumétrique tridimensionnel par la relation :

$$K_b = \frac{3\lambda + 2\mu}{3} \qquad [\text{Pa}] \qquad \textbf{(3.31)}$$

Des relations semblables peuvent être obtenues pour le cas 2-D (contraintes planes).

### 3.4.2.5 Expression du Coefficient de Skempton

Pendant une expérience de compression non drainée sur un matériau poro-élastique rempli de fluide, l'habillage de pression est lié au contrainte de compression par le soi-disant coefficient de Skempton $B_S$ :

$$\boldsymbol{p} = -\boldsymbol{B_s}\boldsymbol{\sigma} \qquad \textbf{(3.32)}$$

Où σ est la partie sphérique du tenseur de contrainte, définie ici comme :

$$\sigma = \frac{\sigma_{kk}}{3} \qquad \textbf{(3.33)}$$

Utilisant la version « non drainée » des équations poro-élastiques de Biot (avec $\xi$=0 indiquant que le fluide est empêché d'entrer ou de sortir de l'échantillon), le coefficient de Skempton $B_s$ peut facilement être lié aux autres coefficients. À savoir :

$$\boldsymbol{B_s} = \left( \frac{\boldsymbol{K_b}}{\boldsymbol{G\beta}} + \boldsymbol{\beta} \right)^{-1} \qquad \textbf{(3.34)}$$

On peut écrire le coefficient de Skempton en fonction de l'incompressibilité non drainée $K_u$:

$$B_s = \left( \frac{G\beta}{K_b + \beta^2 G} \right) \qquad \textbf{(3.35)}$$

$$K_u = K_b + \beta^2 G \qquad \textbf{(3.36)}$$

L'équation **(3.36)** est obtenue par la combinaison des équations **(3.29), (3.30) et (3.35)**

### 3.4.2.6 Emmagasinement spécifique

Nous allons maintenant montrer que le coefficient $\alpha$ (compressibilité de la matrice solide) peut s'écrire en termes de pression, en raisonnant à contrainte totale constante. En utilisant la 1ère convention de signe sur les contraintes, la relation de *TERZAGHI* montre que toute diminution de pression (décompression du fluide) se traduit par une diminution de la contrainte effective entre les grains, donc (étant donné la convention) par une compression des grains et une diminution du volume poreux.

En utilisant la 2ème convention de signe, on aboutit à la même conclusion : toute diminution de pression (décompression du fluide) se traduit par une augmentation de la contrainte effective entre les grains, donc (étant donnée la convention) par une compression des grains et une diminution du volume poreux.

Quelle que soit la convention de signe sur les contraintes, on voit finalement que le coefficient de compressibilité $\alpha$ du poreux (unités : *[Pa$^{-1}$]*) peut être redéfini comme suit, en fonction de la seule pression de l'eau (grâce à la relation de Therzaghi):

$$\alpha = +\frac{1}{V_{MP}} \frac{dV_{MP}}{dp} \qquad [\mathrm{Pa}^{-1}] \qquad \textbf{(3.37)}$$

On définit de la même façon la compressibilité de l'eau

$$\beta = -\frac{1}{V_{eau}} \frac{dV_{eau}}{dp} \qquad [\mathrm{Pa}^{-1}] \qquad \textbf{(3.38)}$$

On déduit respectivement les modules d'incompressibilité du squelette solide $K_b$ et du fluide saturant $K_f$:

$$\frac{1}{\alpha} = K_b \ [\mathrm{Pa}] \qquad \textbf{(3.39)}$$

$$\frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{\left( \frac{\Delta V_{eau}}{V_{eau}} \right)} = K_f \, [\mathrm{Pa}] \qquad \textbf{(3.40)}$$

$$S_S = \rho g \left(\alpha + \phi\beta\right) [\mathrm{m}^{-1}] \quad \textbf{(3.41)}$$

$$S_S = \rho g \left( \frac{1}{K_b} + \phi \frac{1}{K_f} \right) [\mathrm{m}^{-1}] \quad \textbf{(3.42)}$$

**Remarque :**

Certains auteurs utilisent la notation de la compressibilité de la matrice solide comme suivant :

$$\alpha = (1-\phi)\tilde{\alpha} \quad \textbf{(Sans pores)} \quad \textbf{(3.43)}$$

Avec :

$$\tilde{\alpha} = -\frac{1}{V_{MS}} \frac{dV_{MS}}{dp} \quad \textbf{(3.44)}$$

$$\frac{1}{\tilde{\alpha}} = K_s [\mathrm{Pa}] \quad \textbf{(3.45)}$$

On peut récrire le coefficient d'emmagasinement spécifique (équation 8.42), selon la forme donné par Green et Wang (1990) par :

$$\frac{S_s}{\rho_w g} = \left( \frac{1}{K_b} - \frac{1}{K_s} \right) \left( 1 - \frac{4M\left(1 - K_b / K_s\right)}{\left(K_b + 4/3M\right)} \right) + \phi \left( \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_s} \right) \quad \textbf{(3.46)}$$

$$\frac{S_s}{\rho_w g} = \left( \frac{1}{G} \frac{3K_u + 4M}{3K_b + 4M} \right) \quad \textbf{(3.47)}$$

avec :

$V_{MS}$ : Volume de la partie solide

$V_{MP}$ : Volume du milieu poreux

Ks : Module d'incompressibilité du grain solide

M: Module de cisaillement

*ANNEXE 5 :*

# Principales composantes des marées astronomiques

| Composantes Tidales | Périodes ( heures solaires ) | Description | Nature |
|---|---|---|---|
| $M_2$ | 12.42 | Principal Lunar | Semi-diurnal |
| $S_2$ | 12.00 | Principal solar | Semi-diurnal |
| $N_2$ | 12.66 | Larger Lunar elliptic | Semi-diurnal |
| $K_2$ | 11.97 | Luni-solar | Semi-diurnal |
| $K_1$ | 23.93 | Luni-solar diurnal | diurnal |
| $O_1$ | 25.82 | Principal Lunar diurnal | diurnal |
| $P_1$ | 24.07 | Principal solar diurnal | diurnal |
| $Q_1$ | 26.87 | Larger Lunar elliptic | diurnal |
| MF | 327.90 | Lunar fortnightly | Long term |
| MM | 661.30 | Lunar monthly | Long term |
| SSA | 4383.00 | Solar semi annual | Long term |
| $M_4$ | 6.21 | | Compound |
| $MS_4$ | 6.10 | | Compound |

Tableau 5.1 : Description, périodes et nature des principales composantes des marées astronomiques (G. Bearman 1989 Waves, Tides and Shallow-Water Processes).

Le tableau 5.1 représente les principales composantes des marées astronomiques. Le nom donné par Darwin à chacune des composantes de la marée ($M_2$, $K_1$…) caractérise l'origine de la force génératrice élémentaire.

La composante la plus importante est $M_2$ (en anglais : M=Moon, 2=semi-diurne). C'est la composante lunaire principale dûe à un astre fictif de la taille de la Lune évoluant suivant une orbite circulaire dans le plan de l'équateur terrestre. Sa période est de 0,5175 jours soit 12h 25min, ce qui correspond approximativement à la période séparant deux basses mers et deux pleines mers le long des côtes atlantiques européennes (la moitié du jour lunaire moyen). Elle est encadrée par plusieurs composantes à variations elliptiques dont les deux plus importantes sont :

- $L_2$ , l'elliptique lunaire mineure de $M_2$ .
- $N_2$ , l'elliptique lunaire majeure de $M_2$.

(la lettre M étant entre L et N dans l'alphabet). $N_2$ est induite par les variations de la distance entre la Terre et la Lune.

L'équivalent de $M_2$ pour la lune est $S_2$ pour le Soleil (en anglais : S=Sun, 2=semi-diurne) dont la période est exactement 0,5 jours soit 12h00min, ce qui correspond à une demi-

journée de jour sidéral. $S_2$ est elle aussi encadrée de plusieurs composantes à variations elliptiques. Les deux plus importantes sont :

- $R_2$ l'elliptique solaire mineure de $S_2$.
- $T_2$ l'elliptique solaire majeure de $S_2$.

Le type de marée dépend en fait de l'importance relative des composantes diurnes par rapport aux composantes semi-diurnes selon le rapport :

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \tag{5.1}$$

C'est le rapport des amplitudes diurnes (solaire O1 et lunaire K1) sur les amplitudes semi-diurnes (solaire S2 et lunaire M2).

| Tidal Component | Amplitude of Associated Water Level from Harmonic Analyses, cm* | Theoretical Amplitude of Tidal Potential, $W_2 \times (1/g)$, cm | Theoretical Amplitude of Tidal Dilatation $\Delta_t \times 10^{-8}$ ($\nu = 0.25$) | Specific Storage $S_s$, $\times 10^{-6}$ cm$^{-1}$ | Barometric Efficiency $B$ | Porosity $n$ ($\nu = 0.25$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *Turnhout, Belgium, latitude + 51°19'†* | | | | |
| $M_2$ | 1.48 | 10.2 | 0.83 | 0.6 | 0.77 | 0.10 |
| $S_2$ | 0.68 | 4.7 | 0.38 | 0.6 | | 0.10 |
| $N_2$ | 0.24 | 1.9 | 0.16 | 0.7 | | 0.11 |
| $K_1$ | 1.41 | 14.8 | 1.2 | 0.9 | | 0.15 |
| $O_1$ | 1.20 | 10.5 | 0.86 | 0.7 | | 0.12 |
| | | *Iowa City, Iowa, latitude + 41°39'‡* | | | | |
| $M_2$ | 1.15 | 14.5 | 1.2 | 1 | 0.75 | 0.18 |
| $S_2$ | 0.50 | 6.8 | 0.55 | 1 | | 0.19 |
| $N_2$ | 0.33 | 2.7 | 0.22 | 0.7 | | 0.12 |
| $K_1$ | 1.41 | 15.1 | 1.2 | 0.9 | | 0.15 |
| $O_1$ | 0.59 | 10.7 | 0.87 | 1 | | 0.25 |
| | | *Carlsbad, New Mexico, latitude + 32°18'§* | | | | |
| $M_2$ | 0.45 | 18.6 | 1.5 | 0.3 | 0.65 | 0.42 |
| $S_2$ | 0.25 | 8.6 | 0.70 | 0.3 | | 0.36 |
| $N_2$ | 0.09 | 3.5 | 0.29 | 0.3 | | 0.40 |
| $K_1$ | 0.16 | 13.7 | 1.1 | 0.7 | | 0.78 |
| $O_1$ | 0.15 | 9.7 | 0.79 | 0.5 | | 0.65 |

Tableau 5.2: Comparaison des données de marées terrestres pour les composantes de marée M2, S2, N1, K1 et O1 dans un puits artésien à Turnhout, Iowa City, et Carlsbad (Bredehoeft J. D, 1967 : Response of well-aquifer system to earth tides. *Journal of Geophysical Research*, 12, p.3075 -3087).

