Document public

Appui au SCHAPI 2011 – Module 3 : Apport du suivi de la zone non saturée de la craie dans l'amélioration des prévisions de crues dans le bassin de l'Hallue

Rapport final

BRGM/RP 60022-FR
Décembre 2011

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Appui au SCHAPI 2011 – Module 3 : Apport du suivi de la zone non saturée de la craie dans l'amélioration des prévisions de crues dans le bassin de l'Hallue

Rapport final

BRGM/RP 60022-FR
Décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public BRGM PSP10EAU12 et 11RISI01

N. Amraoui, D. Thiéry et A. Wuilleumier

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Y. Barthélemy	Nom : *E. Foerster*
Date : 18/12/2011	Date : 20/12/2011
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Aquifère de la Craie, Zone non saturée, Modélisation, Prévision, Crues ; site expérimental de Warloy-Baillon

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Amraoui N., Thiery D., Wuilleumier A. 2011 – Apport du suivi de la zone non saturée de la craie dans l'amélioration de la prévision des crues dans le bassin de l'Hallue. Rapport BRGM/RP 60022-FR.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la convention entre le BRGM et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), trois axes de travail ont été définis pour l'année 2011 :

- L'application de l'indicateur karst sur deux bassins versants sélectionnés parmi les propositions de plusieurs Services de Prévision des Crues (SPC)
- L'intérêt la caractérisation du comportement hydrodynamique des Bassins Versants (BV) basée sur l'Indicateur de Persistance des Réseaux (IDR)
- **le rattachement de l'étude sur les remontées de nappe faite pour le compte du SPC Artois – Picardie sur le site expérimental de Warloy Baillon (Hallue), ainsi que la modélisation maillée du bassin de l'Hallue.**

Ce programme de travail est financé à 80% par la DGPR, et à 20% par le BRGM dans le cadre de ses actions de Service Public.

Ce rapport présente les travaux réalisés en 2010 et 2011 sur l'axe 3, concernant l'étude des remontées rapides de la nappe de la craie et l'apport du suivi de la zone non saturée de la craie dans l'amélioration des prévisions de crue dans le bassin de l'Hallue. Rappelons que les travaux réalisés en 2010 ont été faits dans le cadre du projet de service public PSP10EAU financé par la DREAL NPC et le BRGM. Plusieurs volets ont été traités dans le cadre de cette étude :

La première partie du rapport présente les résultats du suivi du site expérimental de Warloy-Baillon opéré en 2011. Ce site a été mis en place en 2005 dans le cadre du projet Flood-1 pour le suivi de la zone saturée et non saturée de la craie fracturée.

La deuxième partie concerne l'étude des remontées rapides du niveau de la nappe dans le bassin de la Somme.

La dernière partie concerne l'exploitation des données acquises dans le cadre du projet Flood-1 (2004-2008) sur le site expérimental de Warloy-Baillon pour étudier l'apport du suivi de la zone non saturée dans l'amélioration des prévisions de crue dans le bassin de l'Hallue. Cette partie intègre :

- l'analyse des données en lien avec le comportement de la nappe et du cours d'eau.
- La modélisation globale GARDENIA avec prise en compte l'état de la zone non saturée et amélioration de la prévision.
- La modélisation maillée à l'échelle du bassin de l'Hallue avec prise en compte des processus d'écoulement dans la zone non saturée de la craie fracturée.

Sommaire

1. Introduction 11

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE 11

1.2. DÉMARCHE 12

2. Suivi du Site de Warloy-Baillon 13

2.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SITE ET DES ÉQUIPEMENTS INSTALLÉS 13

2.1.1. Tensiomètres 15

2.2. OPÉRATIONS DE SUIVI 15

2.2.1. Gestion des centrales d'acquisition, remplissage des tensiomètres et suivi piézométrique 16

2.2.2. Disparition de la porte grillagée 16

2.3. DONNÉES ACQUISES EN 2011 17

2.3.1. Données météorologiques 17

2.3.2. Données piézométriques 19

2.3.3. Données de teneur en eau de la zone non saturée du sous-sol 19

2.3.4. Données de succion (pression négative) dans la zone non saturée 20

3. Étude des remontées rapides du niveau de la nappe dans le bassin de la Somme 23

3.1. CHOIX DE PIÉZOMÈTRES REPRÉSENTATIFS DU BASSIN VERSANT DE LA SOMME 23

3.2. IDENTIFICATION DES REMONTÉES RAPIDES DE NIVEAU 25

3.2.1. Ensemble des données disponibles 25

3.2.2. Analyse au pas de temps mensuel 29

3.2.3. Analyse au pas de temps journalier 31

3.2.4. Corrélation avec la variation de stock d'eau dans la zone non saturée (ZNS) 36

3.3. SYNTHÈSE 37

4. Analyse des résultats du projet Flood-1 en lien avec le niveau de la nappe et le débit de l'Hallue 39

4.1. DONNÉES UTILISÉES POUR CETTE ANALYSE 39

4.2. ANALYSE DE LA RÉACTION DE LA NAPPE DE LA CRAIE AU DROIT DU SITE DE WARLOY-BAILLON ET DU DÉBIT DE L'HALLUE. 40
4.2.1. Analyse de la situation hydrologique..... 41
4.2.2. Niveau piézométrique et débit de l'Hallue 41

4.3. DÉLAI ENTRE L' EFFET SEUIL OBSERVÉ DANS LA ZONE NON SATURÉE, L'AUGMENTATION RAPIDE DU DÉBIT DE L'HALLUE, ET CELLE DU NIVEAU DE LA NAPPE 43
4.3.1. Notion de seuil de pression négative dans la craie non saturée 43
4.3.2. Délai entre l'effet seuil observé dans la ZNS et l'augmentation du débit de l'Hallue 44
4.3.3. Délai entre l'effet seuil observé dans la ZNS et la remontée rapide de la nappe 46

4.4. CONCLUSIONS 49

5. Modélisation par Gardénia à deux entrées du débit de l'Hallue et amélioration sur la prévision 51

5.1. OBJECTIFS 51

5.2. LES VARIABLES À ANALYSER 51

5.3. ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES RÉACTIONS 57

5.4. MODÉLISATION DU DÉBIT À BAVELINCOURT PAR GARDÉNIA AVEC 2 ENTREES : LA PLUIE + UN ÉTAT DANS LA ZNS 60

5.5. CONCLUSION DE LA MODÉLISATION DU DÉBIT À BAVELINCOURT PAR GARDÉNIA AVEC 2 ENTRÉES 64

6. Modélisation distribuée avec prise en compte de l'écoulement dans la zone non saturée 67

6.1. MODÉLISATION À L'ÉCHELLE DU BASSIN DE L'HALLUE. 67
6.1.1. Localisation et description du bassin 67
6.1.2. Rappel sur le modèle hydrodynamique du bassin de l'Hallue 68
6.1.3. Prise en compte des écoulements à travers la zone non saturée de la craie fracturée dans le modèle de l'Hallue 70
6.1.4. Résultats 73

7. Conclusions 79

8. Bibliographie 81

Liste des illustrations

Figure 1 : Bassin versant de la Somme et situation du bassin versant de l'Hallue 13

Figure 2 : Schéma du site expérimental de Warloy-Baillon (vue en plan) 14

Figure 3 : Schéma du site expérimental de Warloy-Baillon (vue en coupe) 14

Figure 4 : Mise en place d'une clôture provisoire suite à la disparition de la porte grillagée fermant l'accès au site 17

Figure 5 : Pluviométrie et barométrie enregistrées à Warloy-Baillon de 2006 à 2011 18

Figure 6 : Variations de la température et du degré hygrométrique de l'air entre 2008 et 2011 18

Figure 7 : Variations du niveau de la nappe aux piézomètres P1 et P2 entre 2005 et 2011 19

Figure 8 : Variations de la teneur en eau dans la zone non saturée entre 2009 et 2011 (profondeurs inférieures à 1,2 m) 20

Figure 9 : Variations de la succion dans la zone non saturée entre 2009 et 2011 (profondeurs inférieures à 1 m) 21

Figure 10 : Variations de la succion dans la zone non saturée entre 2009 et 2011 (profondeurs comprises entre 22,5 et 26,5 m) 22

Figure 11 : Localisation des piézomètres retenus pour l'analyse 24

Figure 12 : Vitesses de remontée piézométrique calculées à Etaves-et-Bocquiaux (00497X0018) pour différentes fréquences d'acquisition 25

Figure 13 : Absence de corrélation entre battement maximal de la nappe et vitesse maximale de remontée du niveau piézométrique (toutes mesures disponibles) 27

Figure 14 : Absence de corrélation entre battement maximal de la nappe et nombre de jours de remontée piézométrique rapide (toutes mesures disponibles) 27

Figure 15 : Piézomètres contributeurs au nombre de jours de remontée piézométrique rapide en 1994, 1995 et 2001 29

Figure 16 : Représentation en vecteurs propres des niveaux piézométriques journaliers entre le 01/07/2005 et le 30/06/2010 33

Figure 17 : Absence de corrélation entre le battement de la nappe (en m, en abcisse) et la vitesse maximale de remontée piézométrique journalière (en cm/j, en ordonnées) entre le 01/07/2005 et le 30/06/2010 34

Figure 18 : Recherche de corrélation entre le battement de la nappe (en m, en abcisse) et le nombre de jours de remontée piézométrique rapide entre le 01/07/2005 et le 30/06/2010 34

Figure 19 : Comparaison entre la vitesse de remontée de la nappe (courbe rouge) à Senlis-le-Sec et la variation de stock d'eau dans la zone non saturée à Warloy-Baillon (courbe bleue) 36

Figure 20 : Comparaison entre la vitesse de remontée de la nappe à Senlis-le-Sec (courbe rouge) et la variation de stock d'eau dans la zone non saturée (courbe bleue). Zoom sur la période 1999-2003 37

Figure 21 :Bassin de l'Hallue - Localisation du site expérimental, des piézomètres et des stations de jaugeage analysés 40

Figure 22 : Comparaison des pluies brutes mensuelles à Bernaville entre septembre 2000 et avril 2001, et à Warloy-Baillon entre 2006 et 2008. 41

Figure 23 : Pluie journalière et profondeur de la nappe dans le piézomètre Pz1 du site expérimental. 42

Figure 24 : Niveau piézométrique à Senlis-le-Sec et débit de l'Hallue à Bavelincourt entre 2006 et 2008. 43

Figure 25 : Évolutions comparées du potentiel matriciel de la craie non saturée à Warloy-Baillon à des profondeurs de 1.5 m et 4 m, et du débit de l'Hallue à Querrieu. 45

Figure 26 : Pluie efficace et débit de l'Hallue à Bavelincourt. Les pointillées rouges représentent les périodes auxquelles le seuil de succion de 50 cm d'eau (soit 5 kPa) a été dépassé aux profondeurs de suivi dans la craie. 46

Figure 27 : Évolutions comparées du potentiel matriciel de la craie non saturée à Warloy-Baillon à des profondeurs de 1.5 m et 4 m, et du niveau de la nappe dans le piézomètre Pz1.. 48

Figure 28 : Pluie efficace et augmentation du niveau de la nappe dans le Piézomètre Pz1. Les pointillées rouges représentent les périodes auxquelles le seuil de succion de 50 cm d'eau (soit 5 kPa) a été dépassé aux profondeurs de suivi dans la craie. 49

Figure 29 : Débit et niveau piézométrique dans le bassin de l'Hallue : Très bonne cohérence entre les 2 séries 53

Figure 30 : Teneurs en eau calculées à 4 m et 8 m de profondeur (1989-2008). La série à 8 m est nettement plus amortie. 54

Figure 31 : Stocks en eau calculés dans les tranches 0 m- 4.25 m, 4.25 m - 8 m, et 8 m – 27 m de profondeur (1989-2008). 55

Figure 32 : Flux de percolation calculé à 8 mètres de profondeur, comparé aux débits journaliers à Bvelincourt. Les pointes de flux isolées ne suffisent pas à prévoir les pointes de débit. 56

Figure 33 : Réactions aux variations de teneur en eau à 4 m et à 8 m de profondeur. À gauche : corrélations croisées ; à droite réponse cumulée. 58

Figure 34 : Réactions aux variations de stock en eau de 4 à 8 m et de 8 à 27 m de profondeur. À gauche : corrélations croisées ; à droite réponse cumulée. 58

Figure 35 : Réactions aux variations de Flux de percolation à 8 m de profondeur. À gauche : corrélations croisées ; à droite réponse cumulée ; en bas : réponse impulsionnelle. On note une réponse rapide au début puis beaucoup plus lente. 59

Figure 36 : Réactions aux variations de niveaux piézométrique à Senlis-le-Sec. À gauche : corrélations croisées ; à droite réponse cumulée ; en bas : réponse impulsionnelle. Réaction rapide de durée ne dépassant pas 15 jours. 59

Figure 37 : Modélisation de référence 1985-2003 : Entrée unique = Pluie = Lame d'eau moyenne. Corrélation : R = 0.935 ; écart-quadratique = 0.237 m^3/s 60

Figure 38 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Teneur en eau à 800 cm. Corrélation (Racine de Nash) = 0.962. Amélioration : de 0.935 à 0.962. Écart-quadratique = 0.182 m3/s => Gain 23% 61

Figure 39 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Stock en eau dans la tranche 400-800 cm. Corrélation (Racine de Nash) = 0.961 Amélioration : de 0.935 à 0.961. Écart-quadratique = 0.186 m^3/s => Gain 22% 61

Figure 40 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Flux de percolation calculé à 8 m de profondeur. Corrélation (Racine de Nash) = 0.961. Amélioration : de 0.935 à 0.961. Écart-quadratique = 0.185 m^3/s => Gain 22% 62

Figure 41 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Flux calculé à 800 cm. Visualisation, en vert, de l'influence (à travers GARDÉNIA) du flux de percolation à 800 cm. 62

Figure 42 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Niveau Observé Senlis-le-Sec. Corrélation (Racine de Nash) = 0.969. => Amélioration : de 0.935 à 0.969. En bas, période 1985-2009. La simulation avec prise en compte du niveau piézométrique à Senlis-le-Sec permet une bonne simulation mais … peu de possibilité d'anticipation. 63

Figure 43 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Niveau Observé Senlis-le-Sec. Visualisation, en vert, de l'influence (à travers GARDÉNIA) du niveau piézométrique à Senlis. 64

Figure 44 : Simulation avec prise en compte du flux de percolation à 800 cm 30 jours auparavant. Corrélation : R = 0.958 ; écart-quadratique = 0.193 m3/s => Gain 19% 64

Figure 45 : Localisation du sous-bassin de l'Hallue. 68

Figure 46 : Coupes NS et WE du modèle bicouche du bassin de l'Hallue. 69

Figure 47 : Schéma décrivant la prise en compte dans le modèle de l'Hallue de l'écoulement à travers la zone non saturée de la craie. 70

Figure 48 : Flux de percolation calculé à la base de la colonne de craie non saturée à différentes profondeurs. 71

Figure 49 : Zoom sur l'année 2001. 72

Figure 50 : Classes des épaisseurs de la zone non saturée et localisation des piézomètres et des stations hydrométriques présents sur le bassin. 72

Figure 51 : Simulation du niveau de la nappe à Senlis-le–Sec, avec (b) et sans (a) prise en compte de l'écoulement à travers la zone non saturée dans le calcul de la recharge. 75

Figure 52 : Simulation du niveau de la nappe à Harponville, avec (b) et sans (a) prise en compte de l'écoulement à travers la zone non saturée dans le calcul de la recharge. 76

Figure 53 : Simulation du débit de l'Hallue à Bavelincourt, avec (b) et sans (a) prise en compte de l'écoulement à travers la zone non saturée dans le calcul de la recharge. 77

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Dans le fonctionnement actuel du Service de prévision des crues Nord Pas-de-Calais, les décisions prises par le SPC en termes de couleur de vigilance sont faites sur la base des prévisions météo, de l'état initial présumé des sols et du niveau des cours d'eau. À ce stade de décision, les comportements de la nappe de la craie (zone saturée de la craie) et de la zone non saturée (ZNS) sus-jacente ne sont donc pas directement pris en compte dans l'annonce d'un évènement de crue. Le SPC souhaite :

1- Établir un schéma conceptuel affichant quelques ordres de grandeur pour illustrer l'impact de la ZNS sur la genèse des crues de la Somme. En particulier, préciser les temps caractéristiques qui interviennent dans le système nappe de la craie – eaux de surface :
   - Temps entre l'effet de seuil constaté dans la ZNS et ses conséquences sur la recharge de la nappe (niveau piézométrique).
   - Temps de montée du niveau de la nappe
   - Temps de propagation entre l'accroissement du niveau de la nappe et l'accroissement des débits du réseau hydrographique.

   Il importe de savoir à partir de quel temps de retour (pluviométrique, débitmétrique ou bien piézométrique) les effets de seuils associés au comportement de la ZNS ont une influence prépondérante dans la genèse de la crue.

2- Exploiter les résultats du projet Flood-1 relatifs aux stations hydrométriques de l'Hallue (Bavelincourt ou Querrieu). Il s'agit :
   - d'évaluer la faisabilité de l'extrapolation de la connaissance de la ZNS acquise sur le site de Warloy-Baillon à l'ensemble du bassin de l'Hallue.
   - de relier par modélisation ou indicateurs le suivi en temps réel sur ce site au suivi pluviométrique, au comportement piézométrique de la nappe, puis aux débits enregistrés aux stations.
   - d'évaluer l'apport de ce suivi en temps réel pour l'aide à la décision quant à une vigilance 24h. La question pourrait être : *vis-à-vis de seuils de débits de crues fictifs à la station de Bavelincourt, qu'apporte l'exploitation opérationnelle du projet Flood-1 en termes d'anticipation et/ou de fiabilisation des prévisions ?*
   - de réaliser une comparaison entre une prévision réalisée à l'aide du *suivi piézo* du bassin et une prévision réalisée à l'aide du *suivi piézo* **et** *du suivi de la ZNS.*

Cette étude a pour objectifs :

1. de poursuivre l'acquisition des données hydrogéologiques et climatiques sur le site expérimental de Warloy-Baillon mis en place en 2005 dans le cadre du projet Flood-1 pour le suivi de la zone saturée et non saturée de la craie fracturée.

2. d'exploiter les résultats du projet INTEREG III A « Flood1 » (2004-2008) en vue d'étudier dans quelle mesure le suivi des paramètres caractérisant la zone non saturée apporterait une amélioration à la prévision des crues. L'étude comporte 2 volets : un volet d'analyse des données de la zone saturée et non saturée de la craie, données acquises sur le bassin de la Somme et le sous-bassin de l'Hallue (pour la zone non saturée de la craie), et un volet de modélisation pour évaluer l'apport de la ZNS dans l'amélioration de la prévision.

1.2. DÉMARCHE

La démarche suivie dans cette étude consiste dans un premier temps à exploiter les données de l'évolution de la surface libre de la nappe de la craie dans le bassin de la Somme, à travers les niveaux piézométriques, pour analyser les phénomènes de remontée rapide de la nappe et identifier leur variabilité spatio-temporelle.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes focalisés sur l'exploitation des données acquises dans le cadre du projet INTERREG FLOOD1 sur le site expérimental de Warloy-Baillon, pour étudier les relations entre l'évolution des variables de la zone non saturée de la craie (pression négative de l'eau et teneur en eau), la pluie, les niveaux de nappe et le débit de l'Hallue.

Enfin, et afin de relier par modélisation le suivi en temps réel sur le site de Warloy-Baillon au suivi de la pluie, du niveau de la nappe et du débit du cours d'eau, deux approches de modélisation complémentaires ont été mises en œuvre, une approche dite globale, utilisée pour la prévision en temps réel, et une approche plus complexe dite distribuée.

Jusqu'à présent, dans la modélisation globale la pluie a été utilisée comme unique donnée d'entrée pour prévoir le débit à l'exutoire du bassin. Dans la présente étude, en plus de la pluie, la teneur en eau et le stock d'eau dans la ZNS seront utilisés comme entrées additionnelles pour prévoir le débit à l'exutoire. Le but est d'évaluer le gain en termes d'amélioration de la prévision du débit. Par ailleurs, une modélisation maillée du bassin de l'Hallue avec prise en compte de l'écoulement complexe dans la craie fracturée non saturée a été entreprise pour étudier le rôle de la zone non saturée dans les crues, et notamment lors des remontées rapides du niveau de la nappe.

2. Suivi du Site de Warloy-Baillon

2.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SITE ET DES ÉQUIPEMENTS INSTALLÉS

Le site expérimental de Warloy-Baillon, mis en place en 2005 dans le cadre du programme de recherche « Flood-1 », a été équipé pour le suivi de la Zone Saturée et de la Zone Non Saturée de la craie fracturée. Ce programme, qui s'est achevé en 2008, a permis de mieux comprendre les mécanismes d'écoulement dans la zone non saturée de la craie fracturée, et de développer des méthodes et outils pour la prévision du risque d'inondation en milieu crayeux.

Comme la suite du projet Flood-1 (projet E2ACS), en discussion avec les Services de l'État, n'est pas envisagée à très court terme, ces Services (DREAL Picardie et Service de Prévision des Crues Nord-Pas-de-Calais) et le BRGM ont souhaité que l'acquisition des données soit poursuivie en vue du futur programme « E2ACS », afin de disposer de longues séries de données pour alimenter les modèles de simulation.

Le site expérimental de Warloy-Baillon est localisé dans le bassin versant de l'Hallue, affluent en rive droite de la Somme. Ce bassin versant se situe au nord-est d'Amiens, le site se trouvant à une trentaine de kilomètres de la capitale régionale (cf. Figure 1).