*Calcul du rapport F :*

- Pour le site de Iowa City : F=(1.2+0.87)/(1.2+0.55) = 1.18.
  Les amplitudes diurnes l'emportent sur les amplitudes semi-diurnes.
- Pour le site Carlsbad : F=(1.1+0.79)/(1.5+0.70) = 0.94.
  Les amplitudes semi-diurnes l'emportent sur les amplitudes diurnes.
- Pour le site Turnhout, Belgium : F=(1.2+0.86)/(0.83+0.38) =1.7.
  Les amplitudes diurnes l'emportent sur les amplitudes semi-diurnes.

Globalement, la valeur du coefficent F diffère d'un site à un autre. En particulier dans le site de Carlsbad, la valeur de BE (efficience barométrique) vaut 0.65. Ce cas coincide avec les valeurs de BE estimées par nos méthodes dans les trois sites (Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute Marne), dont le BE est inférieur ou égal à 0.65.

Noter qu'un effet de déphasage peut intervenir entre les différentes composantes des marées. Cet effet de déphasage n'est pas pris en compte dans ces calculs, ce qui pourrait modifier ces conclusions préliminaires.

*ANNEXE 6 :*

# Estimation spectrale et détection des pics fréquentiels «effet d'échantillonnage et analyse de sensibilité ».

*6.1) Délai de coupure M égal respectivement 900 et 16 pas de temps*

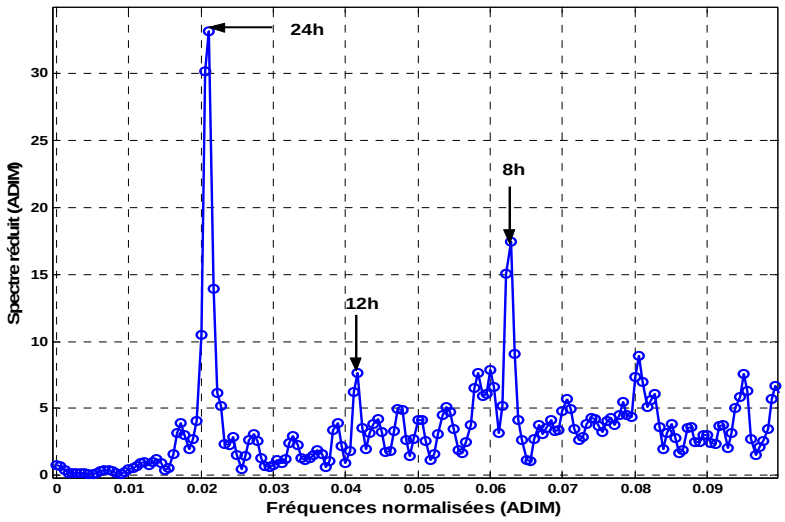



Figure 6.1 Spectre réduit de pression relative différenciée ΔPP1(t) en kPa Δt=30min. k0=1, Délai de coupure M=900 pas de temps, nombre total N=1852.

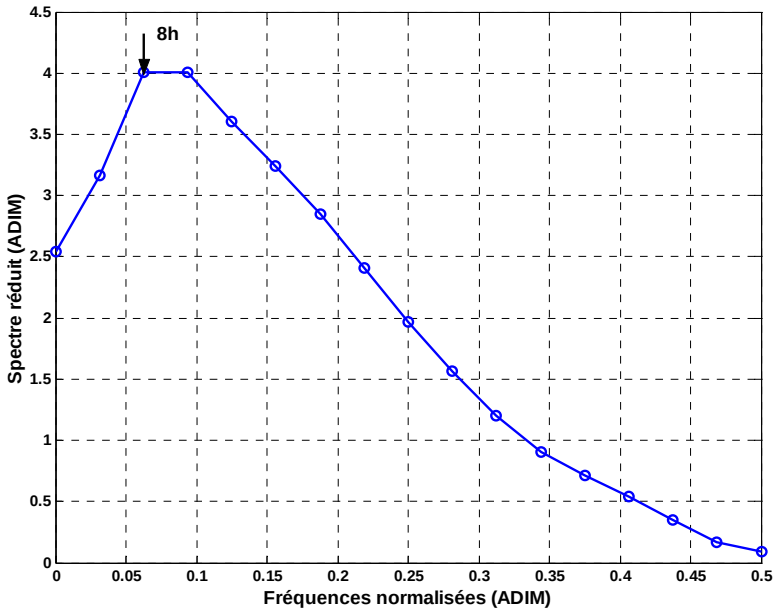



Figure 6.2: Spectre réduit de pression relative différenciée ΔPP1(t) en kPa Δt=30min.k0=1, Délai de coupure M=16 pas de temps, nombre total N=1852.

On constate que la composante 8h est présente tant que le délai maximal M ne soit pas inférieur à 16 pas de temps.

*6.2) Délai de coupure M égal au nombre total des valeurs analysées (M=N)*

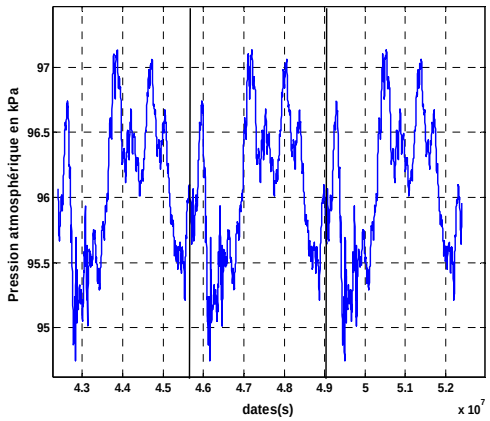



Figure 6.3 : Chronique de pression atmosphérique dans la galerie de sécurité au Mont Terri pré excavation période (23/04/98-31/05/98).prolongé en trois fois (Ntot=3N) avec N=1852.

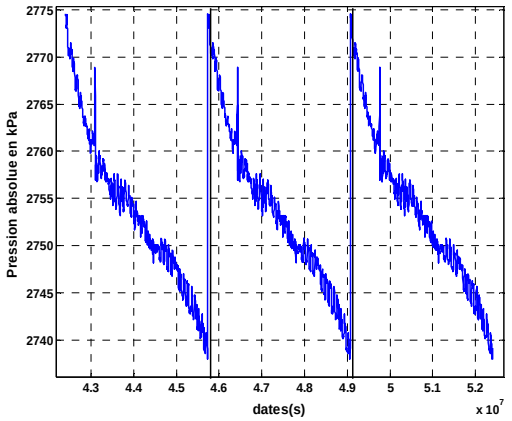



Figure 6.4 : Chronique de pression absolue dans PP1 pré excavation période (23/04/98-31/05/98).prolongé en trois fois (Ntot=3N) avec N=1852.

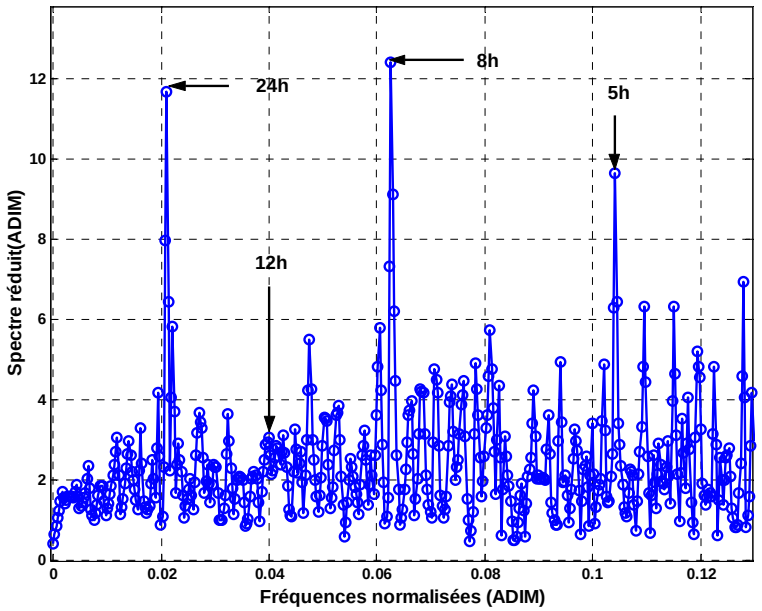



Figure 6.5 : Spectre réduit de pression absolue différenciée ΔPP1(t) en kPa Δt=30min. k0=1,Délai de coupure M=1852 pas de temps, nombre total des valeurs analysées Ntot vaut 3N avec N=1852.

Dans un premier temps on prolonge les chroniques (figure 6.3 et 6.4) sur au moins au trois fois le nombre de valeurs originales ($N_{tot}$=3N). Ensuite, nous traçons les spectres de densité de variance réduit, en prenant un délai maximal M égal à Ntot/3, dans notre cas N vaut 1852 valeurs soit $N_{tot}$ 5556 valeurs.

Les figures 6.5 et 6.6 présentent les spectres de densité de variance réduit, respectivement pour la pression absolue et la pression relative dans PP1 en kPa. On constate que le pic à 8h devient plus net par rapport à 24h, et on constate également l'apparition d'un autre pic à 5h. Cependant le pic à 12h devient moins net et de plus, il y a une apparition de bruit important.