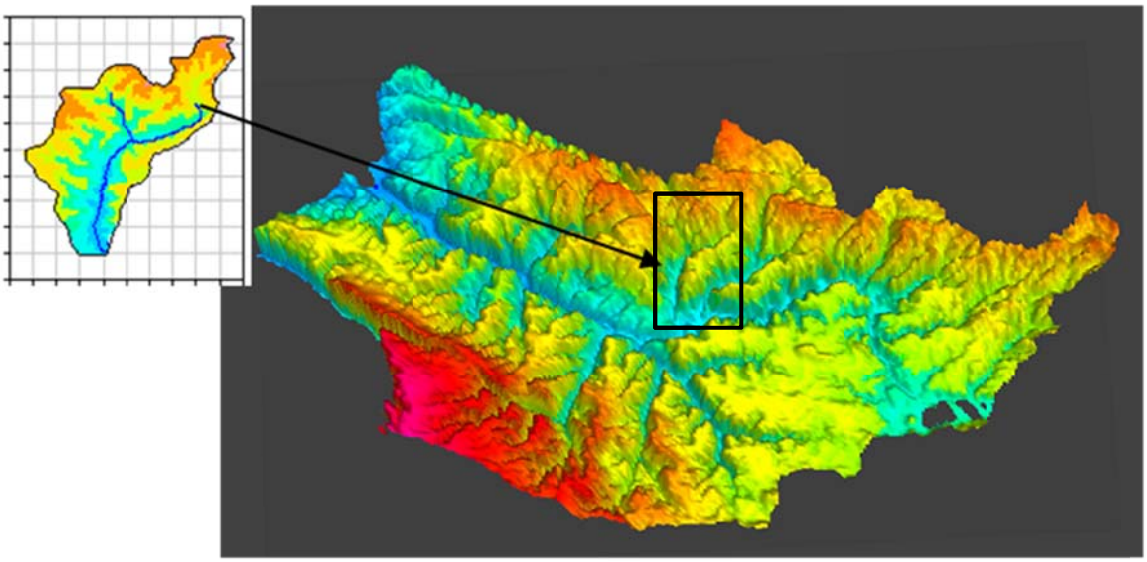


Figure 1 : Bassin versant de la Somme et situation du bassin versant de l'Hallue

Les Figure 2 et Figure 3 présentent la configuration du site expérimental de Warloy-Baillon, ainsi que les principaux équipements de mesure mis en place.

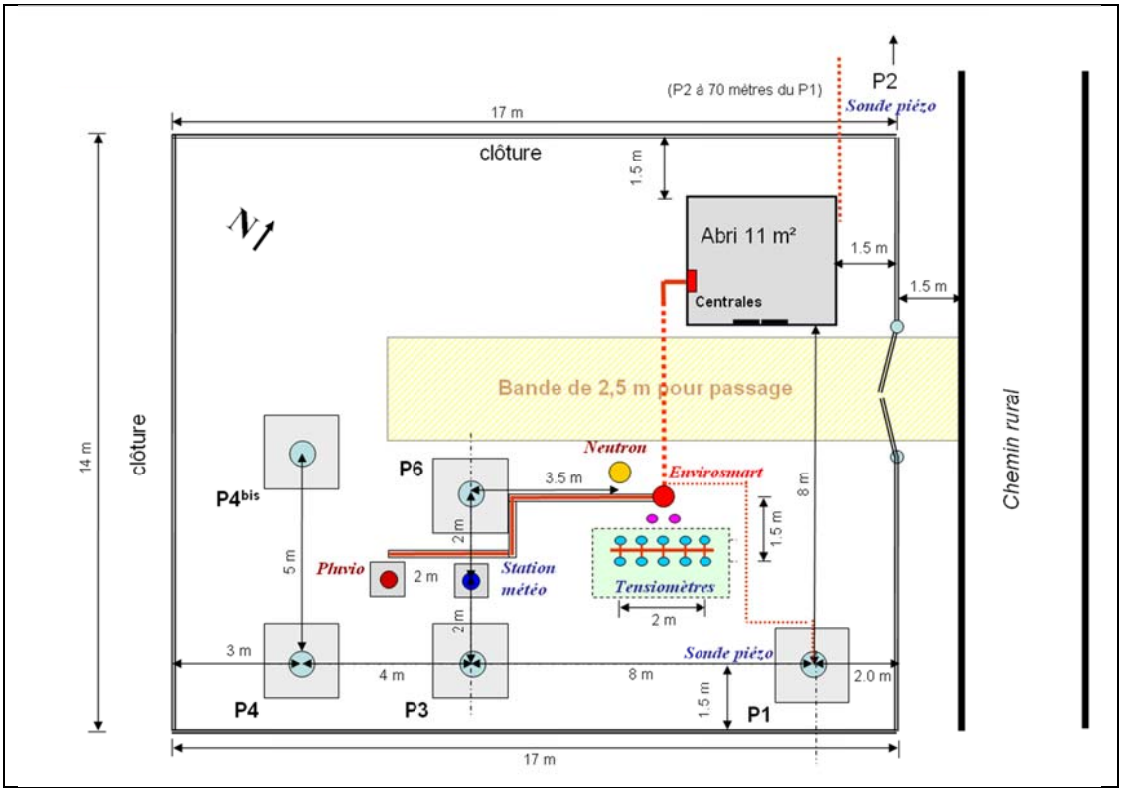


Figure 2 : Schéma du site expérimental de Warloy-Baillon (vue en plan)

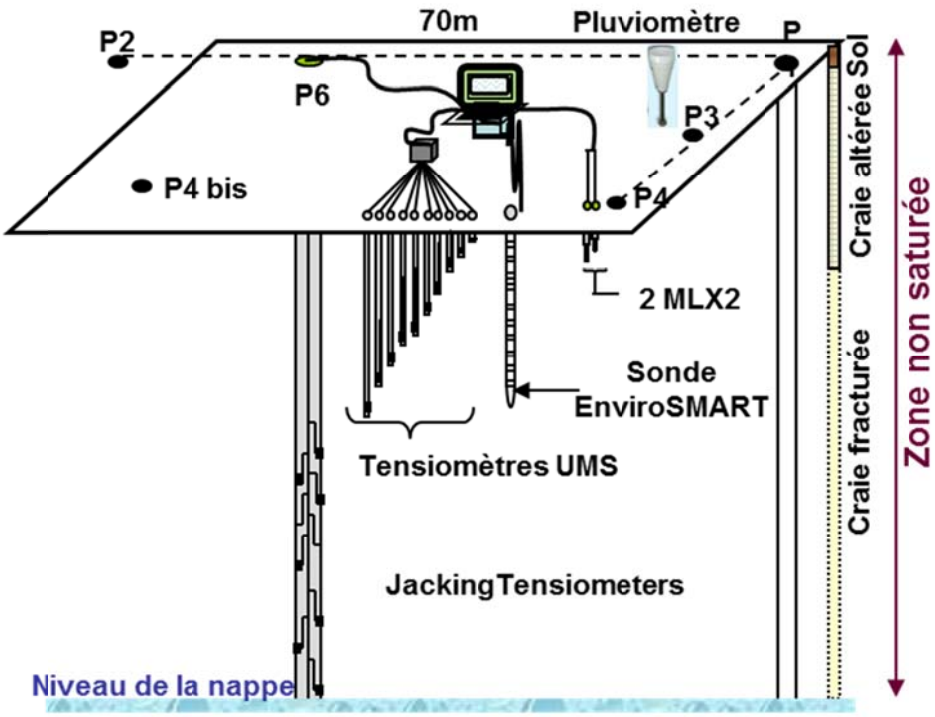


Figure 3 : Schéma du site expérimental de Warloy-Baillon (vue en coupe)

Pour la mesure de la succion (pression négative dans la zone non saturée), des tensiomètres superficiels sont installés dans la zone non saturée superficielle et des tensiomètres spéciaux « Jacking-Tensiometers » (Wellings, 1984 – Cooper), développés et adaptés par nos partenaire anglais dans le cadre du projet Flood-1 pour mesurer la pression négative de la craie en profondeur, équipent le forage P6. Les tensiomètres superficiels fournissent aussi la température aux différentes profondeurs auxquelles ils sont installés.

Une sonde EnviroSmart équipée de capteurs permettant la mesure de la teneur en eau à différentes profondeurs est installée sur le site. En outre, deux sondes « ThétaProbe » installées dans le sol et dans la craie contrôlent les mesures fournies par la Sonde EnviroSmart.

Par ailleurs, deux piézomètres P1 et P2 distants de 70 m et situés sur une même trajectoire d'écoulement de la nappe sont équipés pour suivre la charge hydraulique dans la nappe (zone saturée de la craie) et connaître le gradient hydraulique de la nappe dans ce secteur.

Le site est également équipé d'un pluviomètre et de capteurs de température de l'air et d'humidité relative pour suivre les conditions de surface.

Deux centrales d'acquisition sont installées dans un abri pour collecter en continu les données des différentes variables suivies.

Une description détaillée du site et des instruments de mesure figure dans le rapport relatif à l'instrumentation du site expérimental (Amraoui et al., 2008).

2.1.1. Tensiomètres

22 tensiomètres équipent le site de Warloy-Baillon.

Ces tensiomètres sont de deux types :

- les « Jacking tensiometers », tensiomètres « profonds » situés entre 10 et 26.5 m de profondeur. Compte tenu de leur profondeur importante, certains de ces tensiomètres se situent en 2010 sous le niveau de la nappe ; ils agissent alors comme des capteurs de pression mesurant le niveau de la nappe ;

- les « UMS », tensiomètres plus proches de la surface, implantés à des profondeurs allant de 0,2 à 8 m.

2.2. OPÉRATIONS DE SUIVI

Le rapport de l'année 2010 (BRGM/RP-59300-FR) détaille les opérations conduites de façon régulière sur le site expérimental. Seuls les éléments spécifiques à l'année 2011 sont présentés ci-après.

2.2.1. Gestion des centrales d'acquisition, remplissage des tensiomètres et suivi piézométrique

En 2011, 23 visites ont été effectuées sur le site de Warloy-Baillon. Les dates de passage, ainsi que les principales actions conduites (relatives notamment aux centrales d'acquisition et au remplissage des tensiomètres) sont récapitulées dans le Tableau 1.

Nombre	temps entre 2 visites	Date de visite	Récupération données	Remplissage / Difficultés rencontrées
1		04/01/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Il y a encore 1 m -1,50 m de neige gelée contre le grillage du site et une partie de l'envirosmart est sous la neige. Pas de remplissage
2	20	24/01/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Nettoyage du pluviomètre. Pas de remplissage
3	25	18/02/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Pas de remplissage
4	18	08/03/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Pas de remplissage
5	23	31/03/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Pas de remplissage
6	20	20/04/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Changement de la batterie du datalogger (le 22/04/2011). Pas de remplissage
7	8	28/04/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Pas de remplissage
8	6	04/05/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
9	15	19/05/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
10	27	15/06/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Nettoyage du pluviomètre. Remplissage des tensiomètres
11	7	22/06/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Pas de remplissage
12	9	01/07/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
13	7	08/07/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
14	18	26/07/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
15	9	04/08/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
16	26	30/08/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
17	17	16/09/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres. Désherbage de la zone dans laquelle sont situés les tensiomètres
18	18	04/10/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
19	17	21/10/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
20	27	17/11/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres. Constalt du vol de la porte grillagée du site.
21	4	21/11/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Changement de la batterie du datalogger. Pas de remplissage. Mise en place d'une clôture provisoire
22	11	02/12/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Remplissage des tensiomètres
23	13	15/12/2011	Récupéré les données du datalogger et de la centrale DISTEC - RAS	Pas de remplissage

Tableau 1 : Dates de passage sur le site expérimental de Warloy-Baillon

En 2011, le site de Warloy-Baillon a été visité avec une périodicité moyenne de 15 jours. Les visites sont plus espacées durant l'hiver et plus fréquentes pendant la fin du printemps, l'été et le début de l'automne, lorsque la succion dans la zone non saturée est forte et nécessite un remplissage fréquent des tensiomètres.

2.2.2. Disparition de la porte grillagée

Le 17 novembre 2011, à l'occasion d'une visite de routine sur le site, il a été constaté que la porte grillagée fermant l'entrée au site avait disparu. Un dépôt de plainte a été effectué le jour même auprès de la gendarmerie de Corbie et une clôture provisoire a été installée dès le lendemain de la découverte du vol (cf. Figure 4).

Figure 4 : Mise en place d'une clôture provisoire suite à la disparition de la porte grillagée fermant l'accès au site

Le remplacement de la clôture provisoire par une clôture pérenne est assujetti à l'acceptation du dossier par l'assurance du BRGM. Les démarches nécessaires ont été effectuées auprès de l'assureur et le traitement du dossier est en cours.

2.3. DONNÉES ACQUISES EN 2011

2.3.1. Données météorologiques

Le suivi horaire de la pluviométrie et de la barométrie s'est effectué sans difficultés particulières en 2011. Les données sont présentées sous forme graphique à la Figure 5.

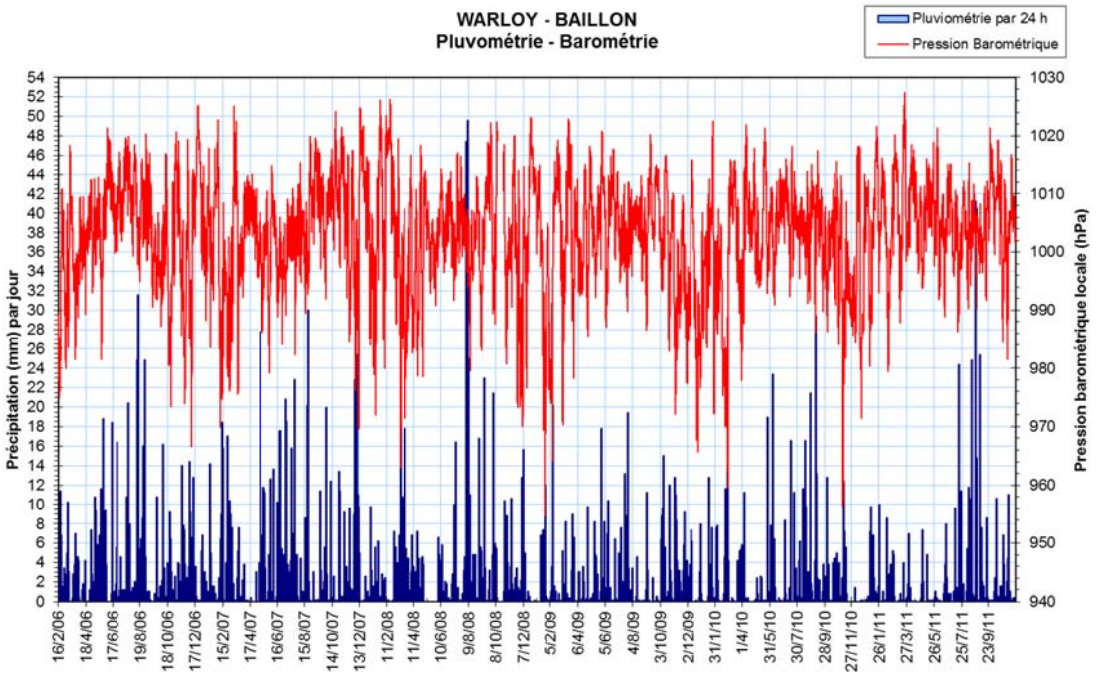


Figure 5 : Pluviométrie et barométrie enregistrées à Warloy-Baillon de 2006 à 2011

Les chroniques de température de l'air et du degré hygrométrique sont présentées en Figure 6. On note quelques jours de gel en début d'année, entre janvier et mars.

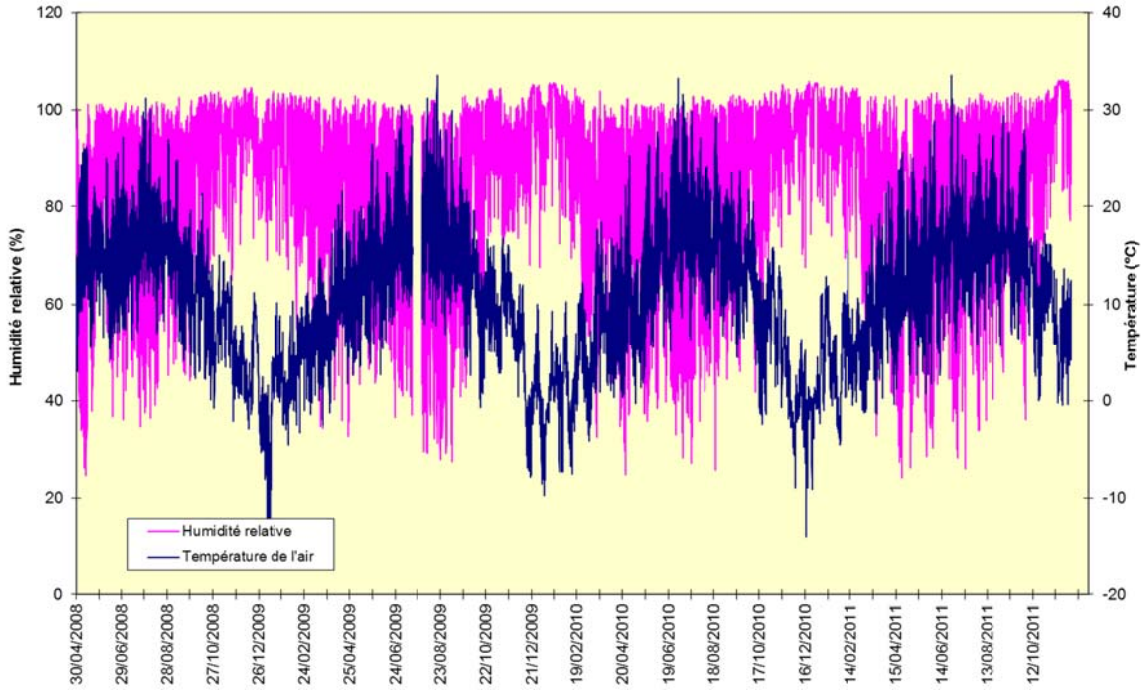


Figure 6 : Variations de la température et du degré hygrométrique de l'air entre 2008 et 2011

2.3.2. Données piézométriques

Les variations du niveau de la nappe de la craie sont suivies au pas de temps horaire sur les piézomètres P1 et P2. Les pressions mesurées par les capteurs sont ensuite corrigées des variations de la pression atmosphérique.

La Figure 7 présente l'évolution du niveau de la nappe dans ces deux forages. Les graphiques montrent les mesures acquises au pas de temps horaire, ainsi que les mesures manuelles effectuées en moyenne tous les 15 jours, lors de chaque passage sur le site. Ces mesures manuelles permettent de vérifier qu'il n'y a pas de dérive dans l'acquisition automatique du niveau de la nappe. Les mesures effectuées coïncident bien avec les mesures enregistrées automatiquement.

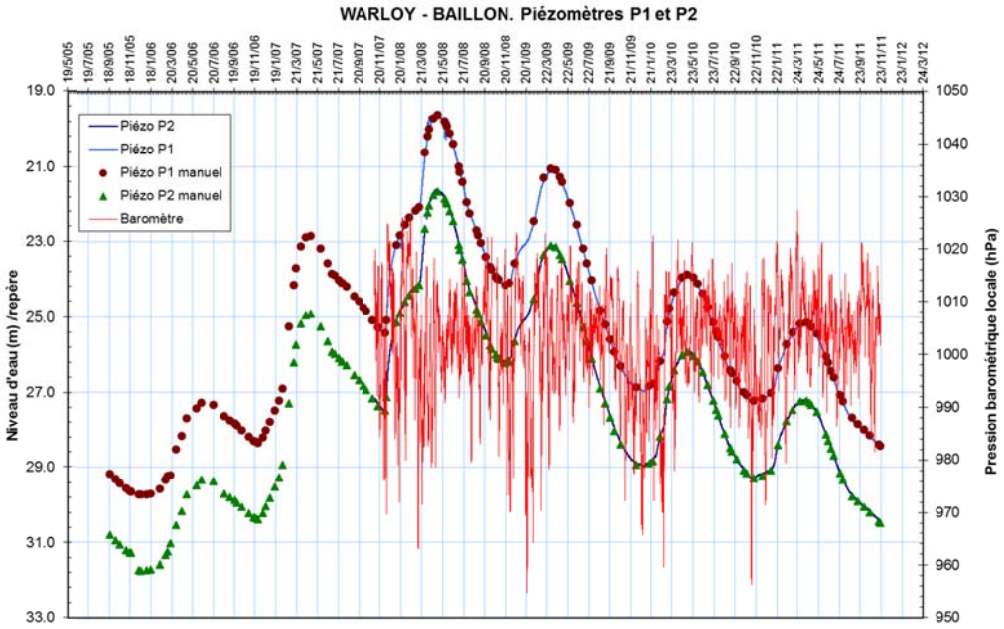


Figure 7 : Variations du niveau de la nappe aux piézomètres P1 et P2 entre 2005 et 2011

2.3.3. Données de teneur en eau de la zone non saturée du sous-sol

La teneur en eau dans la zone non saturée est mesurée à diverses profondeurs sous la surface du sol : les mesures sont réalisées à des profondeurs allant de 20 cm à 8 m, en cohérence avec les profondeurs de mesure de succion.

La Figure 8 présente les chroniques de teneur en eau relevées entre 2009 et 2011 avec les sondes les plus superficielles.

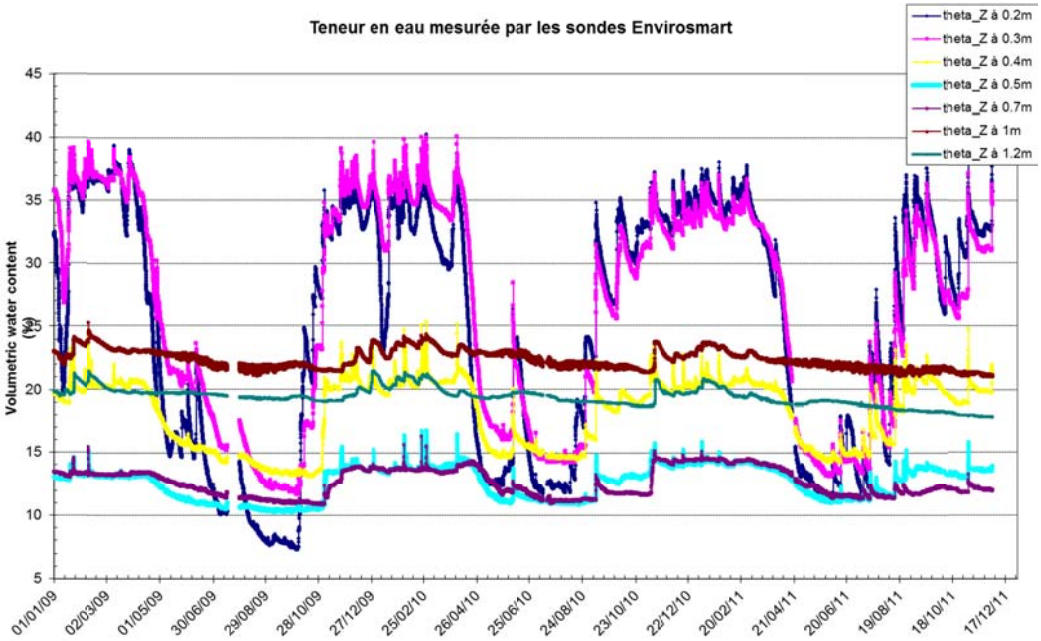


Figure 8 : Variations de la teneur en eau dans la zone non saturée entre 2009 et 2011 (profondeurs inférieures à 1,2 m).

2.3.4. Données de succion (pression négative) dans la zone non saturée

Tensiomètres superficiels

La Figure 9 présente les mesures de succion acquises au pas de temps horaire sur les tensiomètres les plus superficiels du site de Warloy-Baillon.

Les courbes mettent en évidence la très forte désaturation observée dans la zone non saturée durant la période estivale et au début de l'automne. Les valeurs de succion indiquées sur les graphiques sont en effet inférieures à -800 hPa. Comme ces tensiomètres ont une plage de mesure comprise entre 0 et -800 hPa, cela signifie que ces valeurs sont au-delà du seuil de validité des mesures. On observe d'ailleurs durant ces périodes des baisses de succion (c'est-à-dire des hausses de pression) qui ne correspondent pas à un phénomène physique mais montrent une dérive des mesures hors des conditions normales de fonctionnement.

Par ailleurs, les « pics » observés durant les mêmes périodes correspondent aux épisodes de remplissage des tensiomètres, durant lesquels la pression mesurée devient ponctuellement voisine de 0 hPa du fait que la désaturation existant en profondeur est contrebalancée par l'eau injectée dans le tube du tensiomètre.

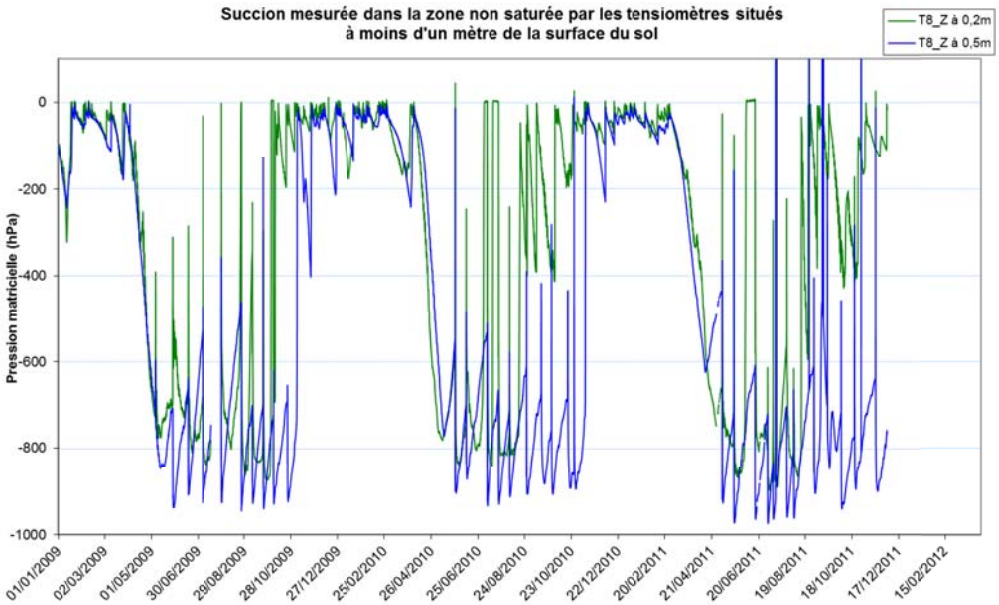


Figure 9 : Variations de la succion dans la zone non saturée entre 2009 et 2011 (profondeurs inférieures à 1 m)

Des difficultés d'acquisition de la succion ont été rencontrées sur les tensiomètres situés à des profondeurs comprises entre 1.5 et 5 m. Le remplacement de ces appareils est envisagé courant 2012.

Le tensiomètre situé à une profondeur de 8 m ne présente plus un signal exploitable depuis la fin de l'hiver 2010-2011. Compte tenu de la difficulté de mise en place d'un tensiomètre à cette profondeur et de la possibilité de reconstituer l'évolution de la succion à cette profondeur à partir de la succion à une profondeur légèrement inférieure, il n'est pas envisagé de le remplacer.

Tensiomètres profonds

Les mesures effectuées sur les tensiomètres profonds situés entre 22,5 et 26,5 m de profondeur sont présentées en Figure 10.

On rappelle que ces tensiomètres profonds – ou « Jacking tensiometers » – ont été installés dans le cadre du projet de recherche Flood-1, en tant que prototype expérimental destiné à mesurer la succion à des profondeurs supérieures aux capacités des équipements standards.

Si les mesures effectuées durant les premières années de fonctionnement du site ont produit des résultats intéressants, des difficultés sont ensuite apparues sur ce matériel, notamment sur un clapet situé à la base du tube, inaccessible parce que situé à plus de 10 m de profondeur. Les mesures effectuées en 2011, mais aussi dès 2010 sur bon nombre des tensiomètres profonds situés au-dessus du niveau de la nappe,

fournissent des résultats non cohérents avec ceux qui sont fournis sur les tensiomètres superficiels. Ces mesures restent donc non validées.

En 2010, plusieurs essais infructueux ont été effectués pour pallier cette défaillance instrumentale. De nouvelles interventions ont été tentées en 2011 mais elles sont restées infructueuses pour les Jacking tensiomèters situés entre 10 et 21 m de profondeur. Il n'est pas prévu de poursuivre ces essais en 2012, ni de remplacer ce matériel.

On notera que certains tensiomètres, qui étaient passés sous le niveau de la nappe suite à une remontée du niveau piézométrique, sont à nouveau situés en zone non saturée (cf. Figure 10).

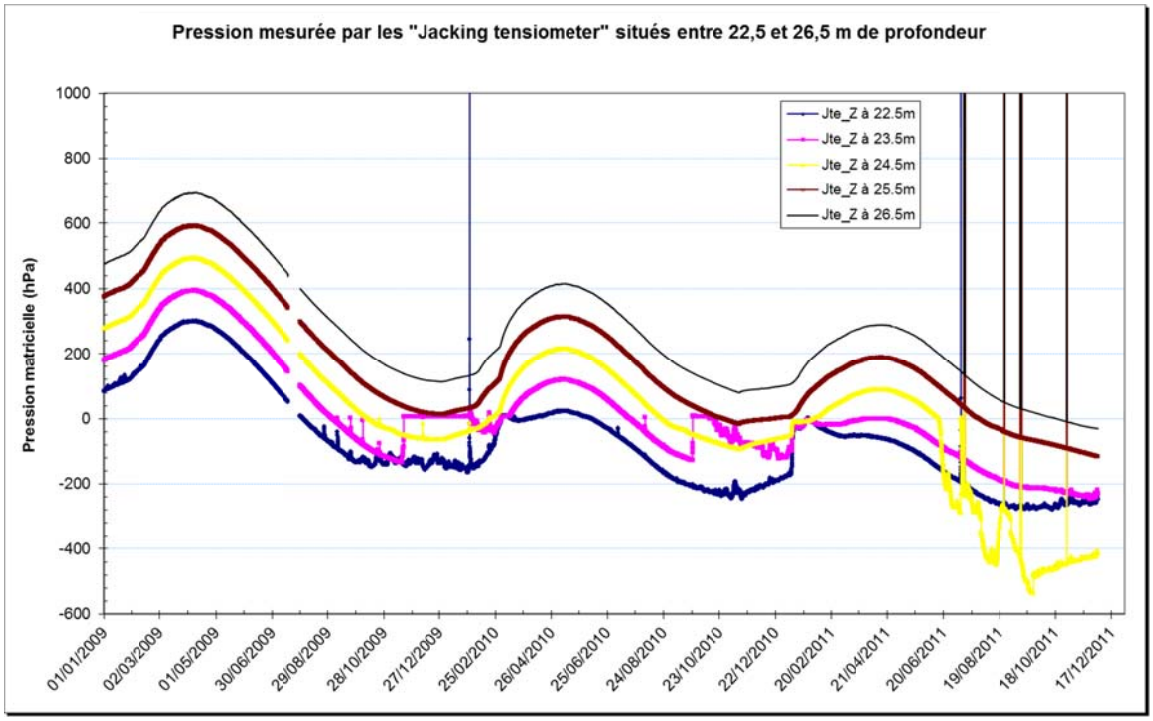


Figure 10 : Variations de la succion dans la zone non saturée entre 2009 et 2011 (profondeurs comprises entre 22,5 et 26,5 m)

En résumé, si les tensiomètres profonds - dits « Jacking tensiometers » - ont joué un rôle important au démarrage du site afin de mieux comprendre l'évolution de la succion sur l'ensemble de la zone non saturée, certains d'entre eux ne fournissent plus désormais une information fiable et ne feront à l'avenir plus l'objet d'un suivi spécifique. Le suivi de la succion dans la zone non saturée ne repose donc plus que sur les tensiomètres de surface (UMS).

3. Étude des remontées rapides du niveau de la nappe dans le bassin de la Somme

L'objectif de cette phase d'étude consiste à identifier, au travers des données piézométriques disponibles dans le bassin versant de la Somme, la variabilité temporelle et spatiale des phénomènes de remontée rapide du niveau de la nappe de la craie. L'analyse porte, en particulier, sur les épisodes de hautes eaux saisonnières des années 1995, 2001 et 2002.

Par ailleurs, il s'agit de rechercher des corrélations entre ces épisodes de remontée rapide et les variations de stock d'eau simulées dans la zone non saturée de la craie.

3.1. CHOIX DE PIÉZOMÈTRES REPRÉSENTATIFS DU BASSIN VERSANT DE LA SOMME

Afin d'observer la diversité des réponses hydrodynamiques de la nappe de la craie dans les sous-bassins de la Somme, 8 piézomètres ont été sélectionnés (cf. Tableau 2 et Figure 11).

indice BSS	Commune	Bassin versant	Données	Données journalières	Battement (m)
00497X0018	**Etaves-et-Bocquiaux**	**Haute Somme**	1970-2010	**2004-2010**	16.02
00478X0002	**Flaucourt**	**Ancre**	1979-2010	**2007-2010**	8.48
00471X0010	**Senlis-le-Sec**	**Hallue**	1966-2010	**2004-2010**	16.45
00332X0007	**Gapennes**	**Nièvre**	1970-2010	**1976-81 & 2004-10**	12.32
00636X0020	**Hangest-en-Santerre**	**Avre**	1979-2010	**2005-2010**	17.6
00794X0021	**Crevecoeur-le-grand**	**Selle**	1989-2010	**1994-2010**	9.78
00444X0008	**Huppy**	**Vimeu**	1974-2010	**2004-2010**	14.25
00463X0036	**Cardonette**	**"Amiens nord"**	1966-2010	**2007-2010**	12.31

Tableau 2 : Piézomètres du bassin versant de la Somme retenus pour l'analyse

Le choix des piézomètres a été effectué en fonction de leur représentativité, de la longueur et de la fréquence d'acquisition de leur chronique, ainsi que des résultats de travaux antérieurs (notamment Pinault et al., 2005).

Le suivi quotidien a démarré en 2007 ou en 2004 sur la plupart des ouvrages (cf. colonne « données journalières » du Tableau 2), c'est-à-dire après les deux grands épisodes d'inondation de1995 et 2001, et les années excédentaires en pluviométrie antérieures à 2001. Deux piézomètres sont particulièrement intéressants car ils échappent à cette règle et disposent d'une fréquence d'acquisition sur des périodes plus longues :

- Crèvecœur-le-Grand : fréquence quotidienne entre 1994 et 2010 ;
- Gapennes : fréquence quotidienne entre 1976 et 1981, puis 2004 et 2010.

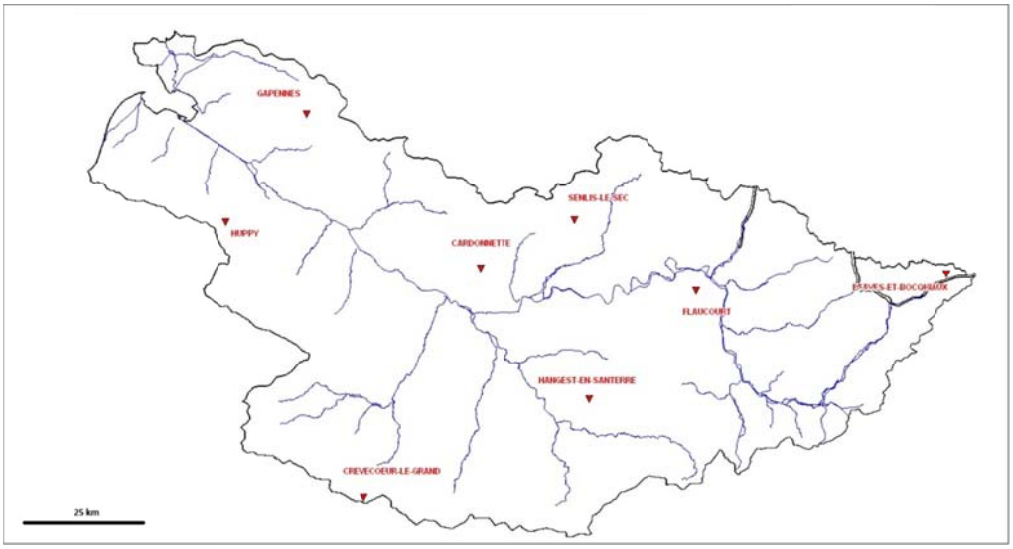


Figure 11 : Localisation des piézomètres retenus pour l'analyse

La vitesse de remontée du niveau piézométrique est calculée comme la différence de cotes entre deux mesures piézométriques consécutives ascendantes, divisée par la durée s'étant écoulée entre celles-ci.

La question de la fréquence d'acquisition de la donnée est essentielle parce qu'un pas de mesure trop lâche rate les pics piézométriques et les remontées brèves, et sous-estime la vitesse de remontée en supposant qu'elle a été uniforme entre deux mesures consécutives. La Figure 12 présente l'historique de vitesse de remontée piézométrique calculée dans la nappe de la craie à Etaves-et-Bocquiaux , ceci pour différentes fréquences d'acquisition. Il apparaît clairement que les plus fortes vitesses de remontée se concentrent pendant les phases d'acquisition au pas journalier. À l'inverse, les hauts niveaux enregistrés en 1995 ne se traduisent pas sur ce graphique par des remontées rapides alors qu'il est vraisemblable que des phénomènes de ce type se soient manifestés.

Ainsi, pour des questions d'homogénéité des fréquences d'acquisition, les comparaisons entre piézomètres ne peuvent se faire qu'au pas journalier, donc sur la période 2007-2010. Cette période étant courte et n'incluant pas les inondations de 1995 et 2001, l'analyse a été étendue à une période plus large. Il convient cependant de garder à l'esprit les biais induits par la variabilité des fréquences d'acquisition des niveaux.

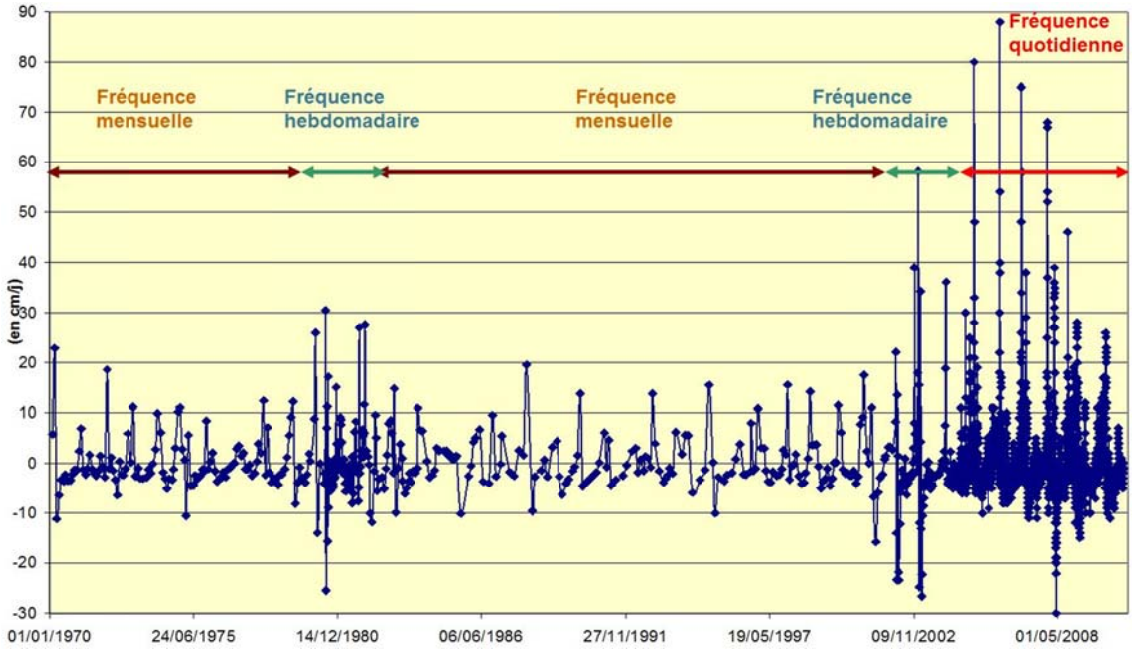


Figure 12 : Vitesses de remontée piézométrique calculées à Etaves-et-Bocquiaux (00497X0018) pour différentes fréquences d'acquisition

3.2. IDENTIFICATION DES REMONTÉES RAPIDES DE NIVEAU

3.2.1. Ensemble des données disponibles

Dans un premier temps, l'analyse porte sur l'ensemble des données disponibles.

Le Tableau 3 présente les paramètres statistiques descriptifs des vitesses de remontée piézométrique calculées aux différents piézomètres. Ces paramètres montrent la diversité de l'amplitude des phénomènes : le maximum calculé par piézomètre varie par exemple de 88 cm/j à Etaves-et-Bocquiaux (00497X0018) à 11 cm/j à Huppy (00444X0008). Les amplitudes les plus fortes sont généralement enregistrées au nord de la Somme mais aussi à Crèvecœur-le-Grand dans le bassin versant de la Selle. À l'inverse, des amplitudes faibles sont aussi observées au nord de la Somme (Flaucourt, Cardonette).

Cette diversité des comportements amène à ns'interroger sur le seuil à considérer pour l'identification des phénomènes de remontée rapide. Pour cela, le calcul de la moyenne augmentée de deux écart-types des vitesses de remontée piézométrique journalière est une indication intéressante dans la mesure où, pour une distribution d'un échantillon de valeurs suivant une loi normale, seules 2,3% des valeurs excèdent ce seuil. Néanmoins, cette valeur variant de 3,7 cm/j à 27,5 cm/j d'un piézomètre à l'autre, et afin de disposer d'une référence identique pour tous les piézomètres, il est nécessaire de trouver un compromis acceptable entre les comportements les plus

rapides (00497X0018 – Etaves-et-Bocquiaux) et les plus lents (00444X0008 – Huppy ou 00636X0020 – Hangest-en-Santerre).

	Nb valeurs	Maximum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Moyenne	Ecart-type	moyenne +2 ecart type
00332X0007	1620	54.0	1.0	2.0	4.0	3.4	3.8	10.9
00444X0008	768	11.0	1.0	1.0	2.0	1.6	1.1	3.7
00463X0036	699	15.6	0.7	1.0	1.7	1.3	1.3	3.9
00471X0010	1213	35.6	1.0	2.0	4.0	3.3	3.4	10.1
00478X0002	599	15.0	1.0	1.0	1.7	1.4	1.3	4.0
00497X0018	860	88.0	2.0	4.5	9.0	7.7	9.9	27.5
00636X0020	1081	11.7	1.0	1.1	2.0	1.8	1.3	4.4
00794X0021	1458	46.0	1.0	1.0	2.0	1.9	1.8	5.5

Tableau 3 : Statistiques descriptives de l'ensemble des valeurs de remontée piézométriquedans les piézomètres étudiés (en cm/j)

Il a été considéré dans le cadre de cette analyse que le seuil retenu serait fixé à une valeur de 5 cm/j.

Le nombre de jours de remontée rapide (supérieure ou égale à 5 cm/j) est fourni dans le Tableau 4 pour les 8 piézomètres étudiés. Le rythme maximal de remontée du niveau piézométrique et la date correspondante figurent aussi dans ce tableau.

indice BSS	Hausse maxi (cm/j)	Hausse max (date)	Nb jr de hausse = 5 cm/j*
00497X0018	88	22/02/2006	2162
00478X0002	15	02/02/1981	126
00471X0010	36	30/12/1999	1456
00332X0007	54	07/06/1998	746
00636X0020	12	06/12/1982	220
00794X0021	46	25/01/2003	56
00444X0008	11	04/04/2006	115
00463X0036	16	26/04/2001	257

* Lorsque deux mesures consécutives sont séparées de plus d'un jour, c'est une valeur moyenne qui est obtenue. On considère alors le nombre de jours sur lesquels est calculée cette valeur moyenne.

Tableau 4 : Nombre de jours de remontée piézométrique supérieure ou égale à 5 cm/j

De façon cohérente aux statistiques descriptives présentées précédemment, on observe des comportements variés, avec un nombre de jours très élevé de remontée piézométrique selon un rythme supérieur ou égal à 5 cm/j (Etaves-et-Bocquiaux – 00497X0018 – ou Senlis-le-Sec – 00471X0010), ou à l'inverse faible (Crèvecœur-le-Grand – 00794X0021 – ou Huppy – 00444X0008). Cependant, l'occurrence de remontées piézométriques n'est pas spécifique à un secteur donné du bassin versant de la Somme.

On note qu'il n'existe pas de corrélation apparente (cf. Figure 13 et Figure 14) entre :

- l'amplitude maximale de battement de la nappe et le nombre de jours de remontée ≥ à 5 cm/j ;
- L'amplitude maximale de battement de la nappe et la remontée maximale en un jour.