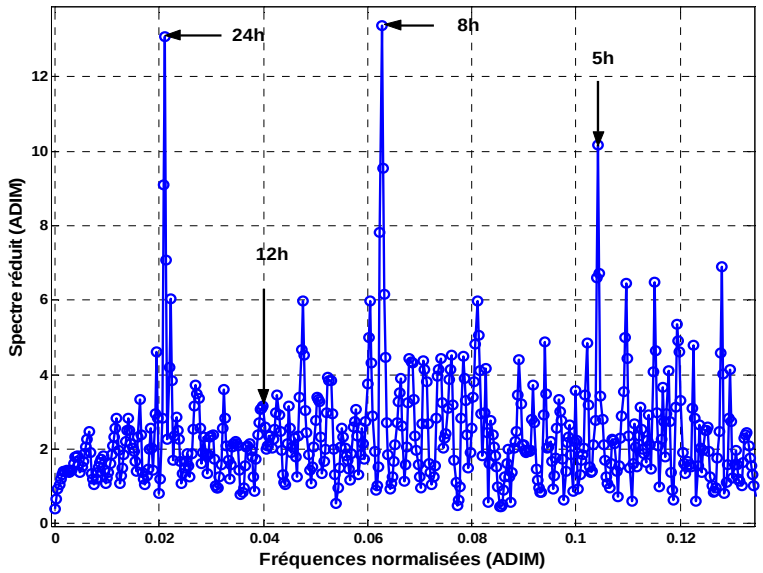



Figure 6.6 : Spectre réduit de pression relative différenciée ΔPP1(t) en kPa Δt=30min. k0=1,Délai de coupure M=1852 pas de temps, nombre total des valeurs analysées vaut 3N avec N=1852.

Pour le spectre de la pression atmosphérique (figure 6.7) on remarque l'apparition d'une autre composante de 5j en plus des composantes 12h et 24h.

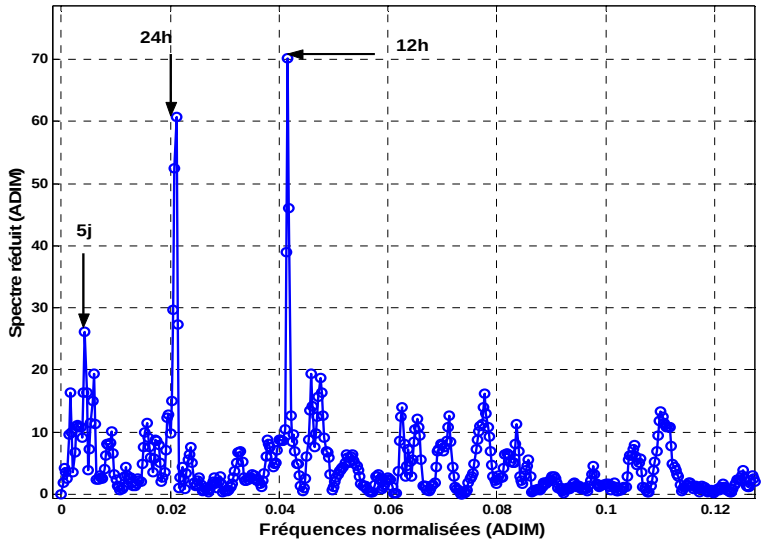



Figure 6.7 : Spectre réduit de pression atmosphérique différenciée ΔPatm(t) en kPa Δt=30min. k0=1,Délai de coupure M=1852 pas de temps, nombre total des valeurs analysées vaut 3N avec N=1852.

*ANNEXE 7 :*

# Résultats d'analyse des chroniques avec d'autres méthodes (Fonction de Transfert, corrélation croisée sur composantes ondelettes)

## *7.1) Chronique d'échelle mensuelle (non prétraités)*

### *7.1.1) Analyse Temporel d'une chronique stationnaire (Patm(t)) et une chronique non stationnaire non dé-moyennée (Pre(t)l)*

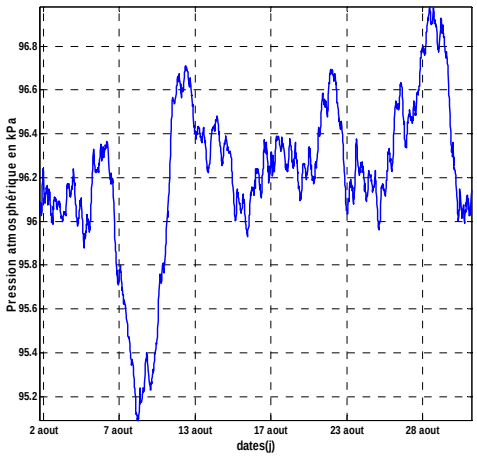



Figure 7.1 : chronique de la pression atmosphérique avec Δt=0.5h du 02 /08/02 au 04/09/02, (durée : 1440Δt).

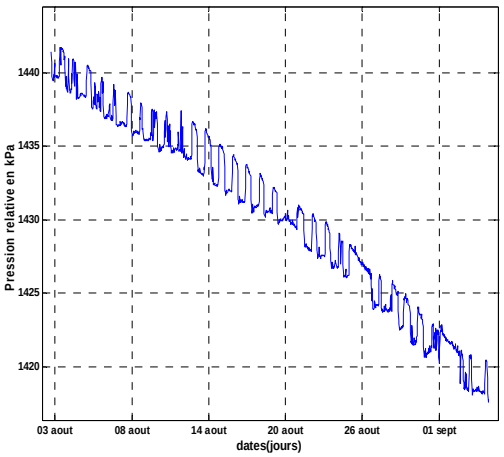



Figure 7.2: chronique de la pression relative non dé-moyennée en kPa dans PP1 avec Δt=0.5h du 02 /08/02 au 04/09/02, (durée : 1440Δt).

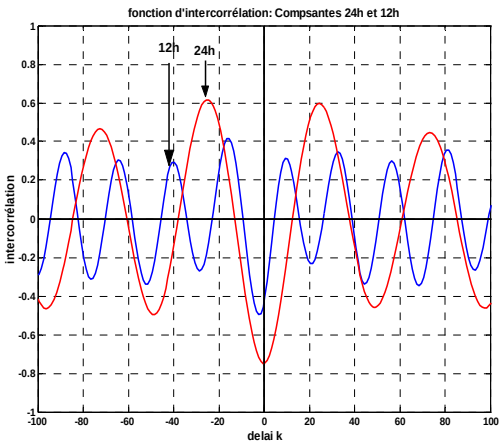



Figure 7.3 : Fonction d'intercorrélation des composantes à 24h (rouge) et à 12h (bleu) entre la pression atmosphérique et la pression relative (non dé-moyennée) mesurées dans PP1 du 02 /08/02 au 04/09/02 (délai max : M = 100), avec Δt=0.5h.

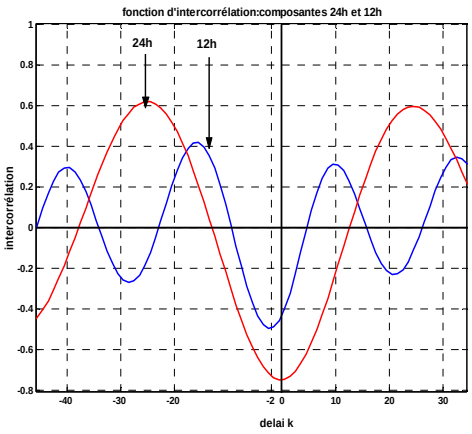



Figure 7.4 : Zoom sur la Fonction d'intercorrélation des composantes à 24h (rouge) et à 12h (bleu) entre la pression atmosphérique et la pression relative (non dé-moyennée) mesurée dans PP1 du 02 /08/02 au 04/09/02 (délai max : M=100). avec Δt=0.5h.

La figure 7.1 montre la chronique de la pression atmosphérique, et présente des non stationnarités par rapport à l'amplitude des fluctuations, et la figure 7.2 présente l'évolution de la pression relative non dé-moyennée dans PP1. Il s'agit de chroniques non pré-traitées.

Dans les figures 7.3 et 7.4, nous montrons la fonction d'intercorrélation entre Patm(i) et PP1(i+k) où « i » est le temps absolu et « k » est le délai. On remarque une causalité apparente entre Patm(i) et PP1(i+k) sur la composante 12h (k=-2 ) mais pas sur la composante dyadique 24h.

*7.1.2) Analyse temporel d'une chronique stationnaire (Patm) et une chronique non stationnaire (Prel) dé-moyenné.*

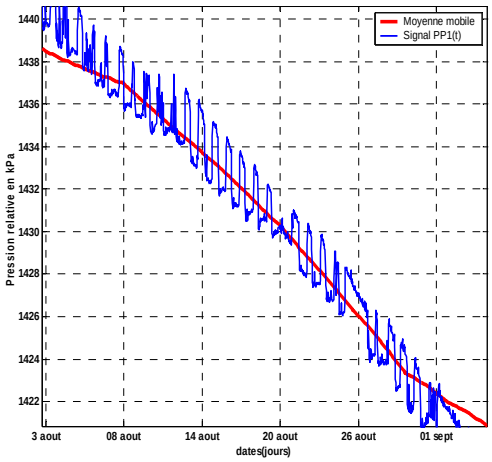



Figure 7.7: Evolution de la pression relative et sa moyenne mobile en kPa dans PP1 avec Δt=0.5h du 02 /08/02 au 04/09/02, (durée : 1440Δt).

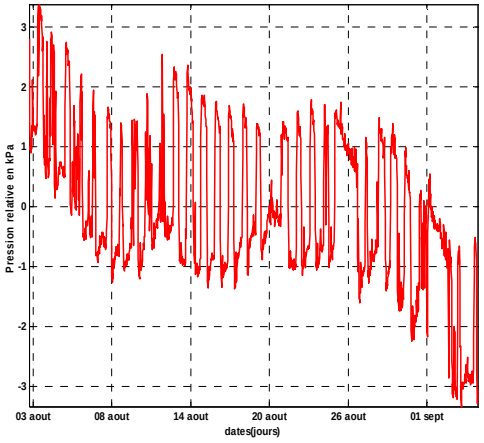



Figure 7.8: Evolution du résidu de la pression relative en kPa dans PP1 avec Δt=0.5h du 02 /08/02 au 04/09/02, (durée : 1440Δt).

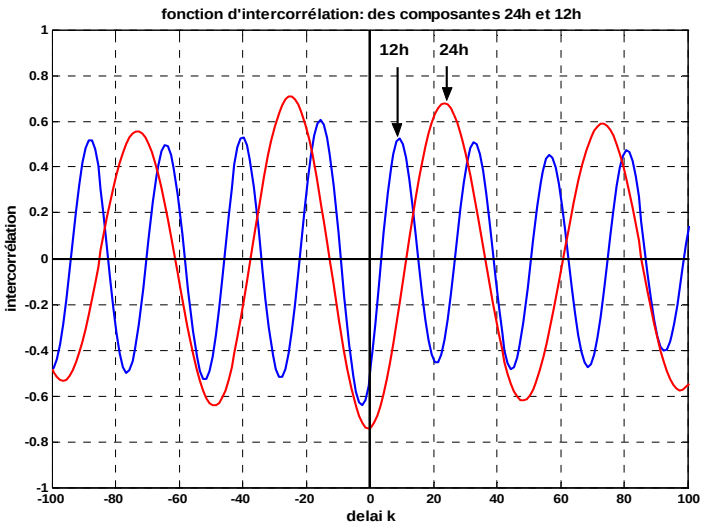



Figure 7.9 : Fonction d'intercorrélation des composantes d'échelles dyadique à 24h et à 12h entre la pression atmosphérique et la pression relative dé-moyennée mesurée dans PP1 du 02 /08/02 et 04/09/02 avec Δt=0.5h

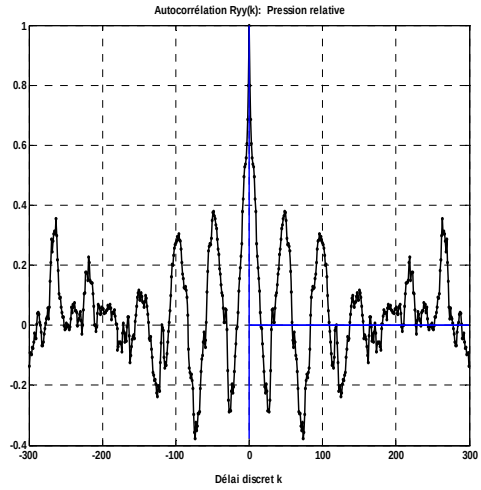



Figure 7.10 : Fonction de corrélation de la pression relative dé moyennée (Résidu) en kPa mesurée dans PP1 entre le 02 /08/02 et 04/09/02 (délai maximale : M=300) avec Δt=0.5h.

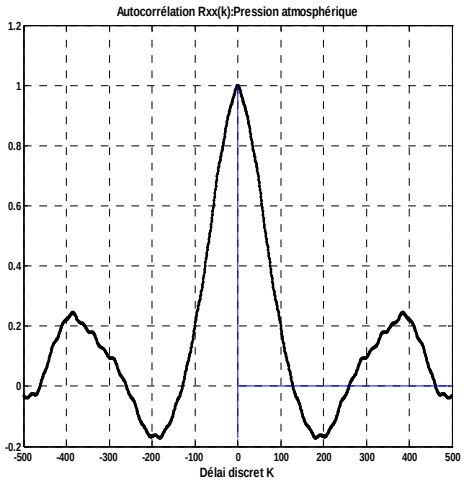



Figure 7.11 : Fonction d'autocorrélation de la pression atmosphérique en kPa mesurée dans la Galerie de sécurité de Mont Terri du 02 /08/02 au 04/09/02 (délai maximale : M=500) avec Δt=0.5h.

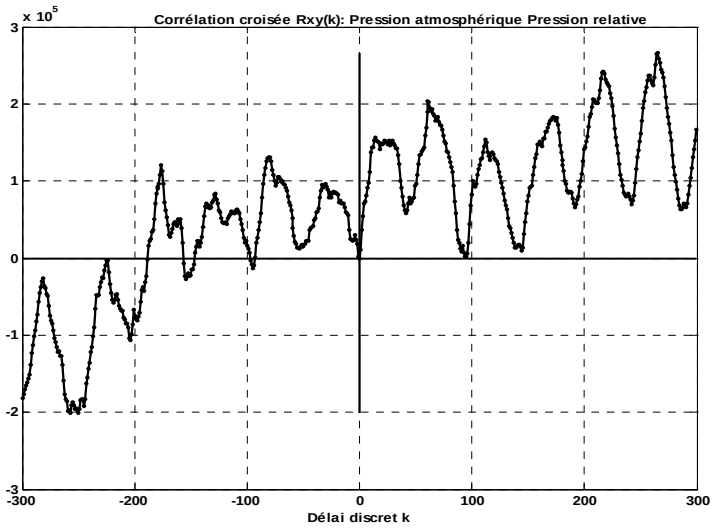



Figure 7.12 : Fonction de corrélation croisée Rxy(k) entre la pression atmosphérique et la pression relative dé-moyennée dans PP1 du 02 /08/02 au 04/09/02 (délai maximal : M=300).

## *7.2) Chronique d'échelle multi-annuelle (données prétraités)*

### *7.2.1) Analyse temporel d'une chronique stationnaire (Patm) et une chronique non stationnaire (Prel).*

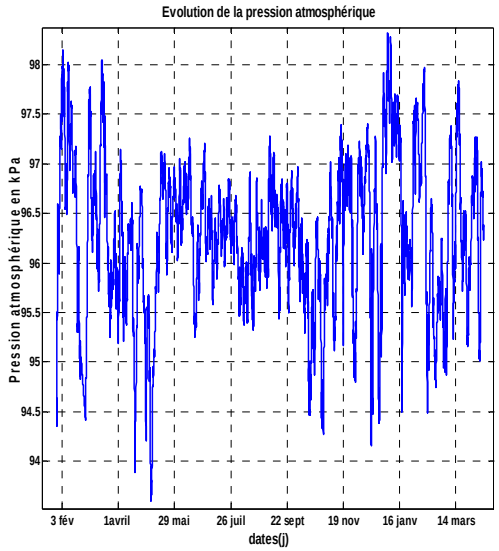



Figure 7.13 : Evolution de la pression atmosphérique du 29/01/2004 au 12/04/2005, (durée : 20736 Δt), avec Δt=0.5h.

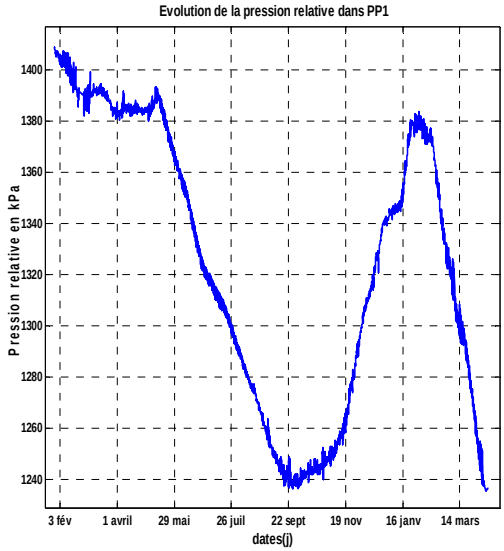



Figure 7.14 : Evolution de la pression relative dans PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005, (durée : 20736 Δt), avec Δt=0.5h.

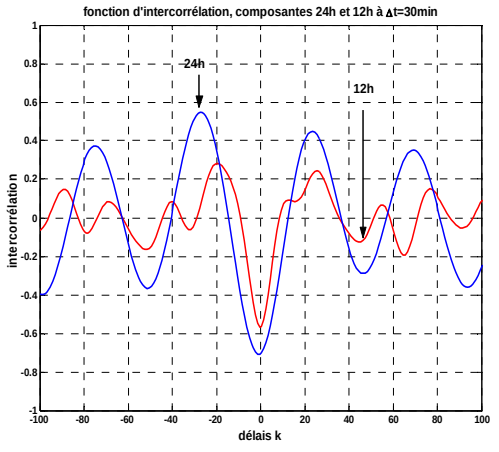



Figure 7.15: Fonction d'intercorrélation de la composante 24h entre la pression atmosphérique et la pression relative non dé-moyennée dans PP1 entre le 29/01/2004 et 12/04/2005 (M=100Δt).

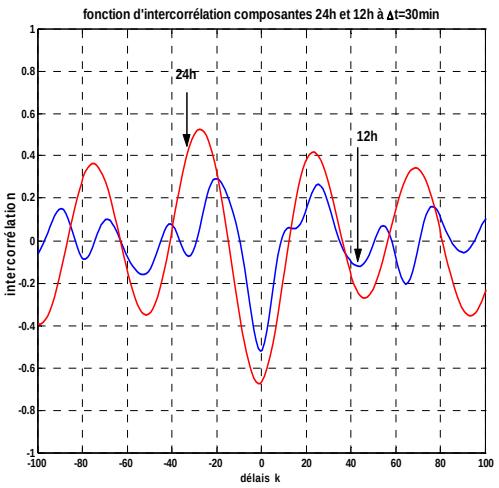



Figure 7.16 : Fonction d'intercorrélation de la composante 24h entre la pression a tmosphérique et la pression absolue non dé-moyennée mesurée dans PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005 (M=100 Δt).

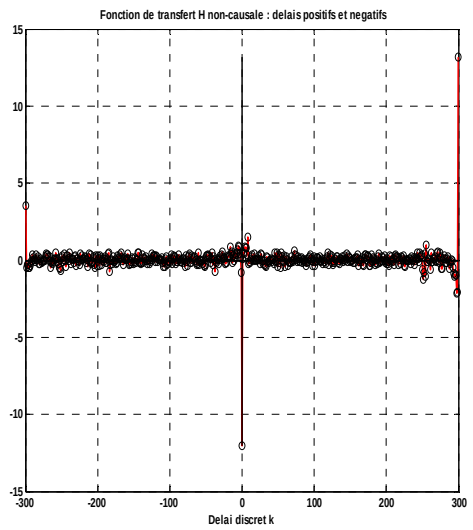



Figure 7.17: Fonction de transfert entre la pression atmosphérique et la pression relative non dé-moyennée dans PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005 (M=300Δt).