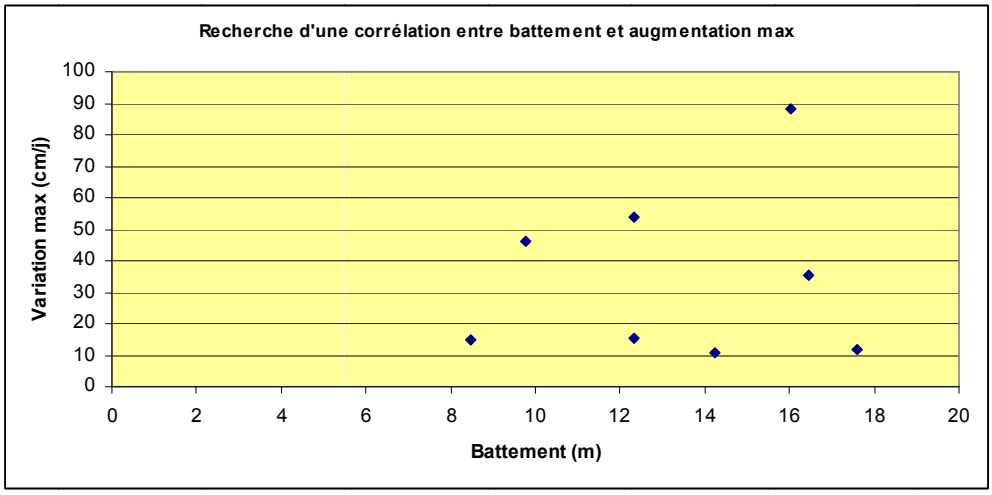


Figure 13 : Absence de corrélation entre battement maximal de la nappe et vitesse maximale de remontée du niveau piézométrique (toutes mesures disponibles)

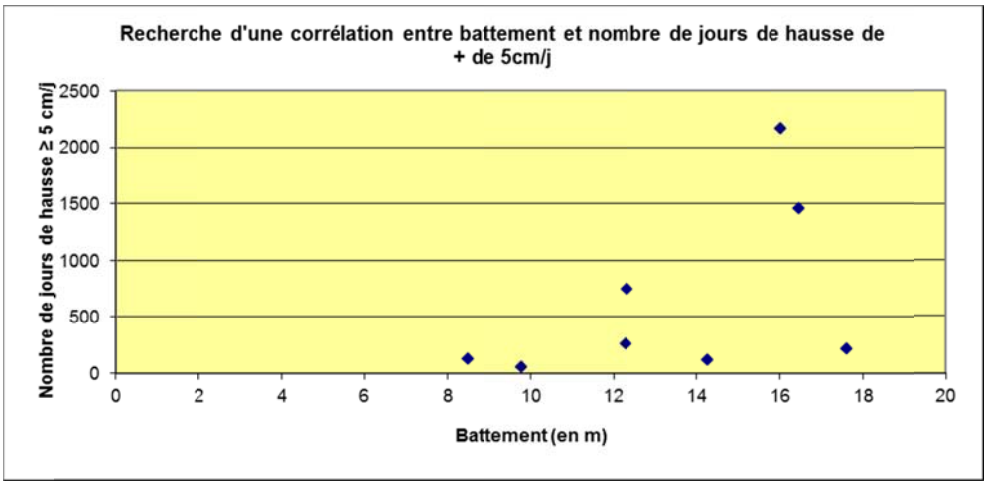


Figure 14 : Absence de corrélation entre battement maximal de la nappe et nombre de jours de remontée piézométrique rapide (toutes mesures disponibles)

La répartition annuelle des remontées rapides est présentée par piézomètre dans le Tableau 5. Dans ce tableau, la deuxième colonne correspond au nombre de jours d'occurrence de remontée piézométrique rapide pour l'ensemble des mesures de niveau disponibles par chronique antérieurement à 1994. Il est entendu que les valeurs figurant dans cette colonne sont difficilement comparables entre elles puisqu'elles dépendent fortement de la longueur de la chronique et de la fréquence d'acquisition de la donnée, deux paramètres fortement variables d'une chronique à l'autre antérieurement à 1994.

indice BSS	avant 1994	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
00497X0018	1254	88	54	38	0	58	30	117	36	91	21	41	44	60	60	81	38	51
00478X0002	49							40	27						1	3		6
00471X0010	812	119	91			26	89	57	51	55	30		8	0	64	25	7	22
00332X0007	276		57			41	4	45	41	53	7	39	22	43	39	30	29	20
00636X0020	6	55				7			101	6	25	7			2	9		2
00794X0021			6		1	5	2	6	7	2	9			1	5	8	1	3
00444X0008	8		82							21				3	1			
00463X0036	35		56					48	31	47	36				1	3		
TOTAL PAR AN	**2440**	**262**	**346**	**38**	**1**	**137**	**125**	**313**	**294**	**275**	**128**	**87**	**74**	**107**	**173**	**159**	**75**	**104**

Tableau 5 : Répartition annuelle du nombre de jours de remontée piézométrique rapide (toutes mesures disponibles)

Il ressort de ce tableau que le phénomène de remontées rapides ne se limite pas aux années les plus pluvieuses, telles 1995 ou 2000-2001. Les chroniques longues à fréquence journalière - Gapennes et Crèvecœur-le-Grand - confirment bien cette analyse. À Gapennes (00332X0007), par exemple, une remontée supérieure ou égale à 5 cm/j est observée au moins 10 jours par an pour les années pendant lesquelles une fréquence quotidienne est disponible, notamment entre 1976 et 1981. L'existence de remontées rapides des niveaux n'est donc pas un phénomène nouveau. À Crèvecœur-le-Grand (00794X0021), à l'inverse, aucune remontée rapide n'est identifiée pour 4 des 17 années de suivi quotidien.

En conservant à l'esprit les remarques faites sur la fréquence d'acquisition des données, on peut sommer sur l'ensemble de ces 8 piézomètres le nombre de jours de remontée rapide observé annuellement entre 1994 et 2010.

Les résultats obtenus s'établissent de la manière suivante :

- plus de 200j/an : 1994, 1995, 2000, 2001 et 2002 ;
- plus de 100j/an : 1994, 1995, 1998 à 2003, 2006 à 2008, 2010.

Un nombre important de jours de remontée piézométrique rapide est donc bien associé aux inondations importantes des quinze dernières années. La forte occurrence des années les plus récentes dans ce décompte est due au resserrement de la fréquence d'acquisition , ce qui confirme la nécessité d'un suivi à un pas resserré et homogène.

On notera que les piézomètres contributeurs au nombre de jours de remontée rapide lors des années humides varient (cf. Figure 15), mais ceci reste difficilement interprétable compte tenu de l'hétérogénéité de la fréquence de disponibilité de la donnée d'un piézomètre à l'autre.

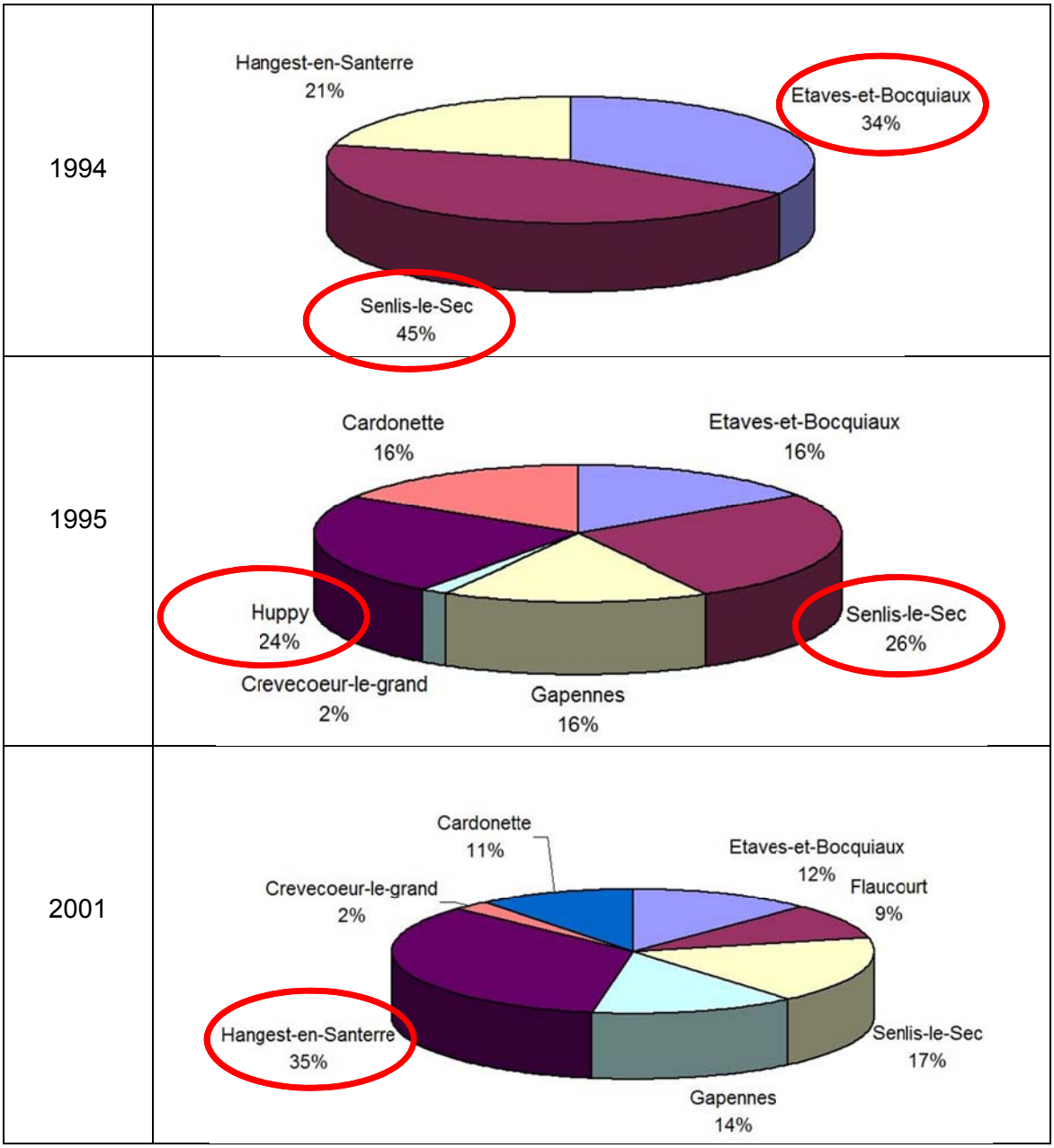


Figure 15 : Piézomètres contributeurs au nombre de jours de remontée piézométrique rapide en 1994, 1995 et 2001

3.2.2. Analyse au pas de temps mensuel

En complément à cette première approche, une seconde analyse est effectuée au pas de temps mensuel sur la période 1998-2010 (à partir de 1998, l'acquisition des données se densifie pour la majorité des piézomètres). Pour ce faire, une moyenne mensuelle du niveau piézométrique a été calculée pour chacun des ouvrages.

L'analyse en composantes principales (Tableau 6) montre que les corrélations entre les remontées mensuelles du niveau de la nappe sur les différents piézomètres sont assez faibles, les meilleurs résultats (0.778 à 0.805) étant obtenus pour les ouvrages de Crèvecœur-le-Grand, Hangest-en-Santerre et Huppy. Ces ouvrages, tous situés en rive sud de la Somme, présentent une inertie assez importante qui peut expliquer qu'une certaine corrélation apparaisse entre eux au pas de temps mensuel. Les valeurs obtenues demeurent néanmoins assez faibles.

Variables	00332X0007	00444X0008	00463X0036	00471X0010	00478X0002	00497X0018	00636X0020	00794X0021
00332X0007	**1**	0.350	0.674	0.650	0.643	0.491	0.340	0.257
00444X0008	0.350	**1**	0.234	0.603	0.419	-0.052	0.778	0.805
00463X0036	0.674	0.234	**1**	0.679	0.693	0.454	0.261	0.256
00471X0010	0.650	0.603	0.679	**1**	0.730	0.388	0.520	0.547
00478X0002	0.643	0.419	0.693	0.730	**1**	0.501	0.541	0.354
00497X0018	0.491	-0.052	0.454	0.388	0.501	**1**	-0.054	-0.121
00636X0020	0.340	0.778	0.261	0.520	0.541	-0.054	**1**	0.781
00794X0021	0.257	0.805	0.256	0.547	0.354	-0.121	0.781	**1**

Tableau 6 : Analyse en composantes principales des valeurs mensuelles de remontées du niveau de la nappe entre 1998 et 2010

Malgré le lissage inhérent à l'utilisation de données mensuelles, les paramètres statistiques associés à la distribution des valeurs de remontée piézométrique mensuelle dans la craie affinent les résultats du Tableau 3 et précisent la disparité des comportements dans les différents sous-bassins de la Somme (cf. Tableau 7).

De même que précédemment, il n'y a pas de corrélation nette entre le battement de la nappe et les vitesses de remontée du niveau piézométrique.

indice BSS	Commune	Battement (m)	Nb valeurs	Max	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Moyenne	Ecart-type
00332X0007	Gapennes	12.32	62	2.06	0.28	0.43	0.66	0.55	0.43
00444X0008	Huppy	14.25	67	1.42	0.16	0.35	0.62	0.43	0.35
00463X0036	Cardonette	12.31	63	4.83	0.08	0.24	0.44	0.48	0.77
00471X0010	Senlis-le-Sec	16.45	64	4.84	0.29	0.67	1.36	0.96	1.02
00478X0002	Flaucourt	8.48	82	2.14	0.09	0.19	0.38	0.32	0.37
00497X0018	Etaves-et-Bocquiaux	16.02	58	5.01	0.43	1.31	2.23	1.47	1.19
00636X0020	Hangest-en-Santerre	17.60	76	2.52	0.21	0.38	0.58	0.49	0.44
00794X0021	Crevecoeur-le-grand	9.78	63	0.79	0.13	0.24	0.40	0.29	0.21

Tableau 7 : Paramètres statistiques de la distribution des remontées piézométriques mensuelles entre 1998 et 2010 (en m/mois)

Compte tenu du lissage des variations de niveau inhérent à cette fréquence mensuelle, le seuil retenu pour la sélection des phases de remontées rapides est abaissé à 1 m/mois, soit environ 3.3 cm/j. Le Tableau 8 indique le nombre de jours de remontée rapide mensuelle par piézomètre entre 1998 et 2010. Dans cette approche, on fait ressortir nettement les réactions rapides intervenant sur les ouvrages de Senlis-le-Sec et surtout d'Etaves-et-Bocquiaux. L'absence de remontée rapide à Crèvecœur-le-Grand est liée à la méthode utilisée, puisque l'on a vu antérieurement que des remontées de 46 cm/j pouvaient intervenir (entre le 24 et le 25 janvier 2003).

Cette approche a néanmoins l'avantage de fournir une vision globale et homogène de la répartition annuelle des remontées piézométriques importantes entre 1998 et 2010.

Cette répartition confirme les orientations identifiées précédemment mais en accordant une part moins importante aux années récentes. La période de hautes eaux 2001 ressort très nettement.

indice BSS	Commune	Battement (m)	Nb de jr de hausse ≥ 1 m/mois
00332X0007	Gapennes	12.32	6
00444X0008	Huppy	14.25	6
00463X0036	Cardonette	12.31	7
00471X0010	Senlis-le-Sec	16.45	21
00478X0002	Flaucourt	8.48	6
00497X0018	Etaves-et-Bocquiaux	16.02	35
00636X0020	Hangest-en-Santerre	17.60	9
00794X0021	Crevecoeur-le-grand	9.78	0

Tableau 8 : Nombre d'occurrence de remontées mensuelles du niveau de la nappe selon un rythme supérieur ou égal à 1 m/mois (période 1998-2010)

indice BSS	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	TOTAL
00332X0007	1		2	2		1								6
00444X0008			2	2	2									6
00463X0036			2	2	2	1								7
00471X0010	1	4	2	3	3	2				3	2		1	21
00478X0002	1		1	3	1									6
00497X0018	1	3	4	3	3	1	2	3	3	4	4	1	3	35
00636X0020				6	1	2								9
00794X0021														0
TOTAL ANNUEL	4	7	13	21	12	7	2	3	3	7	6	1	4	90

Tableau 9 : Répartition annuelle du nombre de jours de remontée rapide du niveau piézométrique (période 1998-2010, variations mensuelles)

3.2.3. Analyse au pas de temps journalier

Cette analyse est conduite sur 6 des 8 piézomètres afin de disposer d'une période pour laquelle la fréquence d'acquisition de la donnée est journalière et relativement longue : 5 ans, du 01/07/2005 au 30/06/2010. Les piézomètres de Cardonette et de Flaucourt ne sont pas traités car ils ne disposent de données journalières qu'à partir, respectivement, des 22/03/2007 et 18/10/2007, ce qui conduirait à raccourcir fortement la période d'analyse si on souhaitait les intégrer.

Le choix d'un démarrage de la période au 1er juillet est effectué afin de se situer initialement – pour tous les piézomètres – dans un contexte de décroissance saisonnière des niveaux piézométriques, et donc de pouvoir disposer pour chacun d'entre eux de 5 cycles saisonniers complets.

Variables	Delta00332X	Delta00444X	Delta00471X	Delta00497X	Delta00636X	Delta00794X
Delta00332X	**1**	-0.028	0.186	0.143	0.012	0.209
Delta00444X	-0.028	**1**	0.295	-0.074	0.342	0.328
Delta00471X	0.186	0.295	**1**	0.217	0.380	0.137
Delta00497X	0.143	-0.074	0.217	**1**	0.115	0.093
Delta00636X	0.012	0.342	0.380	0.115	**1**	0.175
Delta00794X	0.209	0.328	0.137	0.093	0.175	**1**

Tableau 10 : Analyse en composantes prinicipales des valeurs quotidiennes de remontées du niveau de la nappe entre le 01/07/2005 et 30/06/2010

Le Tableau 10 présente le résultat d'une analyse en composantes principales des remontées de niveau observées sur les différents ouvrages. Il apparaît qu'il n'existe pas de corrélation dans la survenue de ce phénomène sur les différents ouvrages concernés. Sous réserve de pouvoir étendre aux sous-bassins les résultats obtenus par piézomètres, ceci plaide pour un comportement distinct des sous-bassins correspondants.

On notera que la même analyse réalisée non pas sur les remontées journalières mais sur les niveaux piézométriques journaliers fournit un tout autre résultat (cf. Tableau 11). Des corrélations apparaissent notamment entre Huppy (00444X0008), Senlis-le-Sec (00471X0010) et Hangest-en-Santerre (00636X0020).

Variables	00332X0007	00444X0008	00471X0010	00497X0018	00636X0020	00794X0021
00332X0007	**1**	0.524	0.733	0.799	0.518	0.209
00444X0008	0.524	**1**	**0.917**	0.439	**0.943**	0.745
00471X0010	0.733	0.917	**1**	0.624	**0.854**	0.535
00497X0018	0.799	0.439	0.624	**1**	0.394	0.113
00636X0020	0.518	0.943	0.854	0.394	**1**	**0.804**
00794X0021	0.209	0.745	0.535	0.113	0.804	**1**

Tableau 11 : Analyse en composantes principales des niveaux piézométriques journaliers entre le 01/07/2005 et 30/06/2010

La représentation en vecteurs propres de cette dernière analyse en composantes principales précise les corrélations obtenues (cf. Figure 16) et fait ressortir des familles de comportement. Le vecteur propre F2 notamment fournit une classification des piézomètres des plus réactifs aux plus inertiels :

- Etaves-et-Bocquiaux (00497X0018) ;
- Gapennes (00332X0007) ;
- Senlis-le-Sec (00471X0010) ;
- Huppy (00444X0008) et Hangest-en-Santerre (00636X0020) ;
- Crèvecœur-le-Grand (00794X0021).

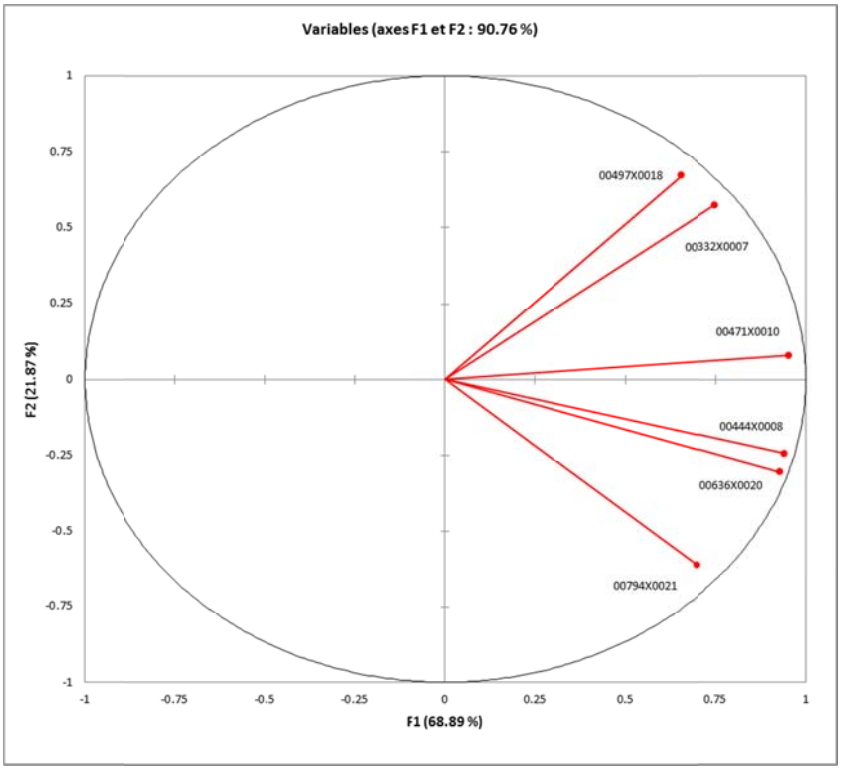


Figure 16 : Représentation en vecteurs propres des niveaux piézométriques journaliers entre le 01/07/2005 et le 30/06/2010

Les paramètres statistiques associés à la distribution des valeurs de remontées quotidiennes du niveau de la nappe de la craie sont présentés dans le Tableau 12.