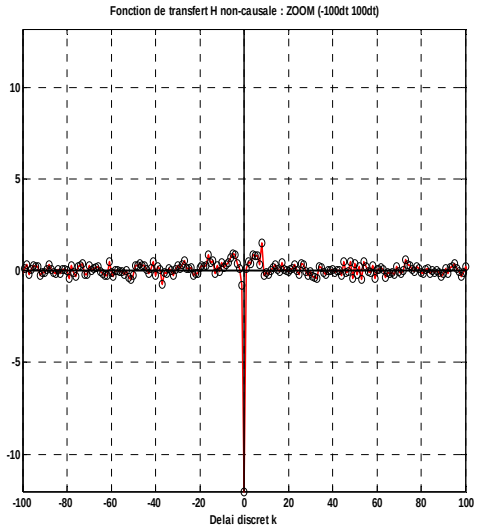



Figure 7.18: Fonction de transfert entre la pression atmosphérique et la pression relative non dé-moyennée dans PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005 (M=100Δt).

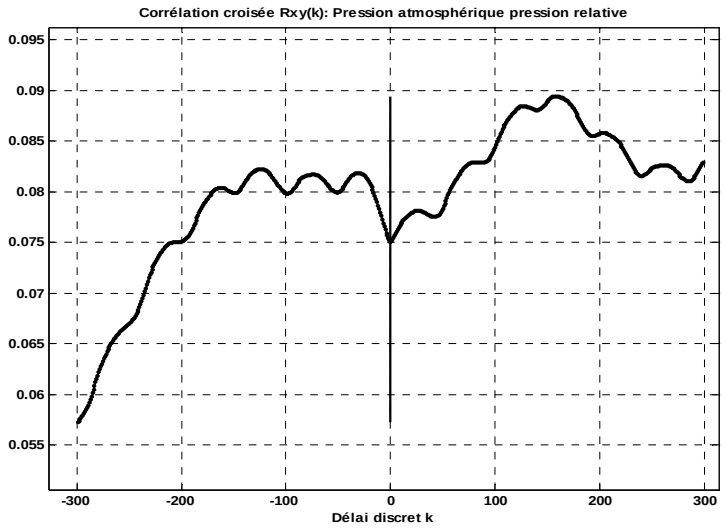



Figure 7.19 : Fonction d'intercorrélation Rxy(k) entre la pression atmosphérique et la pression relative non dé-moyennée dans PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005.

### 7.2.2) Analyse temporel des chroniques stationnaires (Patm) et (Prel)

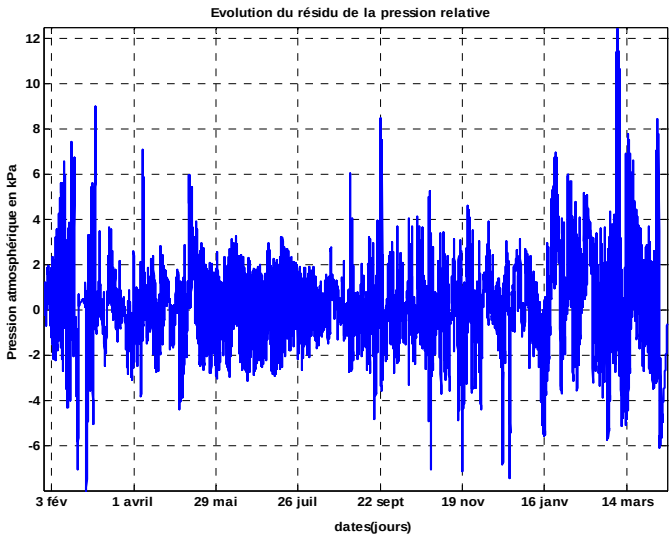



Figure 7.22 : Evolution du résidu de la pression relative dans PP1 entre 29/01/2004 et 12/04/2005, (durée : 20736 Δt).

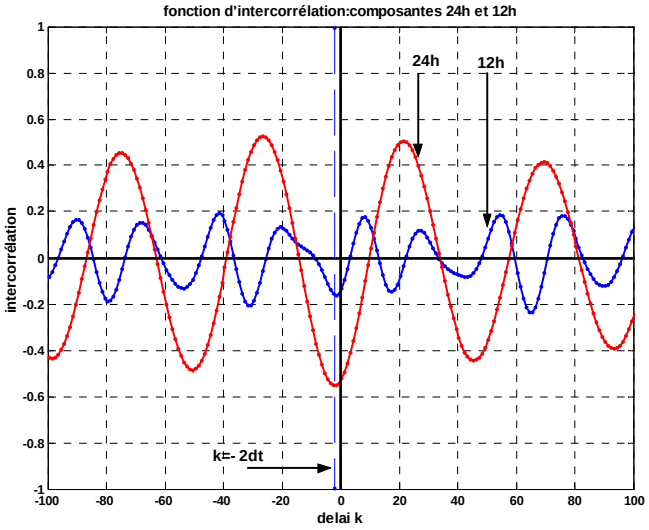



Figure 7.23: Fonction d'intercorrélation des composantes 24h et 12h entre la pression atmosphérique et la pression relative dé-moyennée dans PP1 entre le 29/01/2004 et 12/04/2005 (délai maximal : M=100Δt).

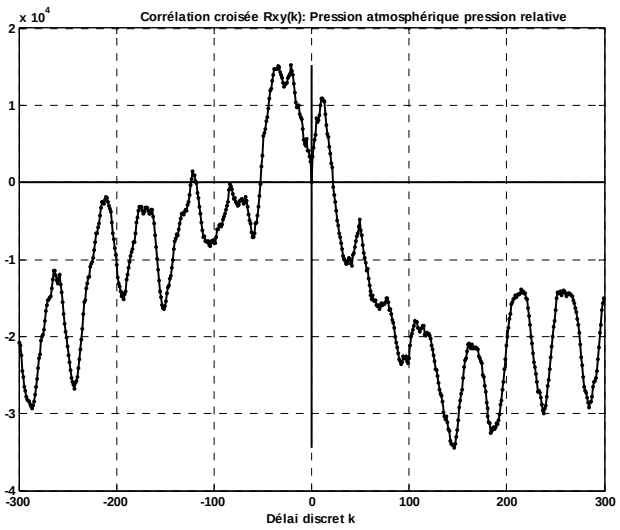



Figure 7.24 : Fonction d'intercorrélation $R_{xy}(k)$ entre la pression atmosphérique et la pression relative dé-moyennée dans PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005(M=300Δt).

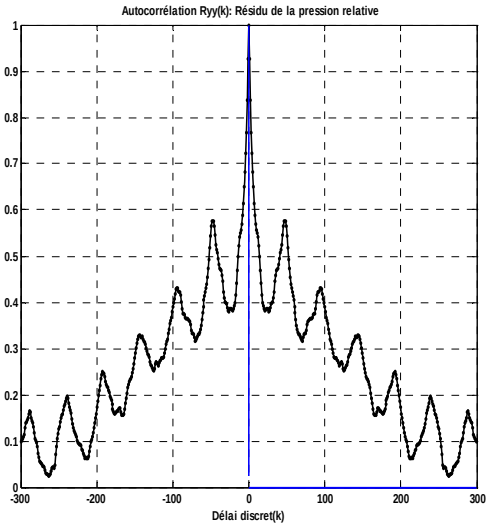



Figure 7.25 : Fonction de corrélation Ryy(k) de la pression relative dé-moyennée dans PP1 entre le 29/01/2004 et 12/04/2005 (délai maximal : M=300).

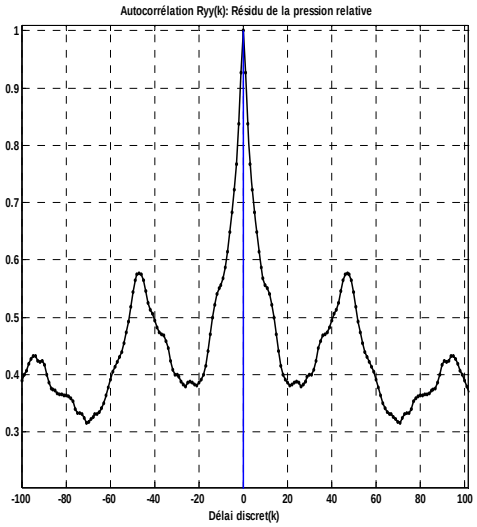



Figure 7.26: Fonction de corrélation Ryy(k) de la pression relative dé-moyennée dans PP1 du 29/01/2004 au 12/04/2005 (délai maximal : M=100).

## 7.3) Comparaison avec le modèle Pluie débit (8000 Δt )

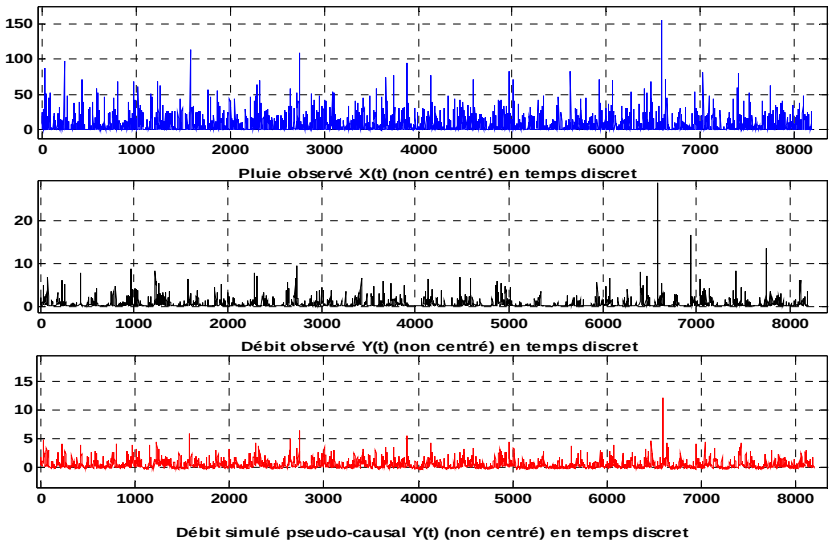



Figure. 7.27: Evolution des chroniques de la pluie et de débit avec un pas de temps (Δt=0.5h).