	Nb valeurs	Maximum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Moyenne	Ecart-type	moyenne +2 ecart type
00332X0007	511	48.0	1.0	3.0	5.0	4.2	4.4	13.1
00444X0008	572	11.0	1.0	1.0	2.0	1.6	0.9	3.4
00471X0010	644	17.0	1.0	2.0	4.0	3.2	2.6	8.3
00497X0018	562	88.0	3.0	5.0	10.0	8.2	10.1	28.3
00636X0020	728	7.0	1.0	1.0	2.0	1.7	0.9	3.6
00794X0021	490	9.0	1.0	1.0	2.0	1.6	1.2	3.9

Tableau 12 : Statistiques descriptives des valeurs de remontées piézométriques sur la période 2005-2010 (en cm/j, basées sur des observations quotidiennes)

De même que précédemment, on n'obtient pas de corrélation entre le battement et la vitesse maximale de remontée du niveau piézométrique (Figure 17). Il semble par contre se dessiner une corrélation entre le battement et le nombre de jours d'occurrence de remontées du niveau de la nappe, mais l'ajustement reste peu évident (R^2 = 0.77, cf. Figure 18).

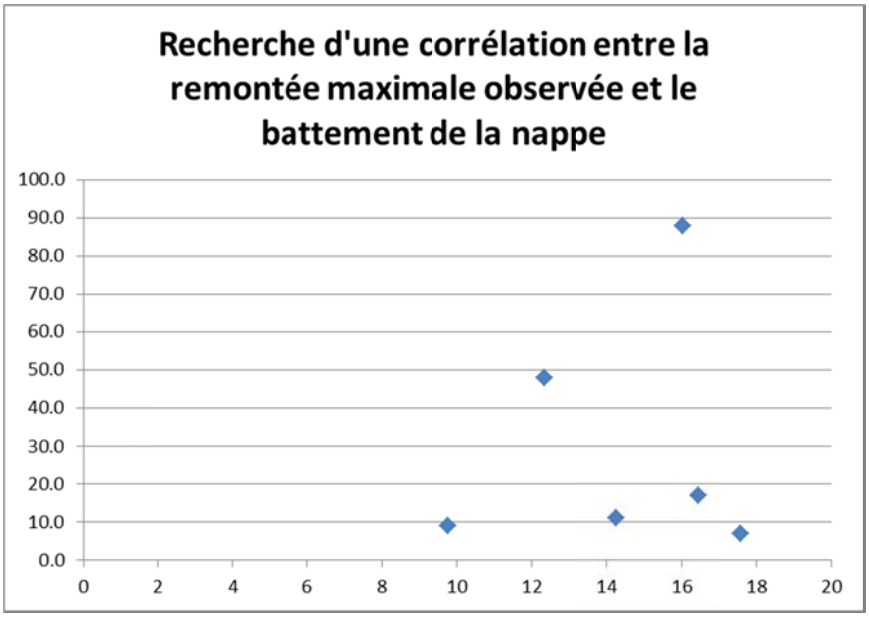


Figure 17 : Absence de corrélation entre le battement de la nappe (en m, en abcisse) et la vitesse maximale de remontée piézométrique journalière (en cm/j, en ordonnées) entre le 01/07/2005 et le 30/06/2010

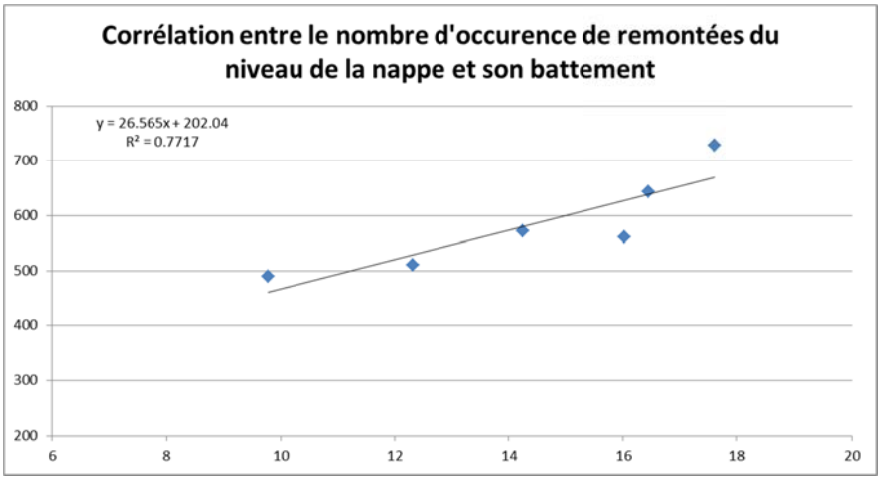


Figure 18 : Recherche de corrélation entre le battement de la nappe (en m, en abcisse) et le nombre de jours de remontée piézométrique rapide entre le 01/07/2005 et le 30/06/2010

La répartition des quartiles de vitesse de remontée du niveau piézométrique (cf. Tableau 12) est très cohérente avec le résultat de l'ACP conduite sur les niveaux piézométriques ; on retrouve ainsi les groupes suivants :

- Etaves-et-Bocquiaux (00497X0018) : Q1 : 3.0 cm ; Q2 : 5.0 cm ; Q3 : 10 cm ;

- Gapennes (00332X0007) : Q1 : 1.0 cm ; Q2 : 3.0 cm ; Q3 : 5 cm ;
- Senlis-le-Sec (00471X0010) : Q1 : 1.0 cm ; Q2 : 2.0 cm ; Q3 : 4 cm ;
- Huppy (00444X0008), Hangest-en-Santerre (00636X0020) et Crèvecœur-le-Grand (00794X0021) : Q1 et Q2 : 1.0 cm ; Q3 : 2.0 cm. Pour mémoire, la mesure minimale de la variation piézométrique est de 1 cm sur l'ensemble des ouvrages, ceci rendant possible que plus de 50% des valeurs de l'échantillon de données soit égale à 1 cm.

Cette cohérence est aussi vrai pour la moyenne ou l'écart-type.

On a vu précédemment que l'application d'un seuil identique à l'ensemble des piézomètres fait apparaître la disparité de l'ampleur des remontées rapides d'un piézomètre à un autre. Ceci a aussi conduit à un compromis peu satisfaisant, ce seuil étant trop bas pour Etaves-et-Bocquiaux (00497X0018), tandis qu'il est trop élevé pour Huppy (00444X0008). L'application d'un seuil fixe sur des données quotidiennes conduit aux mêmes résultats.

Il a donc été utilisé un seuil variable par piézomètre, basé sur la moyenne augmentée de deux fois l'écart-type (cf. Tableau 12). Le seuil retenu par piézomètre ainsi que le nombre de jours de remontée rapide qui en résultesont présentés dans le Tableau 13. Leur répartition annuelle apparait dans le Tableau 14.

indice BSS	Commune	Seuil spécifique (cm/j)	Nb jour de hausse ≥ spécif.
00332X0007	Gapennes	13	22
00444X0008	Huppy	4	12
00471X0010	Senlis-le-Sec	9	33
00497X0018	Etaves-et-Bocquiaux	28	27
00636X0020	Hangest-en-Santerre	4	29
00794X0021	Crevecoeur-le-grand	4	28

Tableau 13 : Nombre de jours de remontée piézométrique rapide sur la période 2005-2010

indice BSS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	TOTAL
00332X0007	1	2	7	4	8	0	22
00444X0008		5	6	1			12
00471X0010			23	7	0	3	33
00497X0018	0	8	8	10	1	0	27
00636X0020		1	3	21	0	4	29
00794X0021		1	7	11	3	6	28
TOTAL ANNUEL	1	17	54	54	12	13	151

Tableau 14 : Répartition annuelle du nombre de jours de remontée piézométrique rapide entre le 01/07/2005 et le 30/06/2010

Il est intéressant de noter dans ce dernier tableau les écarts observés dans l'occurrence des périodes de remontée rapide du niveau piézométrique d'un ouvrage à l'autre.

3.2.4. Corrélation avec la variation de stock d'eau dans la zone non saturée (ZNS)

La Figure 19 présente la variation quotidienne du stock d'eau dans la zone non saturée sur le site expérimental de Warloy-Baillon (courbe bleue) et la variation piézométrique journalière à Senlis-le-Sec (courbe rouge). Avant les années 2000, les variations piézométriques journalières sont très lissées compte tenu de la fréquence d'acquisition de cette donnée. Le stock d'eau est calculé à partir des lois d'écoulements dans la craie non saturée établies sur la base des profils de mesure des teneurs en eau, par modélisation 1D sur la période 1989-2008.

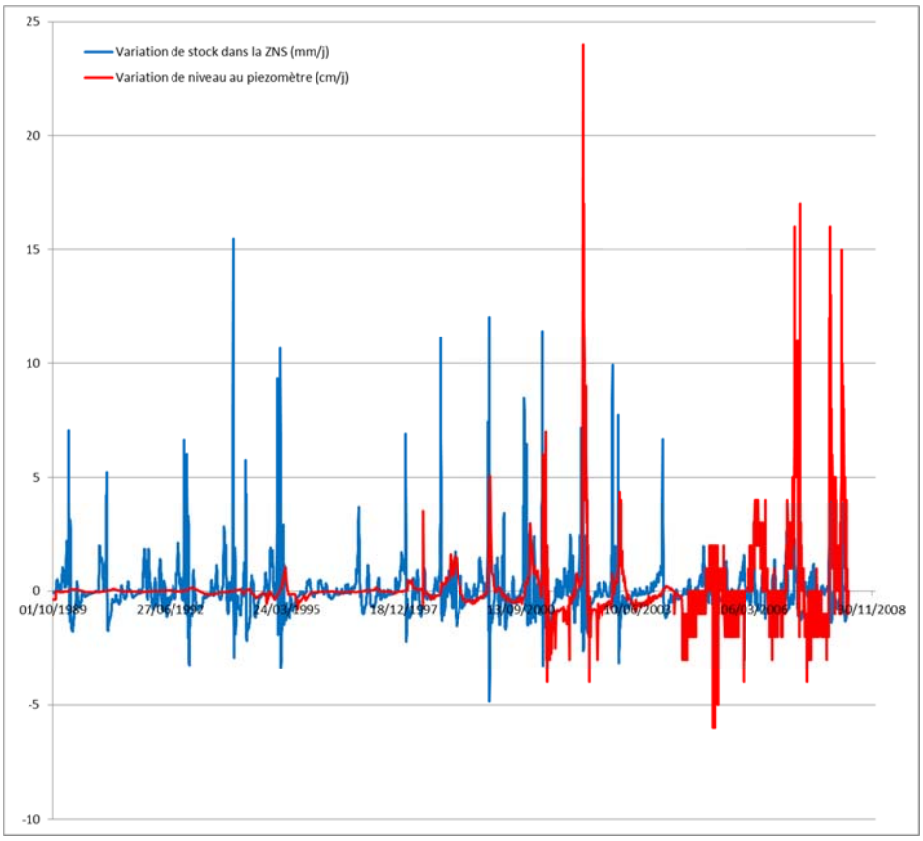


Figure 19 : Comparaison entre la vitesse de remontée de la nappe (courbe rouge) à Senlis-le-Sec et la variation de stock d'eau dans la zone non saturée à Warloy-Baillon (courbe bleue)

La variation de stock dans la ZNS anticipe la remontée du niveau de la nappe (Figure 20) : les pics de variation de stock (courbe bleue) se produisent avant les pics de vitesse de remontée de la nappe (courbe rouge).

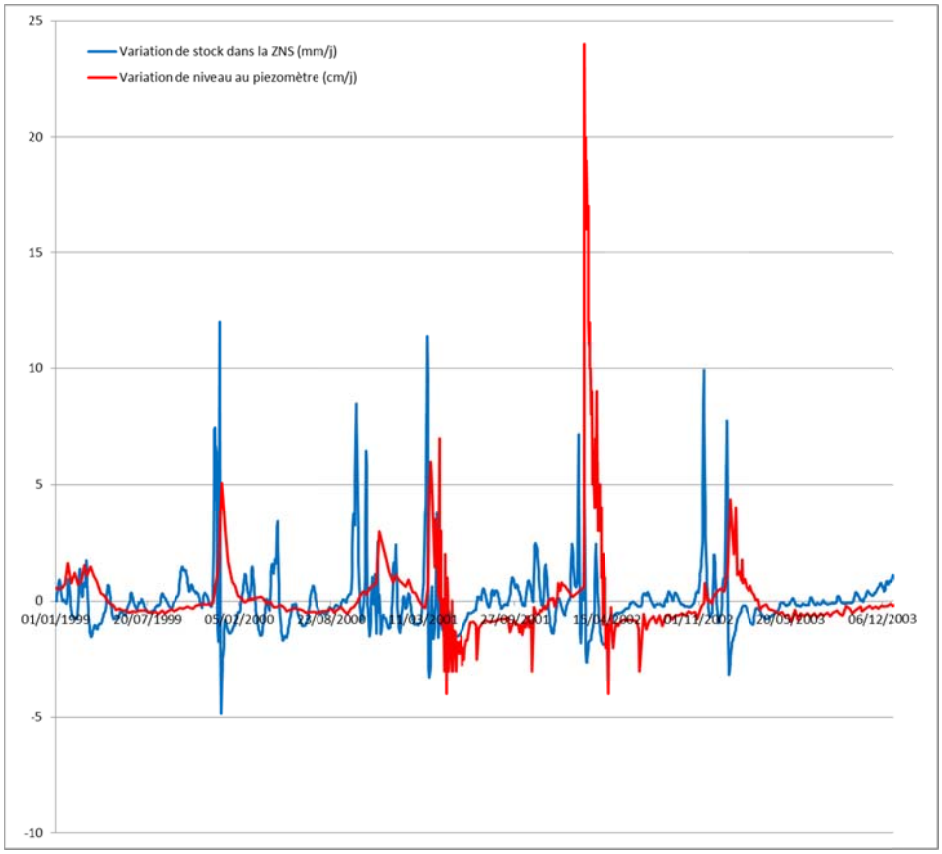


Figure 20 : Comparaison entre la vitesse de remontée de la nappe à Senlis-le-Sec (courbe rouge) et la variation de stock d'eau dans la zone non saturée (courbe bleue). Zoom sur la période 1999-2003

3.3. SYNTHÈSE

Plusieurs éléments ressortent de ces analyses :

- le phénomène de remontée piézométrique rapide n'est pas spécifique :
    - à un secteur donné de la Somme ;
    - aux années de fortes inondations.
- des disparités importantes se manifestent dans l'occurrence temporelle et spatiale de ce phénomène, ainsi que dans son amplitude ;
- lors des années de fortes inondations, le phénomène s'accentue de façon remarquable ;
- la corrélation avec l'évolution du stock d'eau dans la ZNS est nette pour le bassin de l'Hallue.

4. Analyse des résultats du projet Flood-1 en lien avec le niveau de la nappe et le débit de l'Hallue

Pour évaluer l'impact de la zone non saturée sur la remontée rapide du niveau de la nappe et le débit du cours d'eau, il est nécessaire d'analyser conjointement la réponse de la nappe (niveau piézométrique), les variables de la zone non saturée de la craie, la pluie efficace et le débit de l'Hallue.

Cette analyse est faite à partir des données acquises dans le cadre du projet Flood-1 sur le site de Warloy-Baillon (bassin de l'Hallue). Elle ne peut être extrapolable à l'ensemble du bassin de la Somme du fait de la variabilité du comportement des sous-bassins de la Somme (voir chapitre précédent).

Par ailleurs, les données piézométriques en différents points d'observation du bassin de l'Hallue seront analysées en lien avec les données du site de Warloy-Baillon pour voir dans quelle mesure les données caractérisant la ZNS de la craie à Warloy-Baillon pourraient être extrapolées à l'ensemble du bassin de l'Hallue.

4.1. DONNÉES UTILISÉES POUR CETTE ANALYSE

Le site expérimental de Warloy-Baillon a été équipé en 2005, dans le cadre du projet INTERREG IIIA FLOOD1 (2004-2008), pour le suivi de la zone saturée et de la zone non saturée de la craie. Ce site est équipé de deux piézomètres situé à 70 m l'un de l'autre dans la direction générale de l'écoulement. Le suivi de la zone non saturée se fait à l'aide d'une sonde équipée de 16 capteurs d'humidité, permettant de suivre la teneur en eau à différentes profondeurs de la craie (jusqu'à 8 m de profondeur), 10 tensiomètres superficiels pour suivre la succion dans la zone non saturée sur 8 m de profondeur, et 10 Jacking tensiomètres installés dans un forage permettant de suivre la succion entre 10 et 26 m de profondeur (la surface libre de la nappe en basses eaux se situe en moyenne à 27 m de profondeur). Par ailleurs, le site est équipé d'un pluviomètre enregistrant les précipitations et de deux centrales d'acquisition de données.

Les variables utilisées pour cette analyse sont :

1) pour la zone non saturée : la succion (pression négative de l'eau) mesurée en 20 points entre la surface du sol et la nappe, et la teneur en eau volumique mesurée à différentes profondeurs ;
2) le niveau de la nappe au droit du site (piézomètre PZ1), et dans les piézomètres de Senlis-le-Sec et de Harponville situés dans le bassin de l'Hallue (figure 11) ;
3) le débit de l'Hallue aux stations de Bavelincourt et Querrieu ;
4) la pluie mesurée à Warloy-Baillon

La figure 21 montre le bassin de l'Hallue avec la localisation du site expérimental, des piézomètres et des stations de jaugeage utilisés pour l'analyse qui suit.

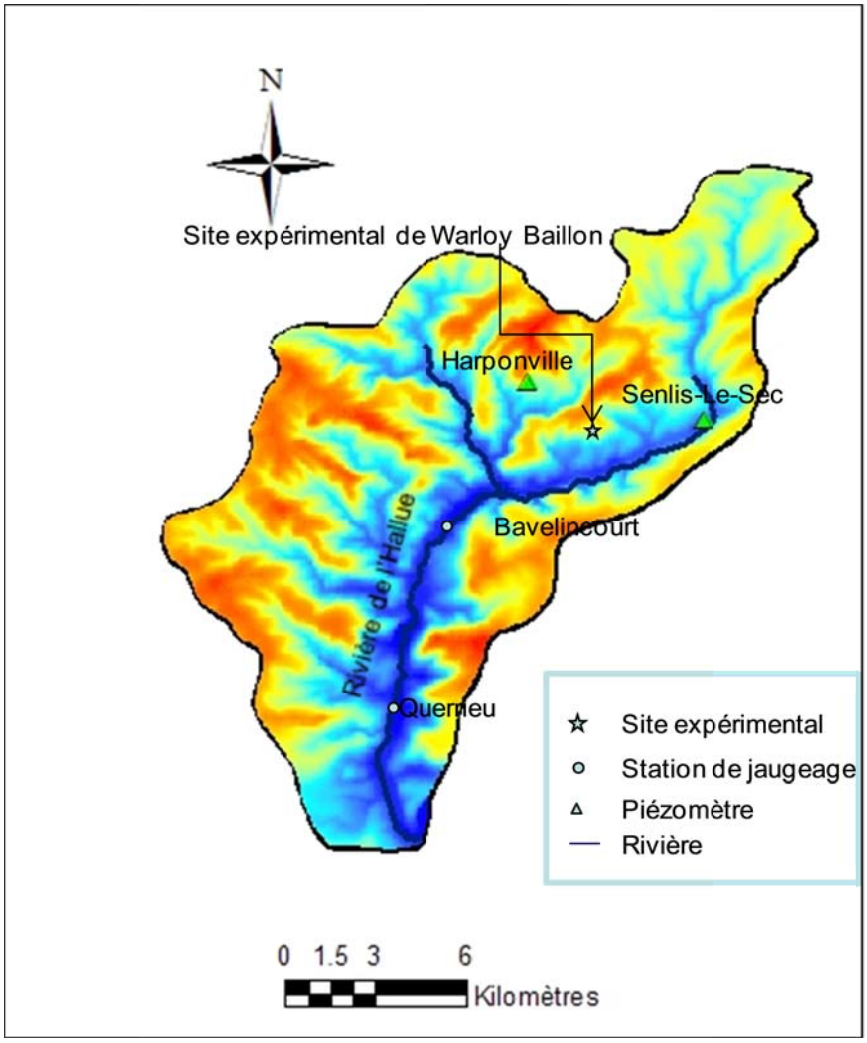


Figure 21 :Bassin de l'Hallue - Localisation du site expérimental, des piézomètres et des stations de jaugeage analysés

4.2. ANALYSE DE LA RÉACTION DE LA NAPPE DE LA CRAIE AU DROIT DU SITE DE WARLOY-BAILLON ET DU DÉBIT DE L'HALLUE.

Pour identifier les périodes où une remontée rapide de la nappe a été observée pendant la période de suivi, le comportement de la nappe de la craie a été étudié au droit du site de Warloy-Baillon. Pour les périodes ainsi identifiées, nous procéderons à une analyse conjointe de la remontée rapide du niveau de la nappe, du débit du cours d'eau, et des variables de la zone non saturée. Les données analysées couvrent la période allant de février 2006 à avril 2008.

4.2.1. Analyse de la situation hydrologique.

Avant de procéder à une analyse conjointe des variables de la Zone non saturée de la craie avec le niveau de la nappe et le débit de l'Hallue, nous avons analysé et comparé les précipitations enregistrées sur le site de Warloy-Baillon durant la période de suivi (2006-2008) aux précipitations exceptionnelles enregistrées pendant l'année hydrologique 2000-2001 à la station de Bernaville (figure 22). Cette station située dans le bassin de la Nièvre à environ 26 km au nord-ouest du site de Warloy-Baillon est assez représentative des précipitations au nord du bassin de l'Hallue (rapport BRGM/RP-51827-FR). Cette analyse montre que, globalement, les précipitations enregistrées pendant la période de suivi du site de Warloy-Baillon sont nettement plus faibles que celles qui ont été enregistrées pendant la crue de 2001, même si des précipitations supérieures à 110 mm/mois ont été enregistrées en février 2006, décembre 2007 et mars 2008

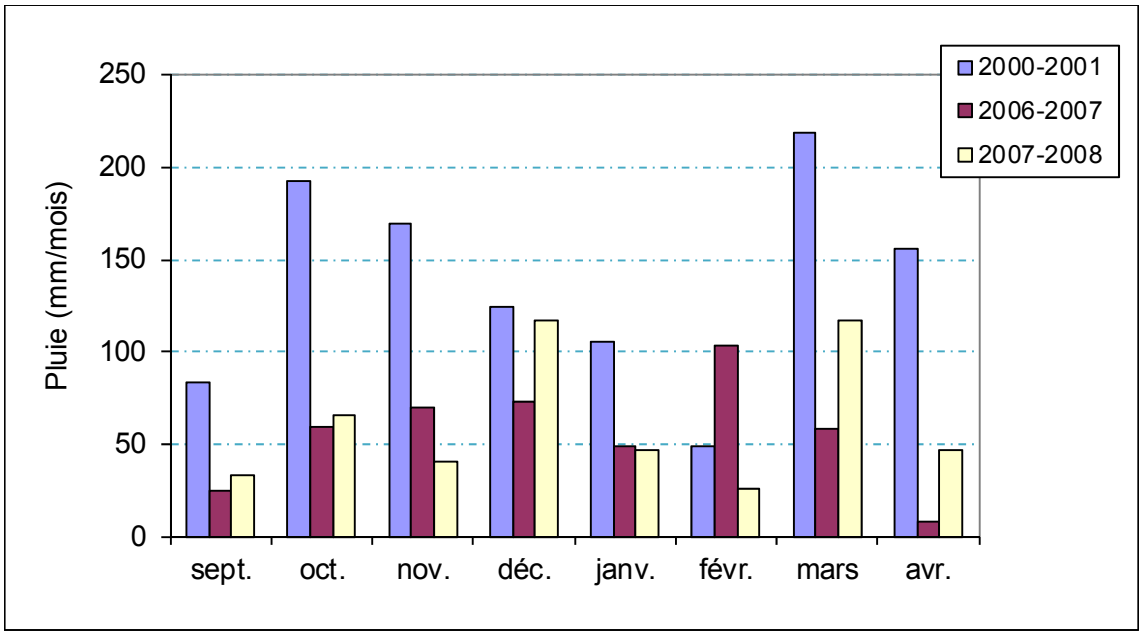


Figure 22 : Comparaison des pluies brutes mensuelles à Bernaville entre septembre 2000 et avril 2001, et à Warloy-Baillon entre 2006 et 2008.

4.2.2. Niveau piézométrique et débit de l'Hallue

Les évolutions, au droit du site de Warloy–Baillon, de la profondeur de la nappe dans le piézomètre Pz1 et des pluies journalières sont présentées en figure 23. On peut distinguer trois périodes durant lesquelles une remontée relativement rapide du niveau de la nappe a été observée, en février 2007, décembre 2007, et mars 2008. Rappelons que pour ces trois périodes des précipitations supérieures à 100 mm/mois ont été enregistrées (voir § précédent).

Si on regarde l'évolution du niveau piézométrique à Senlis-Le-Sec et le débit enregistré à Bavelincourt sur la période 2006-20008 (figure 24), des remontées rapides du niveau de la nappe et du débit de la rivière ont également été enregistrées à ces périodes.

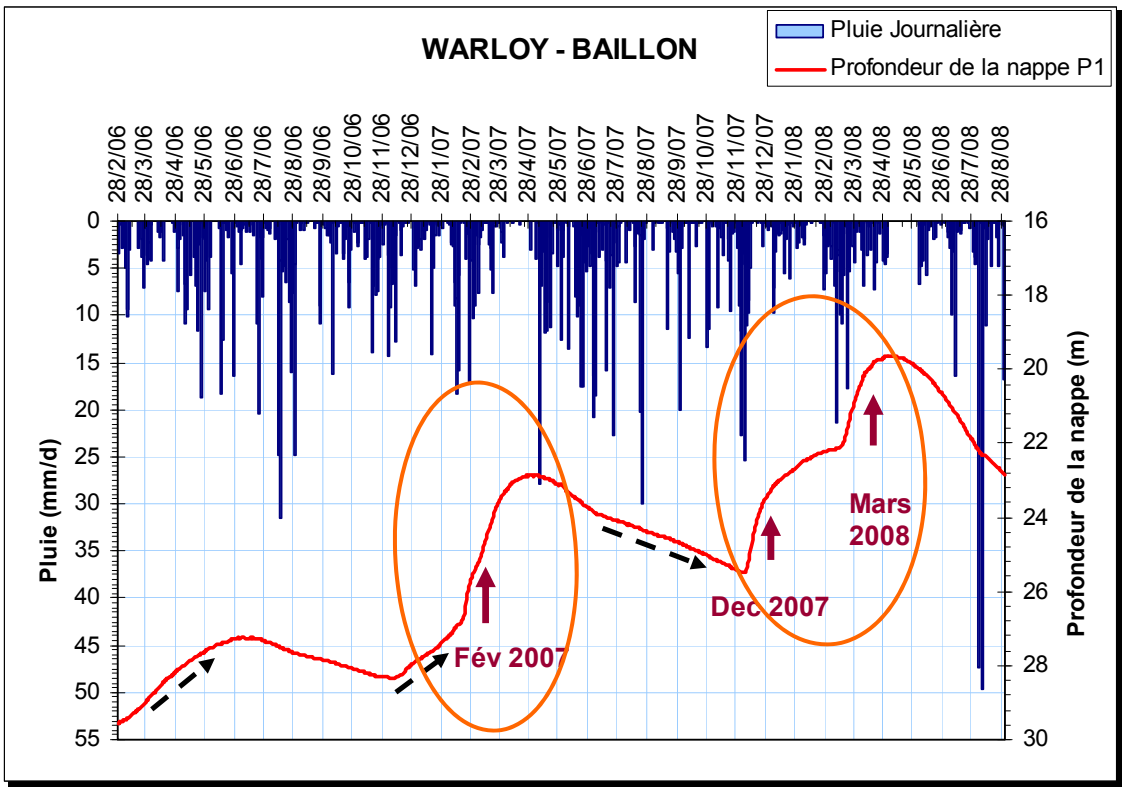


Figure 23 : Pluie journalière et profondeur de la nappe dans le piézomètre Pz1 du site expérimental.

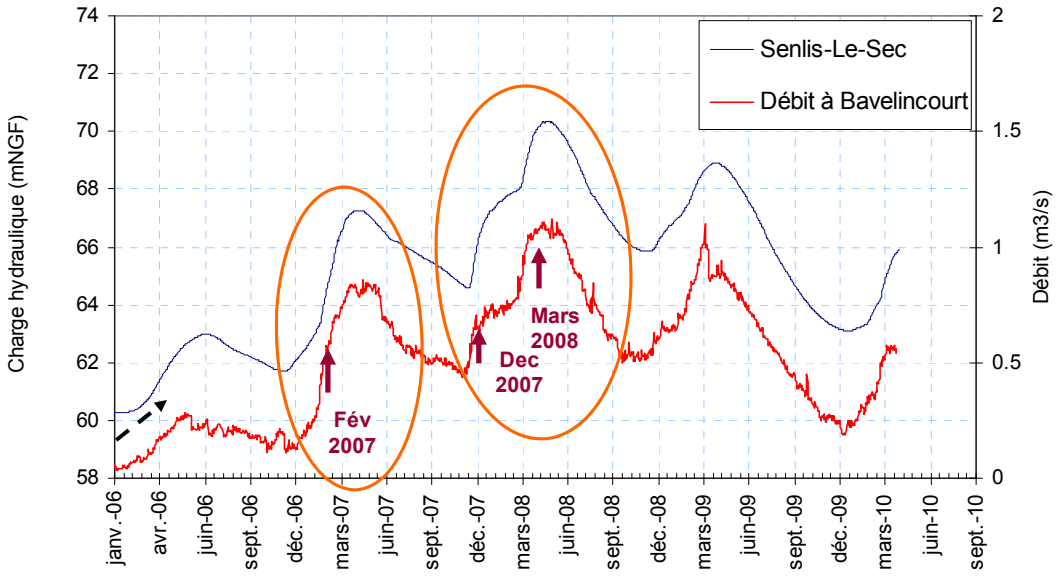


Figure 24 : Niveau piézométrique à Senlis-le-Sec et débit de l'Hallue à Bavelincourt entre 2006 et 2008.

4.3. DÉLAI ENTRE L' EFFET SEUIL OBSERVÉ DANS LA ZONE NON SATURÉE, L'AUGMENTATION RAPIDE DU DÉBIT DE L'HALLUE, ET CELLE DU NIVEAU DE LA NAPPE

Nous nous sommes intéressés dans cette partie à deux épisodes durant lesquels de fortes remontées de niveau de la nappe et du débit de l'Hallue ont été enregistrées, en décembre 2007 et mars 2008.

4.3.1. Notion de seuil de pression négative dans la craie non saturée

Les aquifères crayeux sont décrits comme des systèmes à double porosité et double perméabilité dans lesquels l'écoulement de l'eau se fait à travers la matrice crayeuse et à travers les fractures qui séparent les blocs de craie. Les flux d'eau traversant la zone non saturée peuvent être calculés à partir des évolutions de teneur en eau et du potentiel matriciel (appelé aussi succion) dans la craie non saturée.

Comme les flux ne peuvent pas être mesurés directement, Welling and Bell (1980) suggèrent un seuil de succion (associé à une ouverture de fracture) au-dessous duquel les fractures peuvent se remplir et conduire l'eau. Ce seuil a été fixé à une succion de 50 cm d'eau (correspondant à un potentiel matriciel de -50 cm d'eau) dans la craie supérieure en Angleterre (Upper Chalk).

4.3.2. Délai entre l'effet seuil observé dans la ZNS et l'augmentation du débit de l'Hallue

Dans un premier temps, le potentiel matriciel de la craie non saturée mesuré à Warloy-Baillon à des profondeurs de 1.5 m et 4 m a été analysé conjointement avec le débit de l'Hallue à Querrieu (figure 25) pour les périodes de décembre 2007 et Mars 2008.

En décembre 2007, le potentiel matriciel mesurée à 1.5 m de profondeur atteint le seuil critique (succion<50 cm d'eau) à partir du 6 décembre et se maintient au-delà jusqu'au 16 décembre. En parallèle, on observe une augmentation rapide du débit de l'Hallue du 7 au 10 décembre. À 4 m de profondeur, la pression critique n'est atteinte que le 9 décembre.

Pour la période de mars 2008, à 1.5 m de profondeur le seuil de 50 cm d'eau est dépassé du 12 au 26 mars, alors qu'à 4 m de profondeur ce seuil de pression n'est atteint que 4 jours plus tard (16 mars). L'augmentation la plus rapide du débit de l'Hallue se situe entre le 18 et le 22 mars.

Dans un second temps, nous avons relevé les dates et durées auxquelles le seuil de 50 cm d'eau a été atteint à différentes profondeur de la craie (pointillés rouges de la figure 26) pour les deux périodes étudiées, en superposition avec le débit de l'Hallue à Bavelincourt. On peut voir qu'à partir du moment où le seuil de succion est atteint dans toute la zone non saturée, la pente d'accroissement du débit devient importante et reste élevée pendant 6 jours en décembre et environ 14 jours en mars.

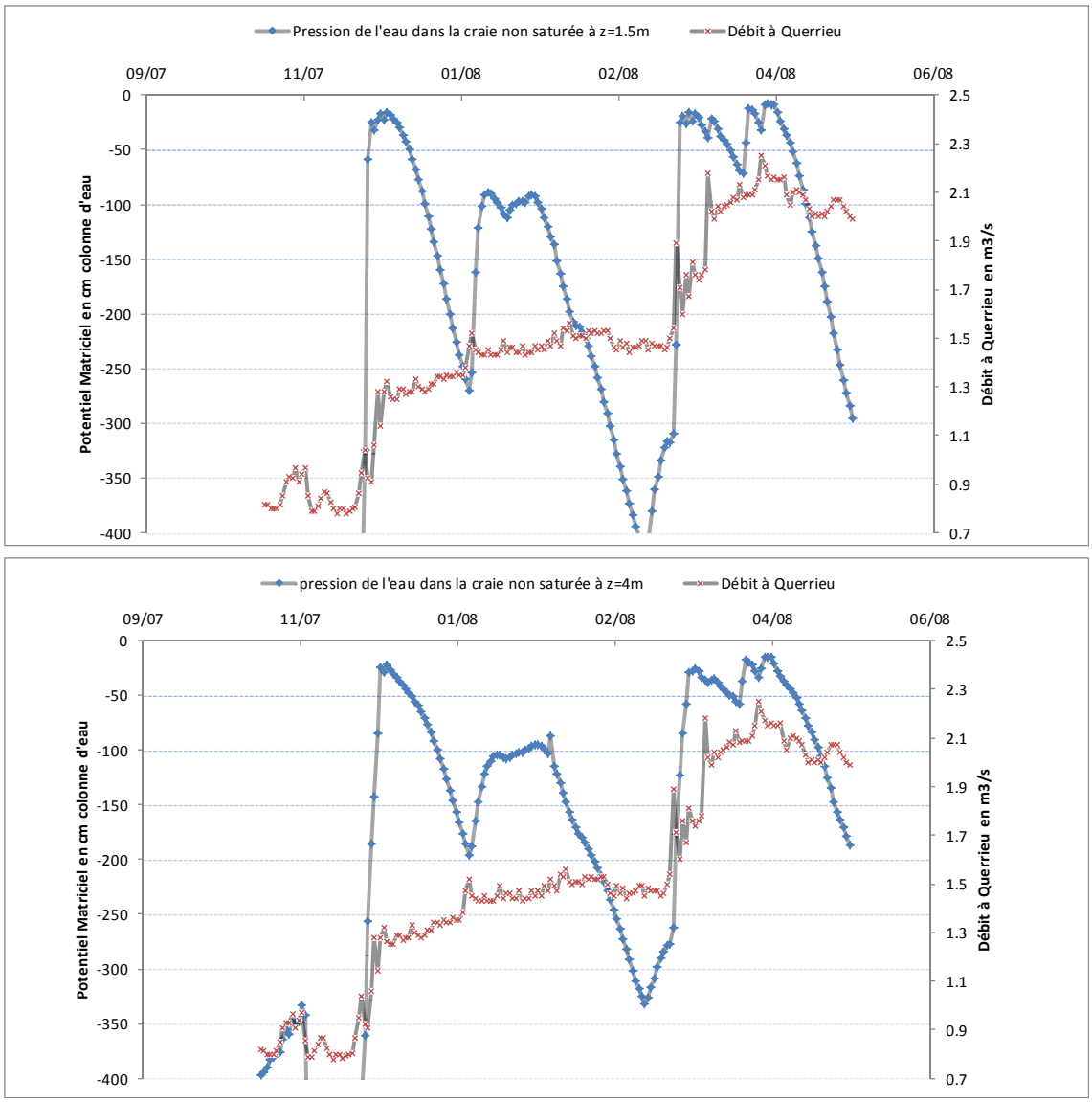


Figure 25 : Évolutions comparées du potentiel matriciel de la craie non saturée à Warloy-Baillon à des profondeurs de 1.5 m et 4 m, et du débit de l'Hallue à Querrieu.

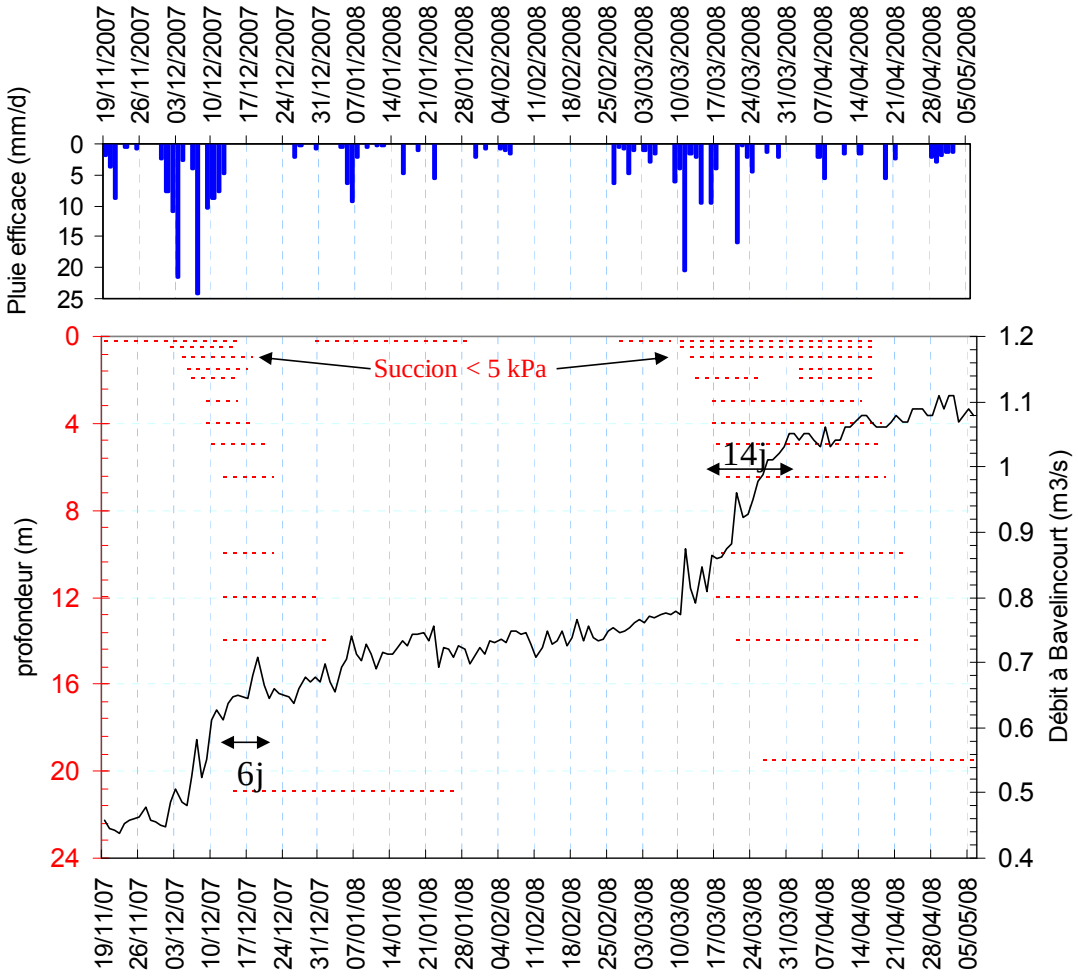


Figure 26 : Pluie efficace et débit de l'Hallue à Bavelincourt. Les pointillées rouges représentent les périodes auxquelles le seuil de succion de 50 cm d'eau (soit 5 kPa) a été dépassé aux profondeurs de suivi dans la craie.

4.3.3. Délai entre l'effet seuil observé dans la ZNS et la remontée rapide de la nappe

Sur la figure 27, sont reportés les évolutions du niveau de la nappe au droit du site de Warloy-Baillon dans le piézomètre Pz1 et le potentiel matriciel mesuré dans la craie non saturée à deux profondeurs 1.5 m et 4 m.

L'analyse conjointe de la remontée rapide de la nappe observée en décembre 2007 et du potentiel matriciel mesuré à 1.5 m de profondeur montre qu'une remontée rapide de la nappe n'est enregistrée que 2 jours après le dépassement du seuil critique, le 8 décembre avec une vitesse de 9 cm /j, et qu'une vitesse maximale de remontée de 22 cm /j est atteinte le 12 décembre. À 4 m de profondeur, la pression critique n'est atteinte qu'à partir du 9 décembre.

Pour la période de mars 2008, on observe une remontée rapide de la nappe à partir du 17 mars, avec atteinte d'un maximum de 12 cm/j le 22 mars. La remontée rapide se poursuit jusqu'à fin mars 2008.

Si on regarde la réaction de la nappe quand le seuil de pression est atteint sur toute la zone non saturée de la craie (figure 28), on peut voir qu'à cette date on enregistre un maximum de vitesse de remontée du niveau de la nappe. L'analyse des précipitations montre qu'en décembre 2007, la pluie efficace est de 100 mm principalement générée entre le 1er et le 12 décembre. En mars 2008, la pluie efficace est de 80 mm dont 57 mm générés entre le 9 et le 17 mars.

La vitesse de remontée de la nappe en décembre 2007 est plus importante que celle enregistrée en mars 2008 bien que les précipitations mensuelles soit identiques (117mm). Ceci peut s'expliquer par une évapotranspiration plus importante en mars, qui réduit la pluie efficace et donc le flux de recharge. Ceci nous amène à la conclusion que, bien que le seuil de pression soit atteint sur toute la profondeur de la ZNS dans les deux périodes, l'intensité de la pluie efficace en surface est un élément important dans la vitesse de réaction de la nappe.