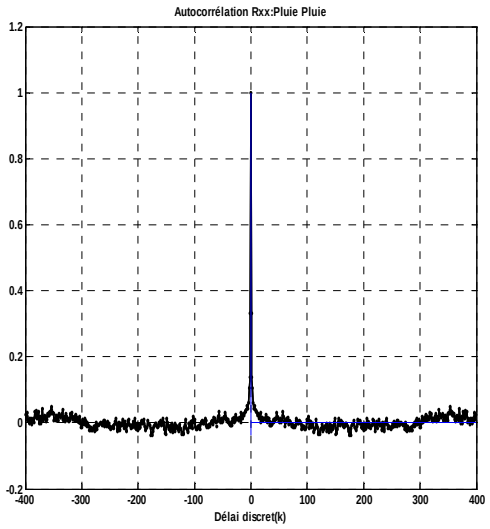



Figure 7.28: Fonction d'autocorrélation Rxx(k) de la pluie (délai maximal : M=400 Δt).

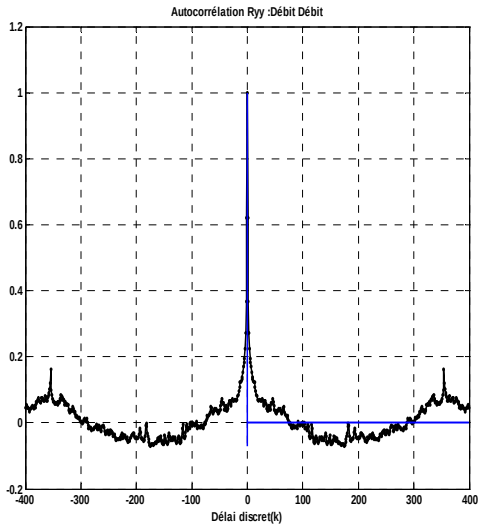



Figure 7.29: Fonction d'autocorrélation Ryy(k) du débit (délai maximal : M=400Δt).

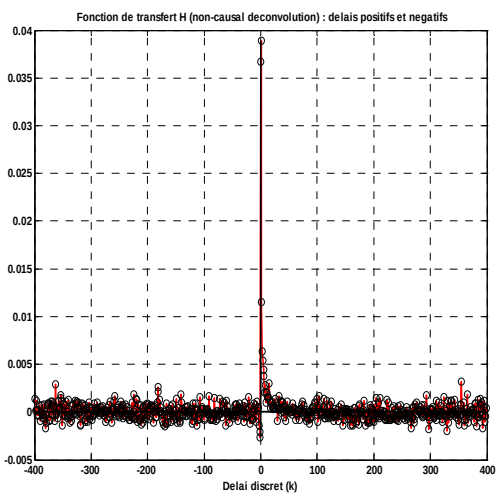



Figure 7.30: Fonction de transfert entre la pluie et débit (M=400 Δt), tracé avec boite outil analyse (R.Ababou).

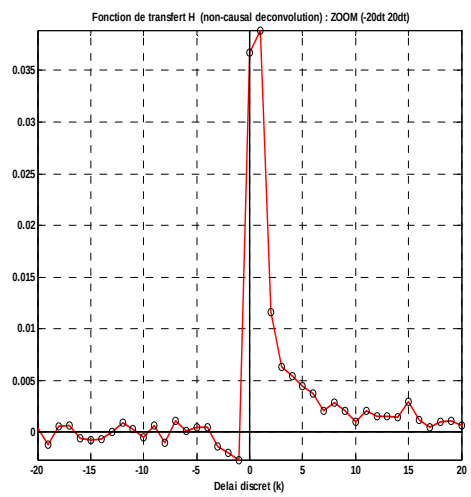



Figure 7.31: Zoom de la fonction de transfert entre la pluie et débit (M=20 Δt), tracé avec boite outil analyse (R.Ababou).

En utilisant les deux méthodes, on remarque que la fonction transfert h(t) entre la pluie et le débit au délai (k=1Δt), tracée avec le programme HUSTATV3 (R.A), ou avec la fonction de corrélation croisée tracée avec la boite à outil ANALYSE (H.F), montre une causalité entre la pluie et le débit.
Le modèle utilisé « a priori » (imposé), est un modèle de convolution non-causale.

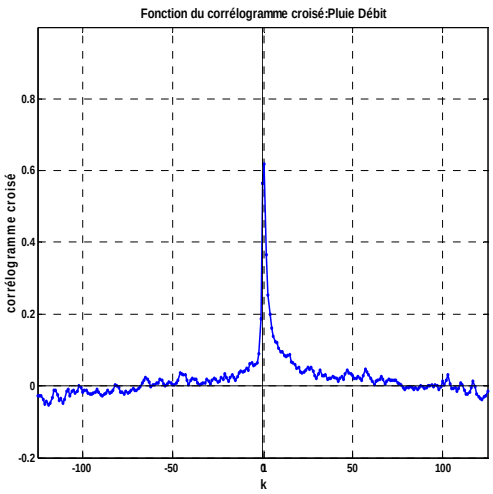



Figure 7.32: Fonction d'intercorrélation entre la pluie et débit (délai maximal : M=125Δt), tracée avec boite à outils analyse (H. Fatmi).

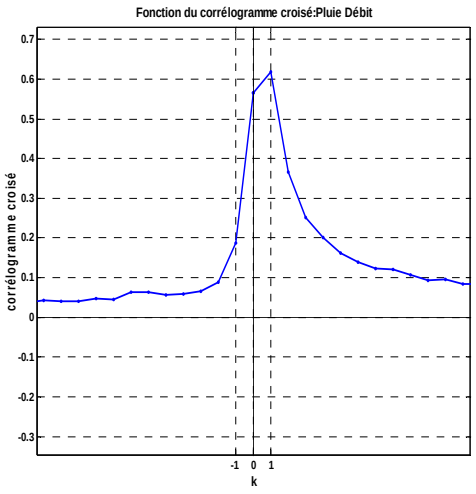



Figure 7.33: Zoom de la fonction d'intercorrélation entre la pluie et débit (délai maximal : M=125Δt), tracée avec boite à outils analyse (H. Fatmi).

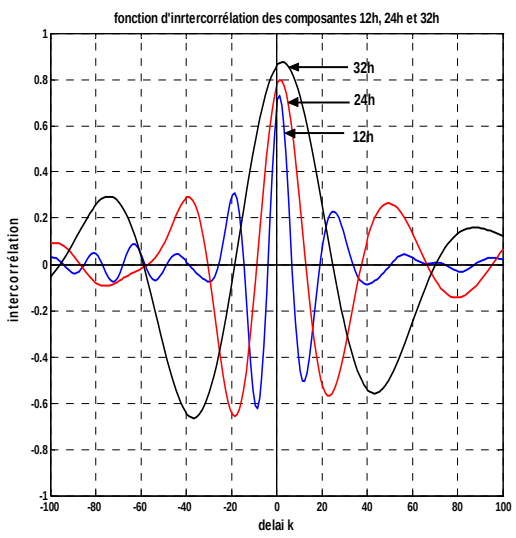



Figure 7.34: Fonction d'intercorrélation des composantes 24h, 12h et 32h entre la pluie et débit.

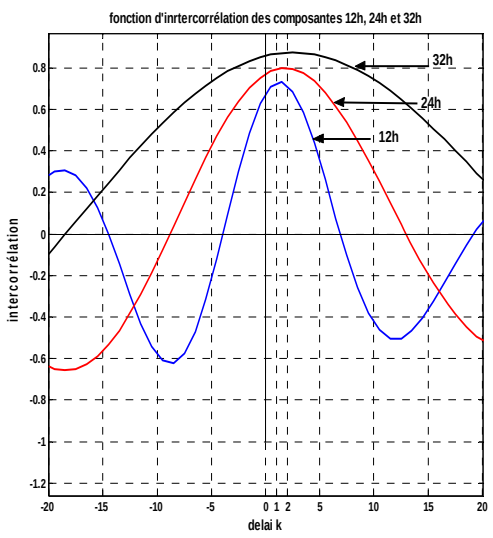


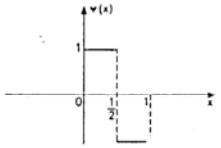
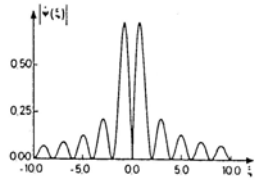
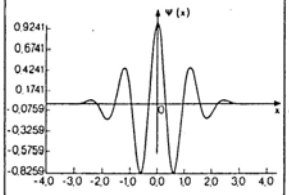
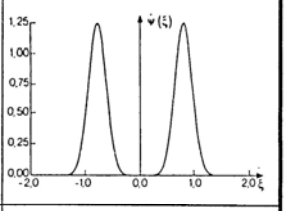
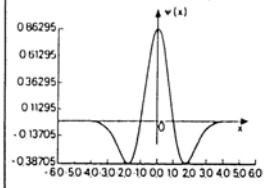
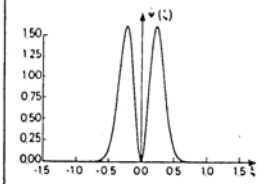

Figure 7.35: Zoom sur la fonction d'intercorrélation des composantes 24h, 12h et 32h entre la pluie et débit.

L'analyse avec la fonction d'intercorrélation des composantes d'échelle dyadique confirme l'effet causal observé avec la fonction d'intercorrélation Rxy(k) et la fonction de transfert h(t) entre la pluie et le débit, voir précédemment.

*ANNEXE 8* :

## Tableaux illustrant différentes ondelettes continues avec leurs représentation temporelle et fréquentielle.

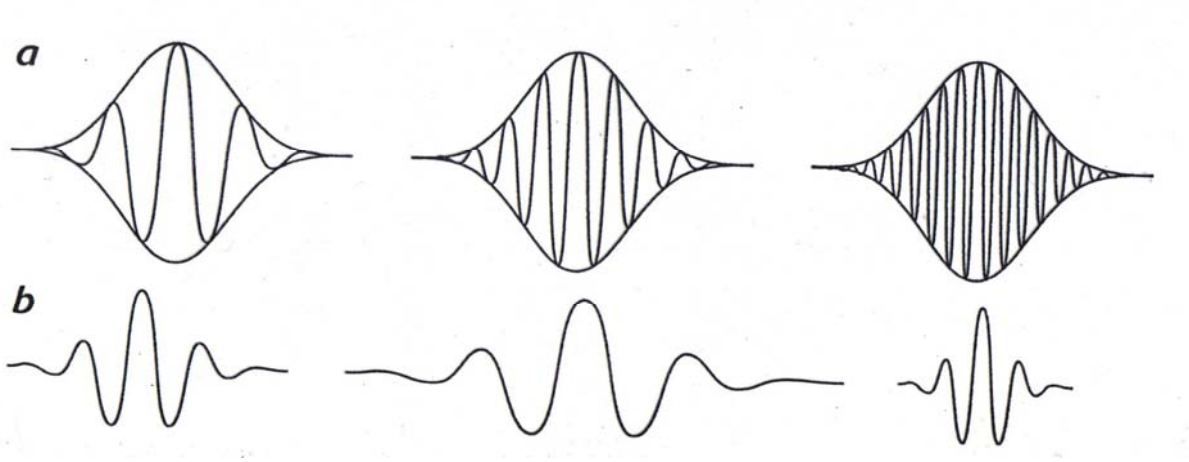
$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

| Expression analytique de ψ(t) | Représentation temporelle | Représentation fréquentielle |
|---|---|---|
| **ondelette de Haar**<br>ψ(t) = 1 pour t∈[0,1/2]<br>-1 pour t∈[1/2,1]<br>0 ailleurs |  |  |
| **ondelette de Morlet**<br>$\psi(t) = e^{\frac{-t^2}{2}} \cdot \cos(5t)$ |  |  |
| **chapeau mexicain**<br>$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3\pi^{-1/4}}} \cdot (1-t^2)e^{-\frac{t^2}{2}}$ |  |  |

**N.B**

a :Coefficient de dilatation ou contraction de l'ondelette ψ

b :Coefficient de translation de l'ondelette (mère) ψ



*ANNEXE 9 :*

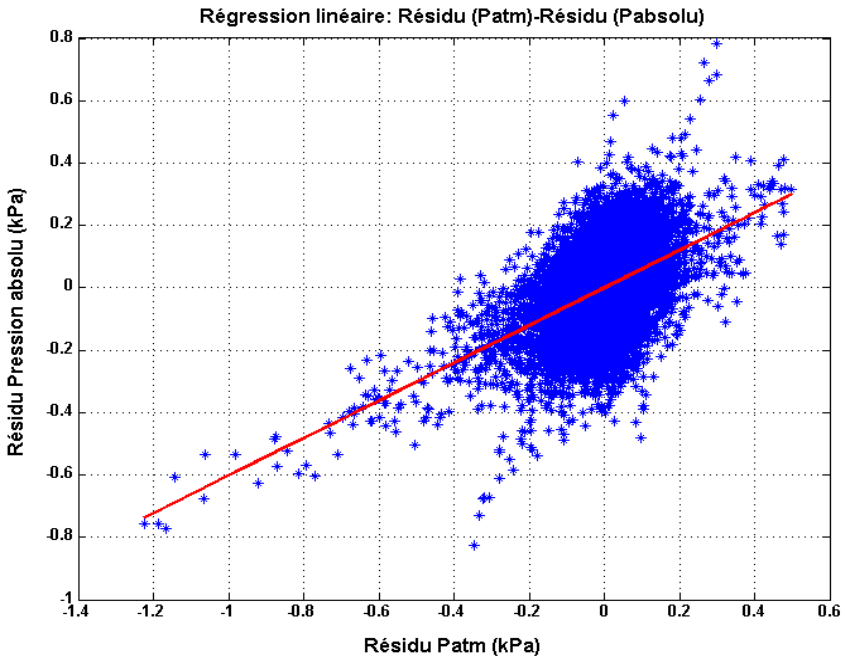



Figure 9.1 : Régression linéaire entre le résidu de Patm(t) et 'Pabs(t)' (en fait le résidu par moyenne mobile wt=12h). Pabs(t) mesurée dans la chambre 5 EST207, la valeur de l'ACF (coefficient de régression linéaire) est de 0.60.

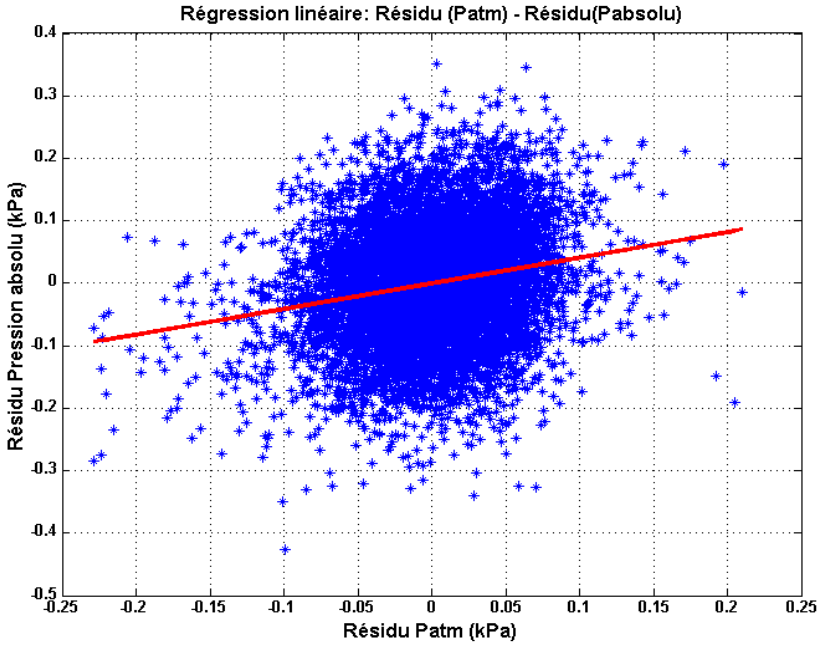



Figure 9.2 : Régression linéaire entre le résidu de Patm(t) et 'Pabs(t)' (en fait le résidu par moyenne mobile wt=12h). Pabs(t) mesurée dans la chambre 11 EST207, la valeur de l'ACF (coefficient de régression linéaire) est de 0.41.

# *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

1. Ababou, R., and L. W. Gelhar, 1990. "Self-similar randomness and spectral conditioning: Analysis of scale effects in subsurface hydrology". Chapter XIV in: *Dynamics of fluids in hierarchical porous media,* J.H. Cushman (ed.), Academic Press, San Diego, p.393-428.
2. Ababou R., A.C. Bagtzoglou & E.F. Wood, (1994): On the Condition Number of Covariance Matrices Arising in Kriging, Estimation, and Simulation of Random Fields, Mathematical Geology, Vol. 26, No. 1, pp. 99-133, 1994.
3. Ababou R., (2008): 'Quantitative Stochastic Hydrogeology: The Heterogeneous Environment'. Chap. 8 in: *Overexploitation & Contamination of Shared Groundwater Resources, NATO Advanced Studies Institute series*, C.J.G. Darnault (ed.), Springer Science + Business Media B.V., 2008, pp. 119-182.
4. Ababou R,A Millard,E.Treille,M Durin,F.Plas 1994 'Continuum Modeling of Coupled Thermo-Mechanical Processes in Fractal Rock'. Computational Methods in Water Resources X, A. Peters et al (eds), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp651-658.
5. Ababou R., A. Millard, E. Treille, et M. Durin, *Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Modeling for the Near Field Benchmark Test 3 (BMT3) of DECOVALEX Phase 2 -- Progress Report,* Rapport DMT/93/488, Commissariat à l'energie Atomique, 188 pp., Saclay, France, 1993.
6. Ababou R., 2007 : Hydrologie Statistique. Polycopié de l'INPT/ENSEEIHT, Département Hydraulique et Mécanique des Fluides, Toulouse. Janvier 2007 (v.1) http://rachid.ababou.free.fr
7. Bearman G., 1989: Waves, Tides and Shallow-Water Processes.
8. Bredehoeft J. D, 1967: Response of well-aquifer system to earth tides. *Journal of Geophysical Research*, 12, p. 3075-3087.
9. Andra, 2005 (Synthèse de la faisabilité du stockage gélogique en formation argileuse, Dossier argile 2005, 239 pp).
10. Blackman, R. B. & John W Tukey 1959. The measurement of power spectral from the point of view of communications engineering.
11. Bras R., I.Rodriguez-Iturbe (1985): Random Functions in Hydrology. Dover, New York, 1985 (re-edited in 1993).
12. Box, G. E. P. & Jenkins, G. M. (1976). Time series analysis: Forecasting and control. Revised edition, Holden-Day, San Francisco.
13. Cabrera, J., Beaucaire, C., Bruno, G., De Windt, L. Genty, A., Ramanbasoa, N., Rejeb, A., Savoye, S., Volant, P., 2001. Projet Tournemire – Synthèse des programmes de recherche 1995-1999, Rapport IPSN DPRE/SERGD 01-19, Paris France.
14. Delay J., Trouiller A., Lavanchy J.M. (2006) Propriétés hydrodynamiques du Callovo-Oxfordien dans l'Est du basin de Paris : comparaison des résultats obtenus selon différentes approches. C.R. Géoscience 338, 892-907.
15. Distinguin M., Lavanchy J.M. (2007) Determination of hydraulic properties of the Callovo-Oxfordian argillite at the Bure site: Synthesis of the results obtained in deep boreholes using several in situ investigation techniques. Physics and Chemistry of the Earth 32, 379-392.
16. Fatmi H., R. Ababou, J.-M. Matray (2008): "Statistical pre-processing and analyses of

hydrogeo-meteorological time series in a geologic clay site (methodology and first results for Mont Terri's PP experiment)". *Physics and Chemistry of the Earth*: Special Issue on «Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement» (Internat. Conf. CLAY'2007, Lille, France) 33(2008) S14-S23.