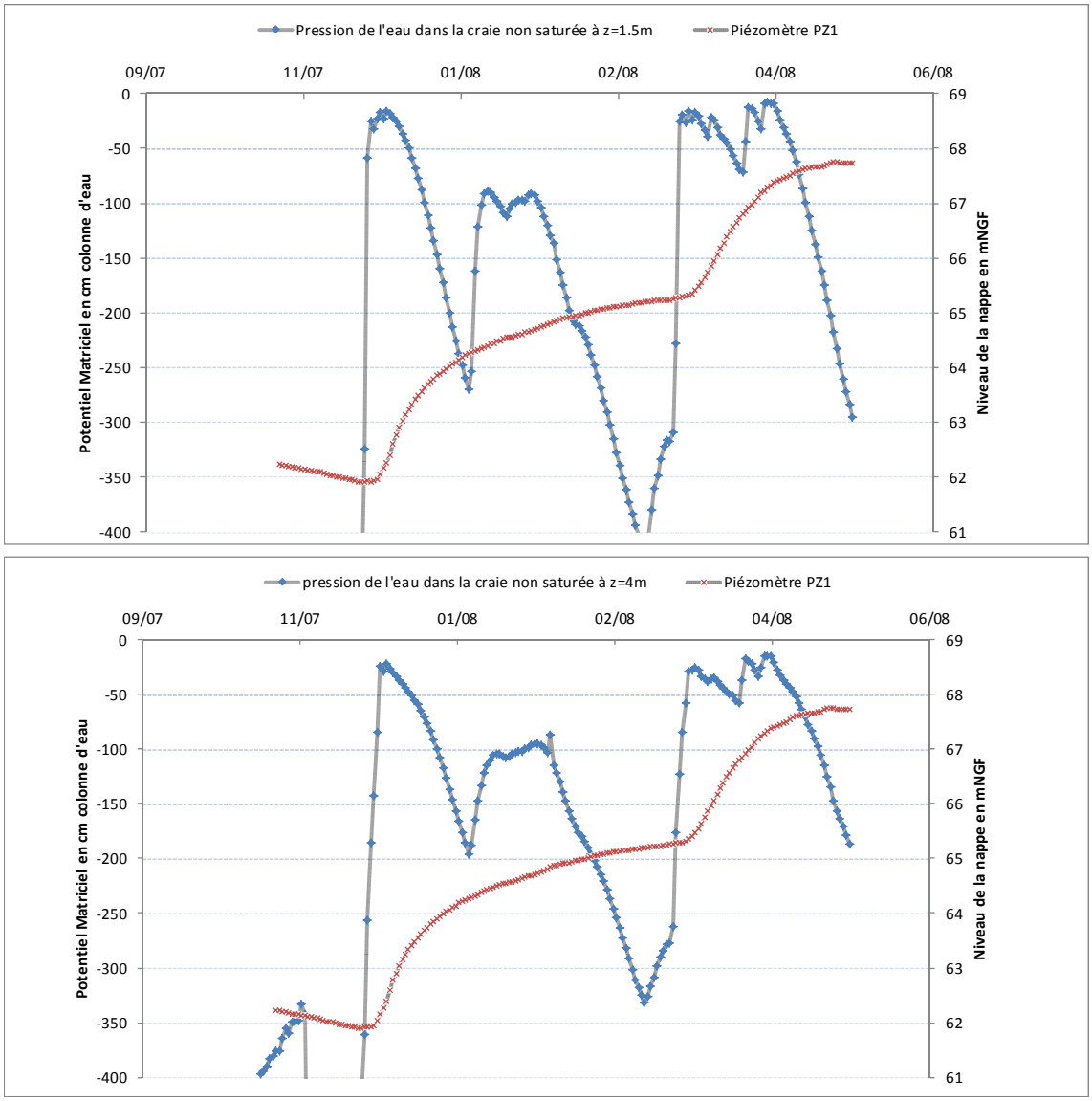


Figure 27 : Évolutions comparées du potentiel matriciel de la craie non saturée à Warloy-Baillon à des profondeurs de 1.5 m et 4 m, et du niveau de la nappe dans le piézomètre Pz1..

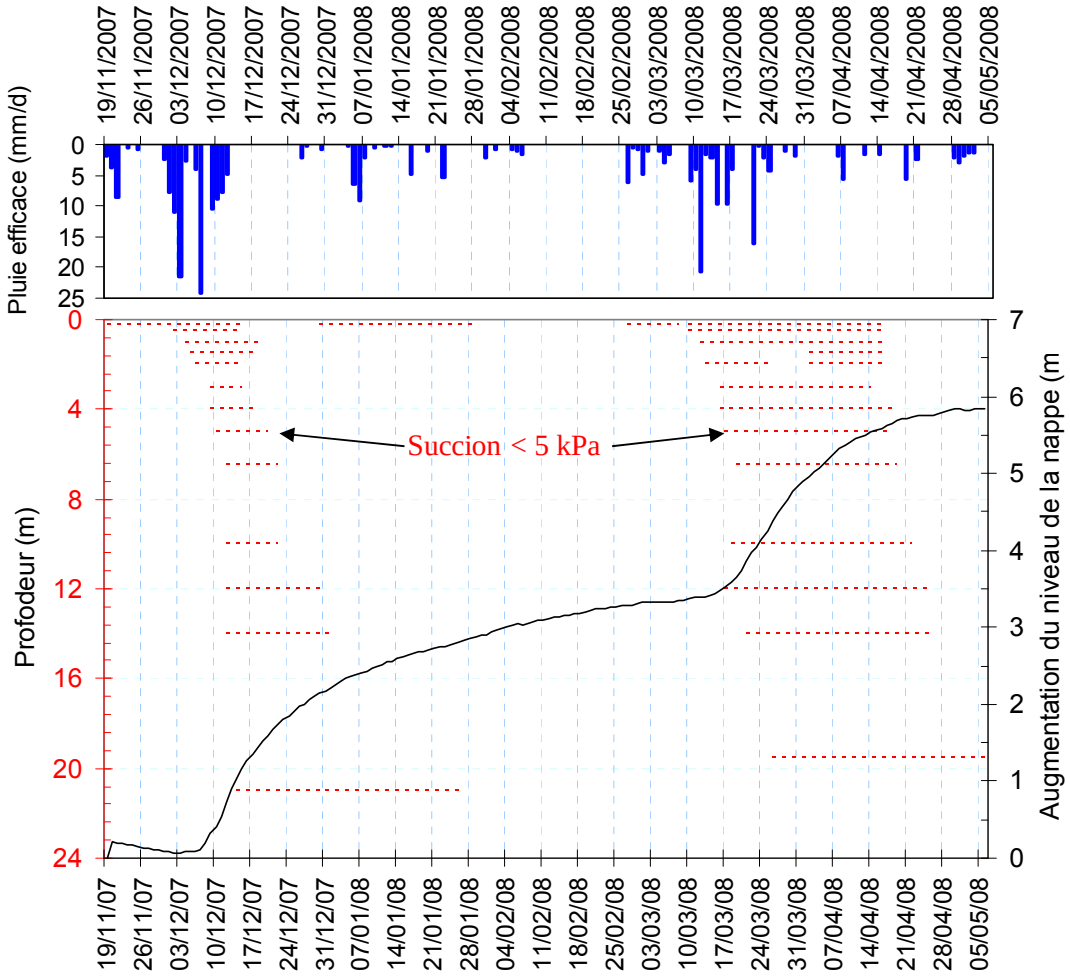


Figure 28 : Pluie efficace et augmentation du niveau de la nappe dans le Piézomètre Pz1. Les pointillées rouges représentent les périodes auxquelles le seuil de succion de 50 cm d'eau (soit 5 kPa) a été dépassé aux profondeurs de suivi dans la craie.

La vitesse de remontée de la nappe dépond de l'intensité de la pluie efficace en surface et de l'état de succion (pression) dans la Zone non saturée.

4.4. CONCLUSIONS

De cette première analyse il ressort que :

- Il y a une corrélation étroite entre le débit de l'Hallue et la succion dans la craie non saturée à 1.5 m et 4 m de profondeur. Le dépassement du seuil de pression de 50 cm d'eau à ces profondeurs permet d'anticiper l'augmentation rapide du débit du cours d'eau. Quand ce seuil est atteint sur toute la profondeur de la craie et selon l'intensité de la pluie efficace, le débit de l'Hallue

peut augmenter fortement pendant 6 à 14 jours, le déclenchement de la forte hausse survenant 2 à 4 jours après l'atteinte du seuil critique ;

- La vitesse de remontée rapide dans la nappe peut atteindre temporairement, sur la période étudiée, plus de 20 cm/jour dans le site de Warloy-Baillon. La vitesse maximale est atteinte quand le profil de la ZNS est très proche de la saturation complète et quand la pluie efficace dépasse 80 mm/mois. Il serait intéressant de voir dans une phase ultérieure la réaction d'autres piézomètres du bassin de la Somme pendant les mêmes périodes.

5. Modélisation par Gardénia à deux entrées du débit de l'Hallue et amélioration sur la prévision

5.1. OBJECTIFS

L'objectif de cette phase de recherche est la valorisation des données acquises dans la Zone non Saturée au cours du projet Flood-1, dans le but d'améliorer la simulation et la prévision du débit de l'Hallue à Bavelincourt. Les résultats obtenus pourront, dans une phase ultérieure, être étendus aux débits de la Somme à Abbeville.

5.2. LES VARIABLES À ANALYSER

Parmi les données disponibles dans la Zone Non Saturée (ZNS), on s'est intéressé plus particulièrement aux données suivantes car elles nous ont semblé les plus aptes à servir d'indicateurs à la recharge de la nappe, et donc à la prévision des débits de l'Hallue :

- Les teneurs en eau à diverses profondeurs : 400 cm, 800 cm de profondeur.
- Les stocks en eau dans diverses tranches : 0-400 cm, 400-800 cm, 800-2700 cm.
- Le flux de percolation à différentes profondeurs.
- Le niveau piézométrique observé.

Les périodes de disponibilité des données mises en forme sont les suivantes :

- Les données mesurées dans la ZNS sont suivies et exploitables depuis 2006.
- Les écoulements dans la ZNS ont été modélisés par calage du modèle MARTHE sur la période 2006-mi-2008 (projet Flood-1).
- Les simulations (calibrées sur la période 2006-mi-2008) ont permis de calculer les états (teneurs en eau, stocks, flux) sur la période 1988-mi-2008. Cette période couvre en particulier les crues de 1994 et de 2001.

Les données sont illustrées sur les figures 29 à 32.

En examinant ces figures il apparaît que :

- Les séries de débits et de niveaux piézométriques dans le bassin de l'Hallue sont en très bonne cohérence.

- Les séries de teneur en eau calculées à 4 m et 8 m de profondeur (1989-2008) sont assez semblables, mais logiquement la série à 8 m est nettement plus amortie.

- Les stocks en eau calculés dans la tranche 0 m- 4.25 m, dans la tranche 4.25 m – 8 m et dans la tranche 8 m – 27 m de profondeur (1989-2008) présentent une bonne cohérence.

- La série des flux de percolation calculés à 8 mètres de profondeur, comparée à la série des débits journaliers à Bavelincourt, montre que les pointes de flux de percolation calculé permettent de prévoir les remontées de débit. En effet, les 5 plus forts pics de flux de percolation sont associés aux 5 plus forts épisodes de débit. Cependant, un pic isolé de flux de percolation ne suffit pas à générer une forte crue dans l'Hallue.

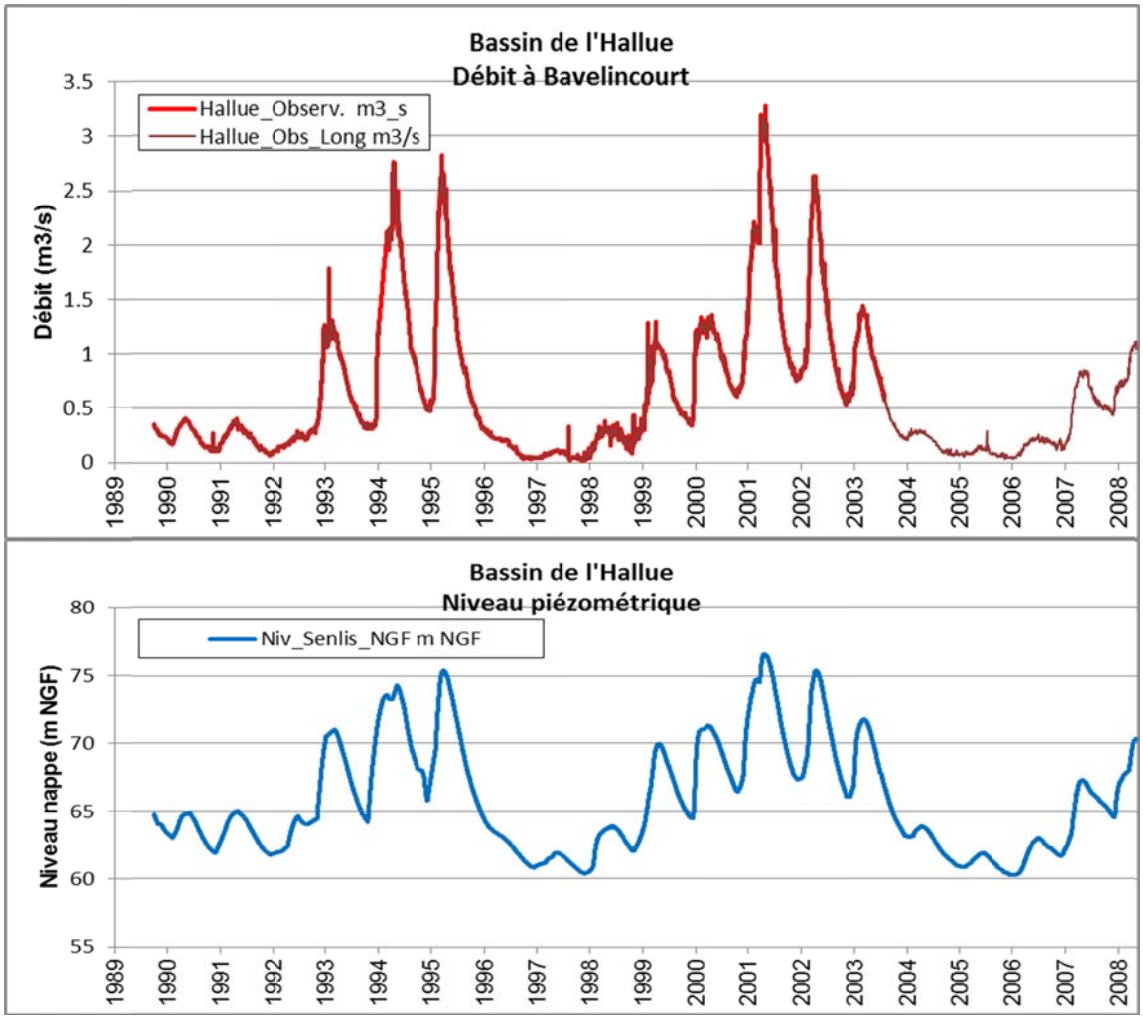


Figure 29 : Débit et niveau piézométrique dans le bassin de l'Hallue : Très bonne cohérence entre les 2 séries

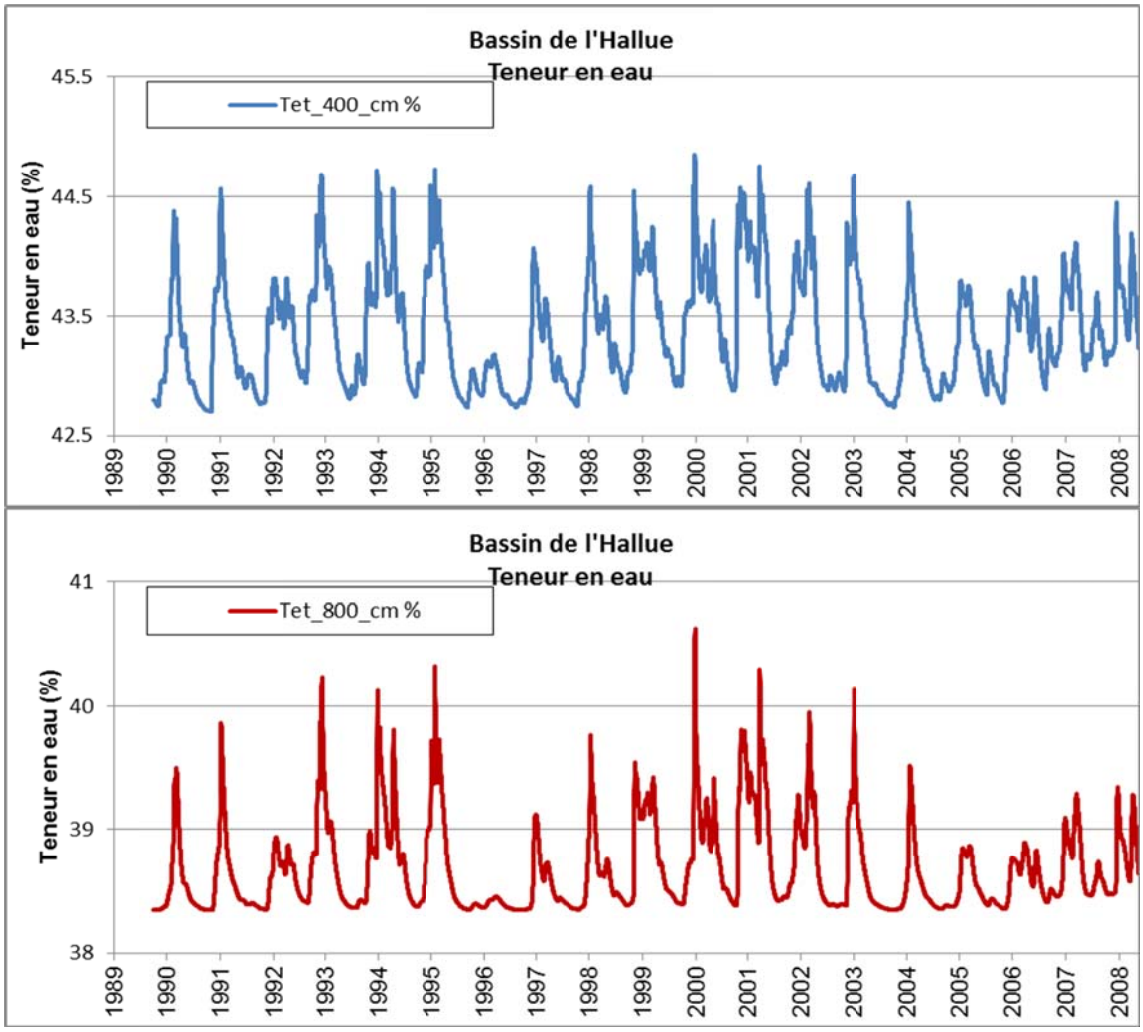


Figure 30 : Teneurs en eau calculées à 4 m et 8 m de profondeur (1989-2008). La série à 8 m est nettement plus amortie.

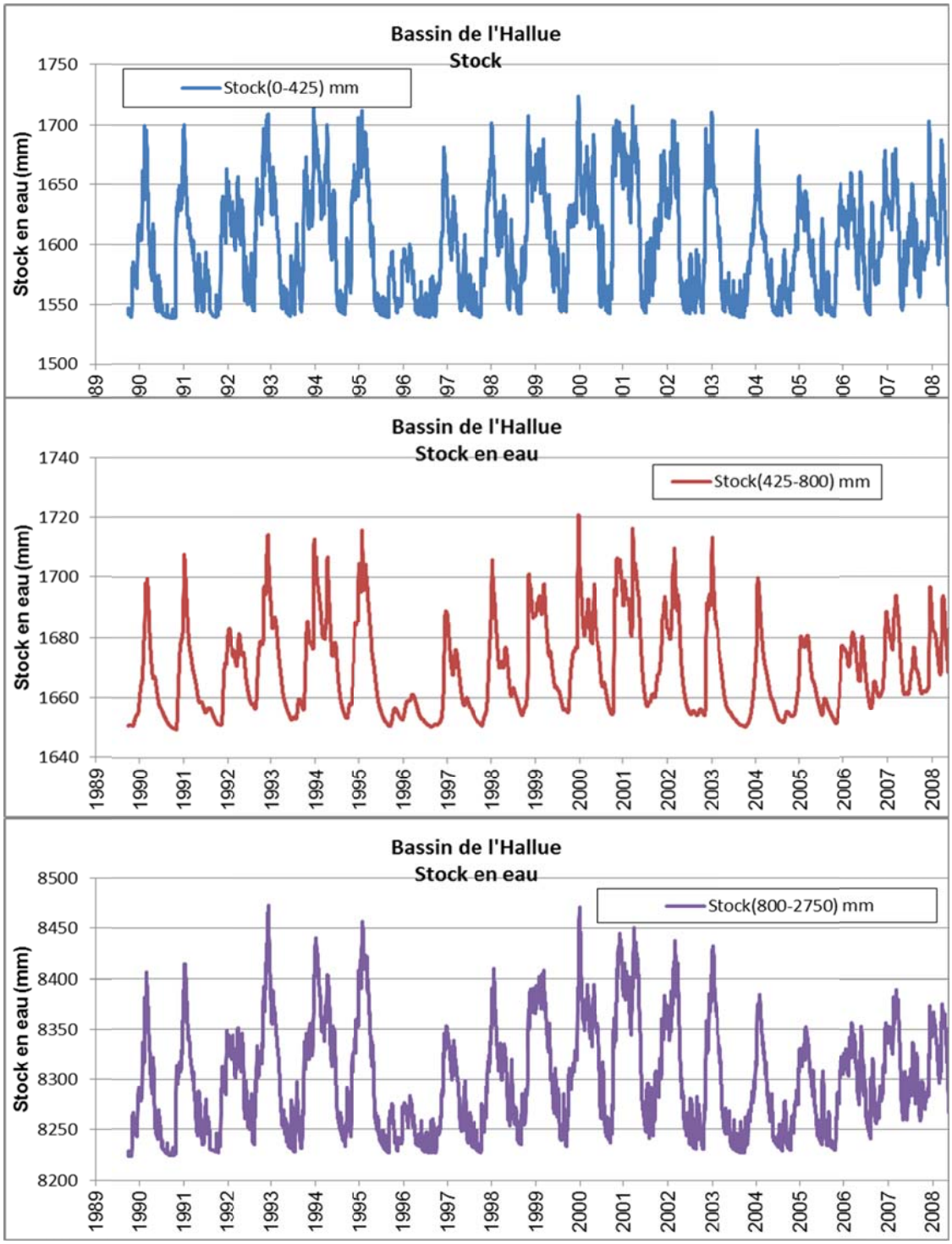


Figure 31 : Stocks en eau calculés dans les tranches 0 m- 4.25 m, 4.25 m - 8 m, et 8 m – 27 m de profondeur (1989-2008).