17. Fatmi H., A. Mangin, J.-M. Matray, 2005: *Treatment and exploitation of pore water pressure time series monitored at the experimental argillaceous site of Tournemire*. Poster in «Clays in natural & engineered barriers for radioactive waste confinement», Tours, 14 mars 2005.
18. Fatmi H., A Mangin, J.M Matray**,** 2005 : *Traitement et exploitation des séries temporelles de pression, température et humidité obtenues sur le site de Tournemire. Rapport IRSN DEI/SARG/n°04-24*, 84 pages.
19. Fatmi H., R Ababou, J.M Matray**,** 2007 : *Méthodologie de prétraitement et d'analyse du signal. Application aux chroniques de données multivariées obtenues au Mont Terri. Rapport IRSN DEI/SARG/n°2007-035*, 27 pages. (*Référence interne : rapport d'avancement No.1, année 2006/07).*
20. Freeze R.A. & J.A. Cherry (1979) : Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 pp.
21. Fickian dispersion in anisotropic porous media. Water Resour. Res. Vol.23(3):453-466.
22. Gaucher E., Robelin C., Matray JM, Negrel G., Gros Y., Heitz JF, Vinsot A., Rebours H., Cassagnabere A., Boucher A. (2004) Andra Underground research laboratory: interpretation of the mineralogical and geochemical data acquired in the Callovo-Oxfordian formation by investigative drilling. Physics and Chemistry of the Earth, 29, pp55-77.
23. Hardy et Beier 1994. Hardy, H.H and Beier,R.A,1996 Fractals in Reservoir Engineering. Word Scientific, Singapore. 359 pp.
24. Hurst, H. E. 1951. Long term storage capacity of reservoirs, Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 116:770-808.
25. Hurst, H. E. 1957. A suggested statistical model for some time series that occur in Nature. 180:494-495.
26. IRSN, 2005 avait de l'institut de radioprotection sur le dossier 2005 Argile, Rapport DSUN°106 d'après le tableau 5 page 54/284.
27. IRSN (2005) Avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le Dossier Argile 2005. Rapport DSU n°106.
28. Jacob C. E., 1940: On the flow of water in an artesian aquifer. *Trans. Am. Geophys. Union*, 2, p.574-786.
29. Labat D., R. Ababou and A.Mangin, 2002: Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques.C. R. Geosciences 334 (2002) 551-556.
30. Labat, R. Ababou, A. Mangin, (2000) Rainfall-runoff relations for karstic springs - Part I : Convolution and spectral analyses. *Journal of Hydrology*, 238, Issues 3-4, 5 December 2000, pp.123-148.
31. Labat D., R. Ababou, A. Mangin, 1999: Wavelet analysis in karstic hydrology. 1rst part: Univariate analysis of rainfall rates and karstic spring runoffs. *C.R.Acad.Sci. de Paris*, Sci. de la Terre et des Planètes (Earth & Planetary Sciences), 1999, 329, pp.873-879.
32. Labat D., R. Ababou, A. Mangin, 1999: Wavelet analysis in karstic hydrology. 2nd

part: Rainfall-runoff cross-wavelet analysis. *C.R. Acad.Sci. de Paris*, Sciences Terre et Planètes (Earth & Planetary Sciences), 1999, 329, pp.881-887.

33. Labat D., R. Ababou, A. Mangin, 1999: Linear and Nonlinear Models Accuracy in Karstic Springflow Prediction at Different Time Scales. SERRA: Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 13:337-364, Springer-Verlag.
34. Labat, R. Ababou, A. Mangin, (2000) Rainfall-runoff relations for karstic springs - Part II : Continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology,* 238, Issues 3-4, 5 December 2000, pp.149-178.
35. Milotti E., 1998 : Le bruit en 1/f. Pour la Science, No.246, Avril 1998, pp.88-93.
36. Molz, F. J., H. H. Liu, and J. Szulga (1997). "Fractional Brownian motion and fractional Gaussian noise in subsurface hydrology: A review, presentation of fundamental properties, and extensions". Water Ressources. Res., Vol. 33(10): 2273-2286 (1997).
37. Mangin, A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. J.Hydrol. 67, 25-43.
38. Marshall P, J. Croisé, L. Schilckenrieder,J,-Y. Boisson, P. Vogel et S. Yamamoto, 2004: Synthesis of Hydrogeological Investigations at the Mont Terri site (Phases 1 to 5). In: Mont Terri Project Hydrogeological Synthesis, Osmotic Flow. P. Heitzmann (e.d.). Reports of the Federal Office for Water and Geology (FOWG), Geology Series No.6, Switzerland.
39. Matray JM, Savoye S, Cabrera J. (2007) - Desaturation and structures relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite and their impact on the hydraulic head profiles. Engineering Geology 90: 1-16.
40. Mandelbrot, B. B, and J. W. van Ness. 1968. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. SIAM Rev. Vol. 10, P 422-437.
41. Molz, F. J., H. H. Liu, and J. Szulga. 1997. Fractional Brownian motion and fractional Gassian noise in subsurface hydrology: A review, presentation of fundamental properties, and extensions. Water Resour. Res. Vol. 33(10): 2273-2286.
42. Montroll, E. W., and G. H. Weiss. 1965. Random walks on lattices, II. J. Math. Phys., 6(2): 167-181.
43. Melchior P, 1978: The tides of the planet earth. Pergamon Press, Paris, 609 pp.
44. Mandelbrot, B. B., and J. W. van Ness (1968). Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. SIAM Review, Vol. 10: 422-437 (1968).
45. Marsily G. de, G. Vasseur and S. Violette (2002), Theoretical prediction of poroelastic properties of argillaceous rocks from in situ specific storage coefficient,Water Resources Research, Vol. 38, No. 10, 1207 2002. 12 pages année 2002.
46. Mallat, S. (1989): A Theory For Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. IEEE Trans. on Pattern Anal. & Mach. Int., 11 (7), pp. 674-693, 1989.
47. Marsaud B., A. Mangin, F.Belc (1993) : Estimation des caractéristiques physiques d'aquifères profonds à partir de l'incidence barométrique et des marées terrestres. *Journal of Hydrology*, 144 85-100.
48. Max J. (1980) *Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques*, Masson, 379 pages. [*also* : Max J. & J-L. Lacoume, Masson, Paris, 5th e.d.].

49. Ndumu, A. S., and P. S. Addison. 2001. Scale-dependent subsurface dispersion: a fractal-based stochastic model. Journal of Hydrologic Engineering. Vol. 6(1):34-42.

50. Neuman, S. P., C L. Winter, and C. M. Newman. 1987. Stochastic theory of fieldscale

51. Neuman, S. P. 1990. Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media. Water Resour. Res. Vol. 26(8):1749-1758.

52. Ozanam O., Hoteit N., Bemer E., Heitz J.F. (2002) Experimental determination of poroelastic parameters of a clayey rock. In : Biot Conference, Proc. 2nd Biot Conf. on Poromechanics, Grenoble, France.

53. Pearson et al 2003, ,D Acros, A Bath, J-Y Boisson, A. M Fernandez,H-E.Gabler, E Gaucher, A gaustcher,L.Griffault, P.Hernan and H.N.Waber 2003, Mont Terri Project Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory N.6.

54. Philip, J. R. 1986. Issues in flow and tranpsort in heterogeneous porous media. Transport. Porous Media. 1:319-338.

55. Paul Bossart and Marc Thury, Mont Terri Laboratory Project, Programme 1996 to 2007 and Results.

56. Sahimi, M. 1993. Fractal and superdiffusive transport and hydrodynamic dispersion in heterogeneous porous media. Transport in Porous Media. Vol. 13(1):3-40.

57. S.T.Horseman,F.H. Harrington, D.J.Birchall, D.J.Noy and R.J.Cuss Hydrogeologic analyses and synthesis (HA Experiment): Consolidation and rebound properties of opalinus clay: A long-term, fully-drained test Environmental Protection Programme Com-missioned Report CR/05/128 (Commercial-In Confidence), Technical Note 2003-03 revised August 2006 Mont Terri Suisse.

58. Tompson A.F.B., R. Ababou, et L. W. Gelhar, (1989): Implementation of the Three-Dimensional Turning Bands Random Field Generator, Water Resour. Res., 25(10), 2227-2243, 1989.

59. Takeuchi, H On the earth tide of the compressible earth of variable density and elasticity, Trans. Am Geophys. Union, 31,651-689, 1950.

60. Thury et Bossart (1999) Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments Performed in 1996 and 1997. Rapports géologiques N23 Bern, 1999, Switzerland.

61. Vanmarke E, 1983 Random Fields (Analysis and Synthesis) The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 382 pp.

62. Van Loon, et al 2004, Long term diffusion experiment at Mont Terri: first results from field and laboratory data, Applied Clay Science 26 PP 123-135.

63. Wheatcraft, S. W., and Scott W. Tyler. 1988. An explanation of scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry. Water Resour. Res. Vol. 24(4):566-578.

64. Yevjevich V, (1972) *Stochastic Processes in Hydrology*. Water Resources Publication, Fort Collins, Colorado, 276 p.

65. Yaglom, A. M. 1987. Correlation Theory of Stationary and Related Random Functions: Basic Results. Springer-Verlag, New York.

66. Zhou L., 2002: *Solute transport in layered and heterogeneous soils*. PhD thesis, Louisiana State University, U.S.A. (2002), 229 pp.