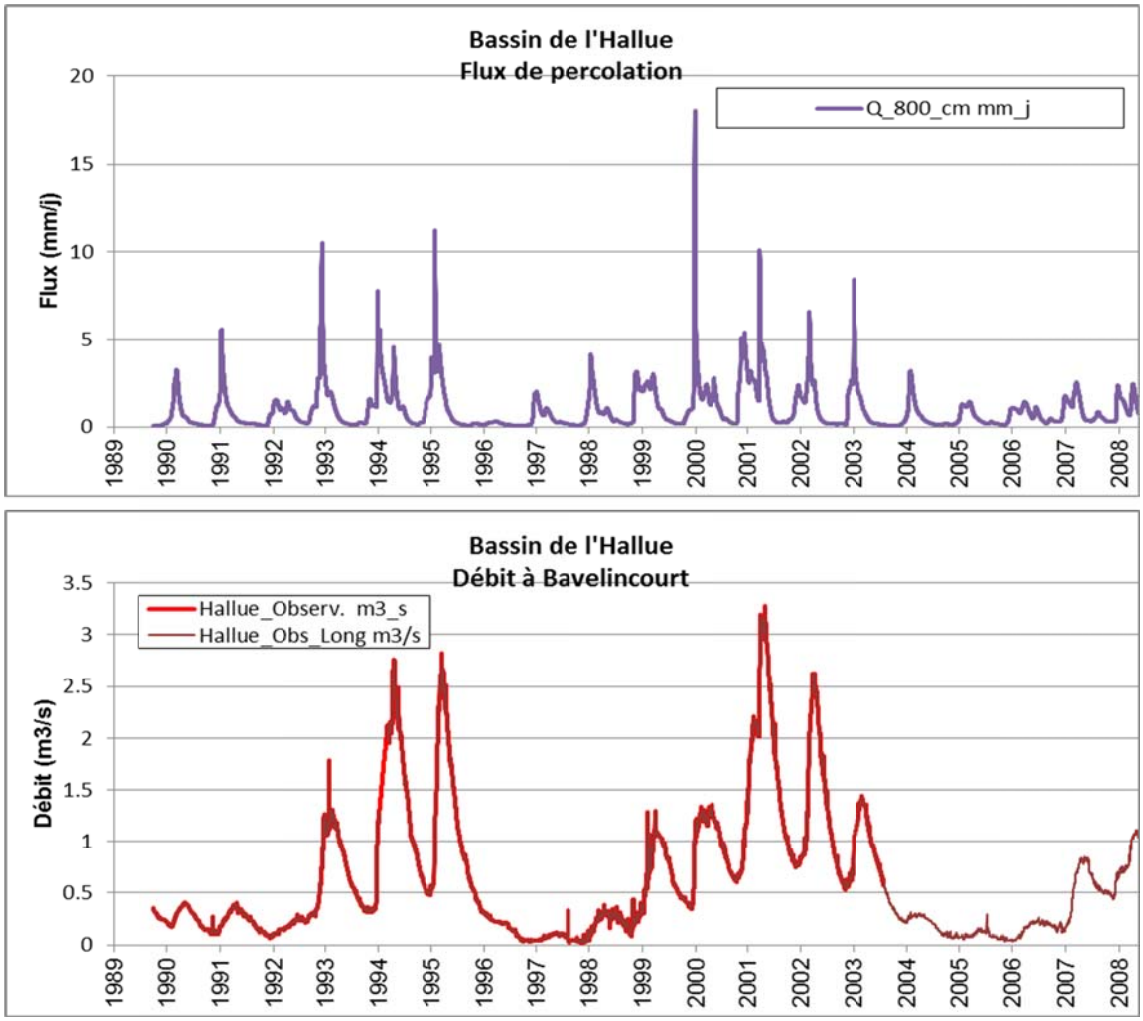


Figure 32 : Flux de percolation calculé à 8 mètres de profondeur, comparé aux débits journaliers à Bavelincourt. Les pointes de flux isolées ne suffisent pas à prévoir les pointes de débit.

5.3. ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES RÉACTIONS

Pour cette analyse on a calculé par « Déconvolution » la « réponse impulsionnelle » entre un état dans la ZNS et le débit à Bavelincourt.

La « réponse impulsionnelle » d'un d'état dans la ZNS sur le débit de l'Hallue est la réaction du débit de l'Hallue à un « pic » isolé de variation de cet état dans la ZNS (pic de teneur en eau, pic de débit de percolation par exemple).

La « déconvolution » est une technique mathématique qui permet, à partir de la série d'un état piézométrique et de la série des débits de l'Hallue de calculer la « réponse impulsionnelle » de cet état. Il est également possible d'obtenir la réponse impulsionnelle sur un niveau piézométrique (le niveau piézométrique à Senlis-le-Sec par exemple).

Ayant obtenu la réponse impulsionnelle, on obtient par simple cumul la réponse à un « échelon continu » (échelon de teneur en eau, échelon de débit de percolation).

Les figures 33 à 36 présentent respectivement les réactions :

- aux variations de teneur en eau à 4 m et à 8 m de profondeur,
- aux variations de stock en eau de 4 à 8 m et de 8 à 27 m de profondeur,
- aux variations de flux de percolation à 8 m de profondeur,
- aux variations de niveaux piézométriques à Senlis.

On remarque que les réactions aux variations de teneurs en eau ou aux variations de stock en eau, bien qu'assez rapides au début, s'étendent sur de longues périodes.

En revanche, la réaction à une variation de niveau piézométrique est rapide. Au total, la réponse impulsionnelle ne dépasse pas 15 jours.

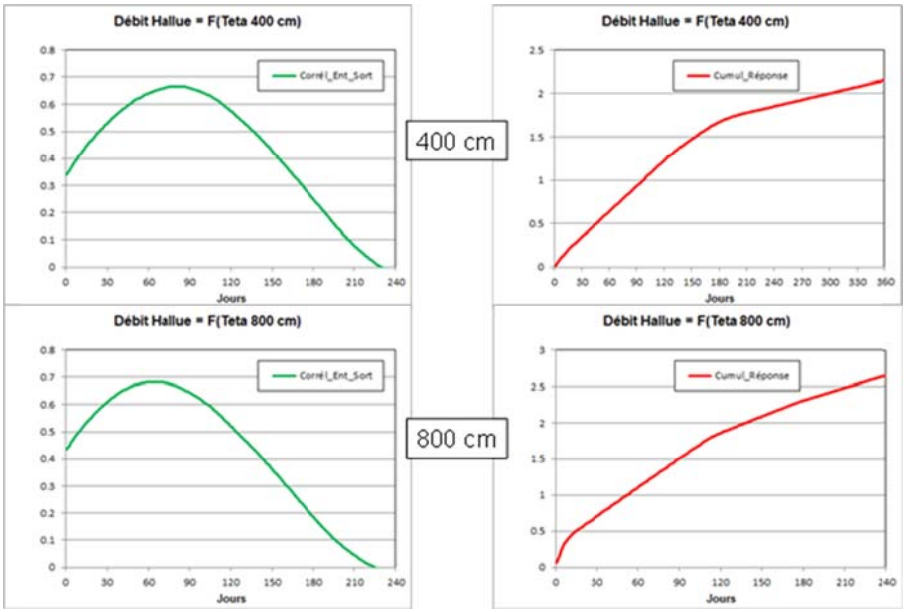


Figure 33 : Réactions aux variations de teneur en eau à 4 m et à 8 m de profondeur. À gauche : corrélations croisées ; à droite réponse cumulée.

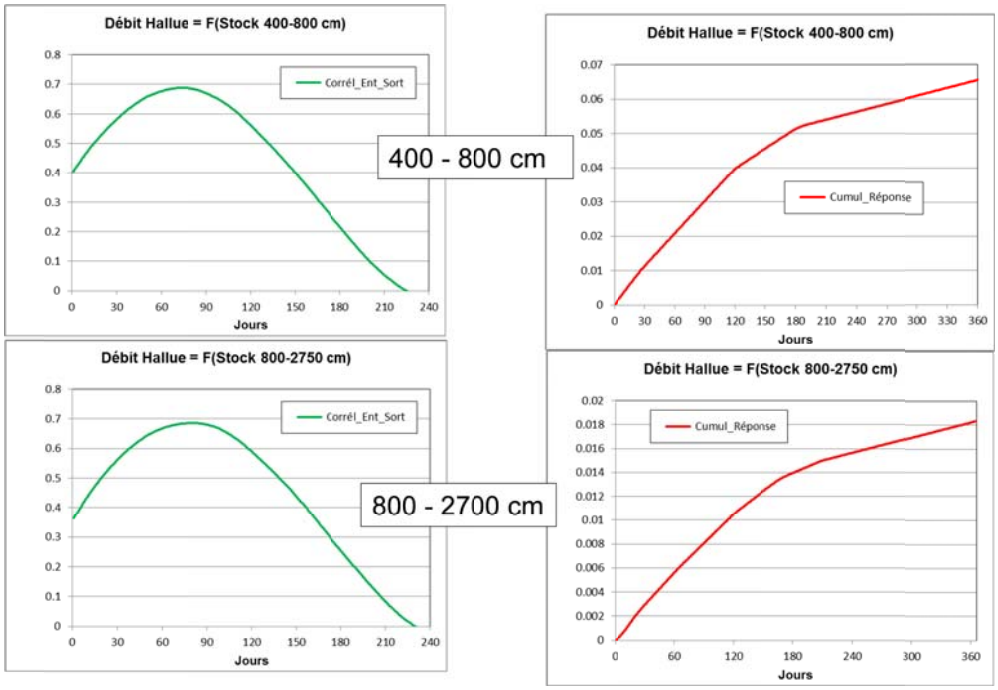


Figure 34 : Réactions aux variations de stock en eau de 4 à 8 m et de 8 à 27 m de profondeur. À gauche : corrélations croisées ; à droite réponse cumulée.

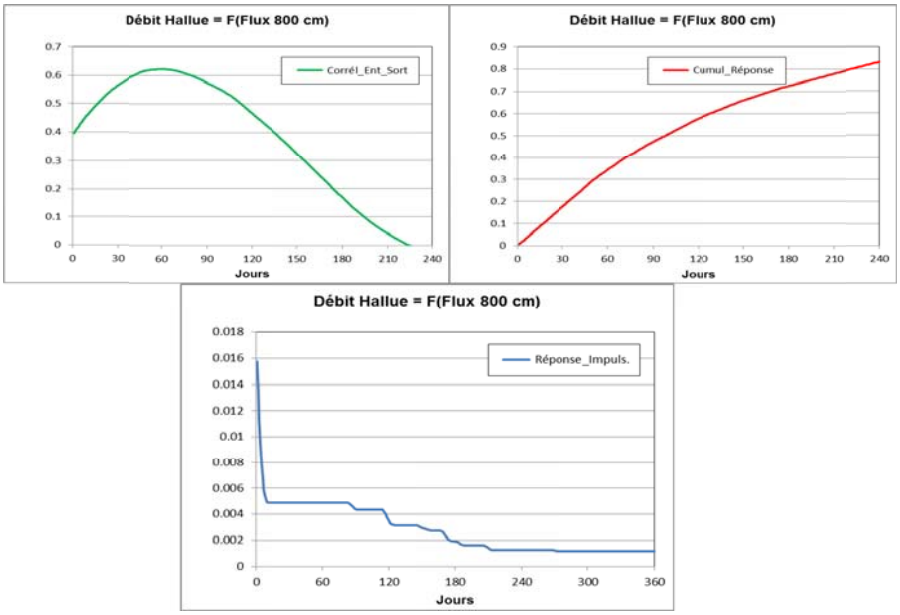


Figure 35 : Réactions aux variations de Flux de percolation à 8 m de profondeur. À gauche : corrélations croisées ; à droite réponse cumulée ; en bas : réponse impulsionnelle. On note une réponse rapide au début puis beaucoup plus lente.

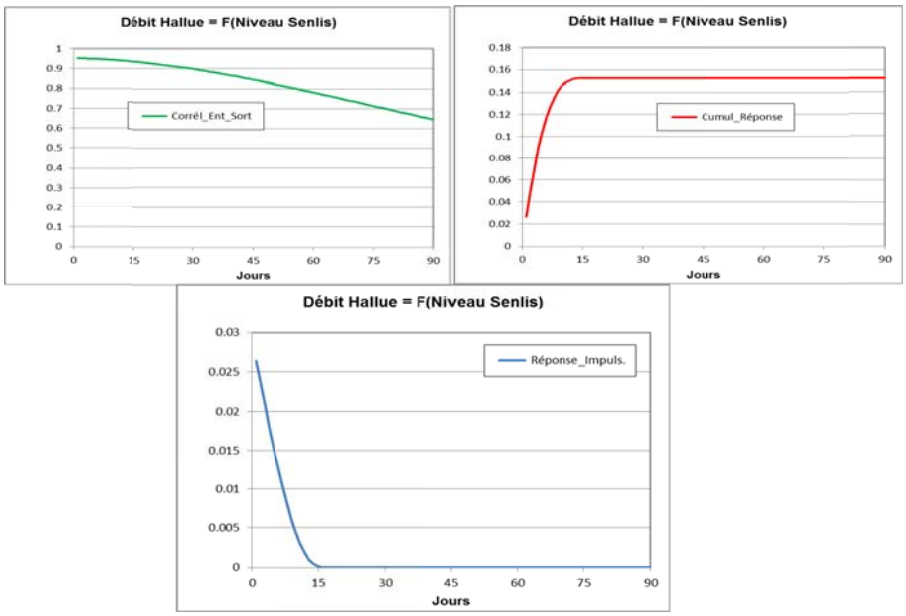


Figure 36 : Réactions aux variations de niveaux piézométrique à Senlis-le-Sec. À gauche : corrélations croisées ; à droite réponse cumulée ; en bas : réponse impulsionnelle. Réaction rapide de durée ne dépassant pas 15 jours.

5.4. MODÉLISATION DU DÉBIT À BAVELINCOURT PAR GARDÉNIA AVEC 2 ENTREES : LA PLUIE + UN ÉTAT DANS LA ZNS

Modélisation GARDÉNIA Pluie-Débit avec intégration additionnelle d'une série temporelle d'un état de la ZNS (Teneur en eau, Stock en eau, Flux de Percolation). On utilise les variables les plus pertinentes identifiées par la « déconvolution » : Figures 37 à 44.

- Ajout de la Teneur en eau à 800 cm
- Ajout du stock en eau dans la tranche 400-800 cm
- Ajout du flux de percolation calculé à 8 m de profondeur
- Ajout du niveau Observé Senlis-le-Sec
- Ajout du flux de percolation à 800 cm 30 jours auparavant.

De l'analyse de ces simulations, il apparaît que l'ajout de chacune de ces variables apporte à peu près la même amélioration d'environ 20 %.

L'apport du flux de percolation calculé à partir des données disponibles 30 jours auparavant est intéressant car il est ainsi possible d'anticiper les débits.

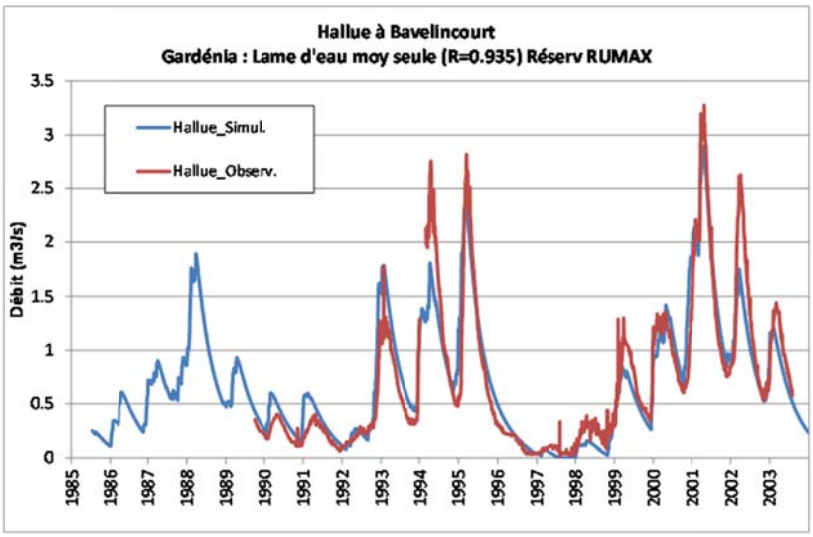


Figure 37 : Modélisation de référence 1985-2003 : Entrée unique = Pluie = Lame d'eau moyenne. Corrélation : R = 0.935 ; écart-quadratique = 0.237 m^3/s

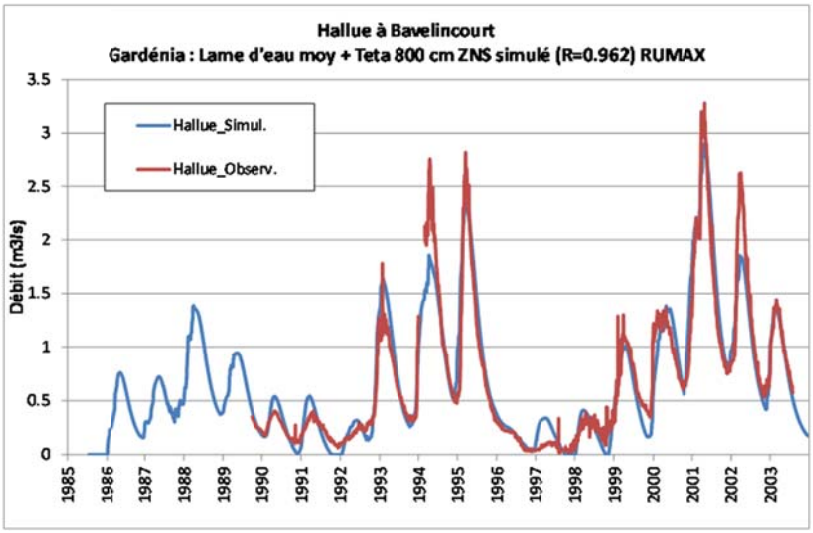


Figure 38 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Teneur en eau à 800 cm. Corrélation (Racine de Nash) = 0.962. Amélioration : de 0.935 à 0.962. Écart-quadratique = 0.182 m3/s => Gain 23%

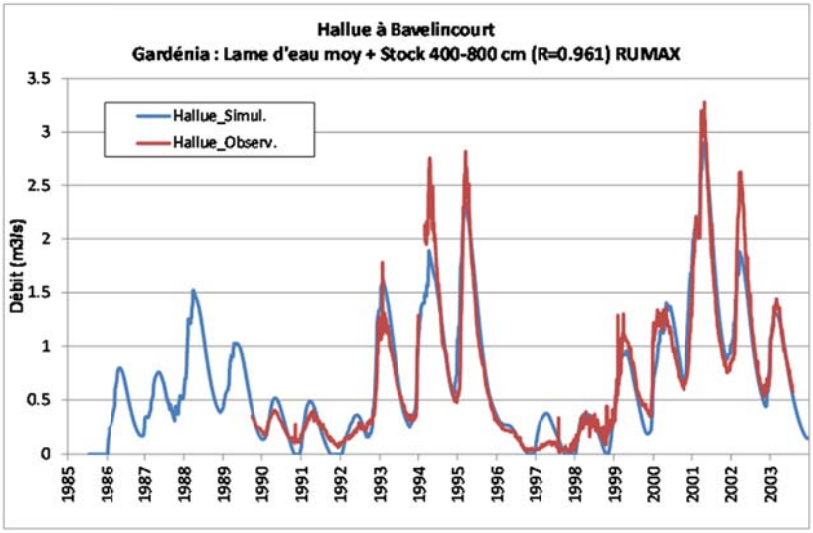


Figure 39 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Stock en eau dans la tranche 400-800 cm. Corrélation (Racine de Nash) = 0.961 Amélioration : de 0.935 à 0.961. Écart-quadratique = 0.186 m^3/s => Gain 22%

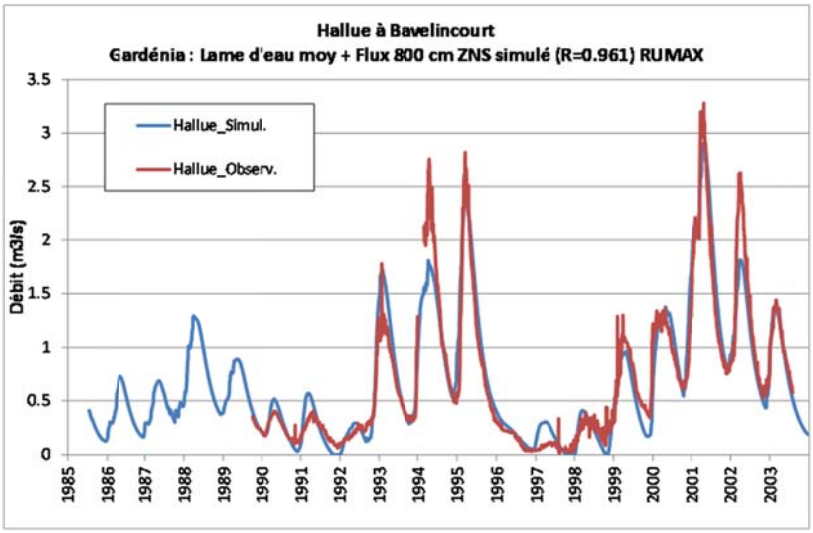


Figure 40 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Flux de percolation calculé à 8 m de profondeur. Corrélation (Racine de Nash) = 0.961. Amélioration : de 0.935 à 0.961. Écart-quadratique = 0.185 m^3/s => Gain 22%

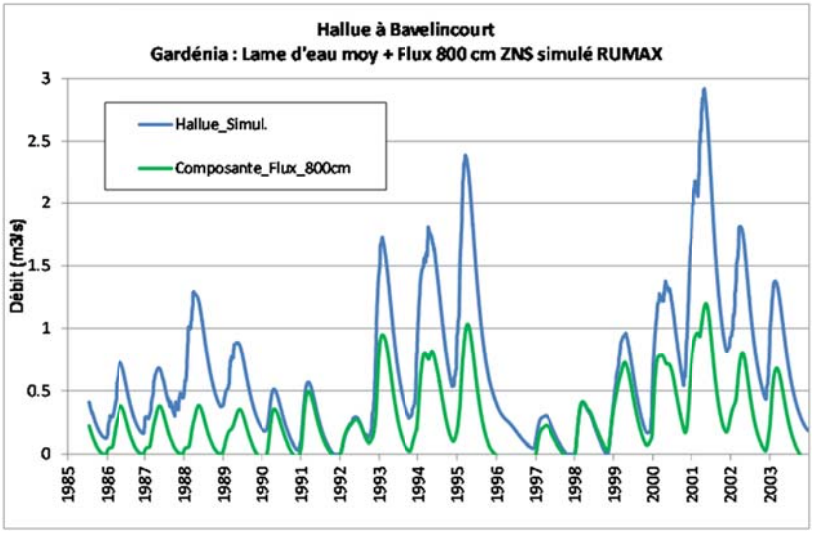


Figure 41 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Flux calculé à 800 cm. Visualisation, en vert, de l'influence (à travers GARDÉNIA) du flux de percolation à 800 cm.

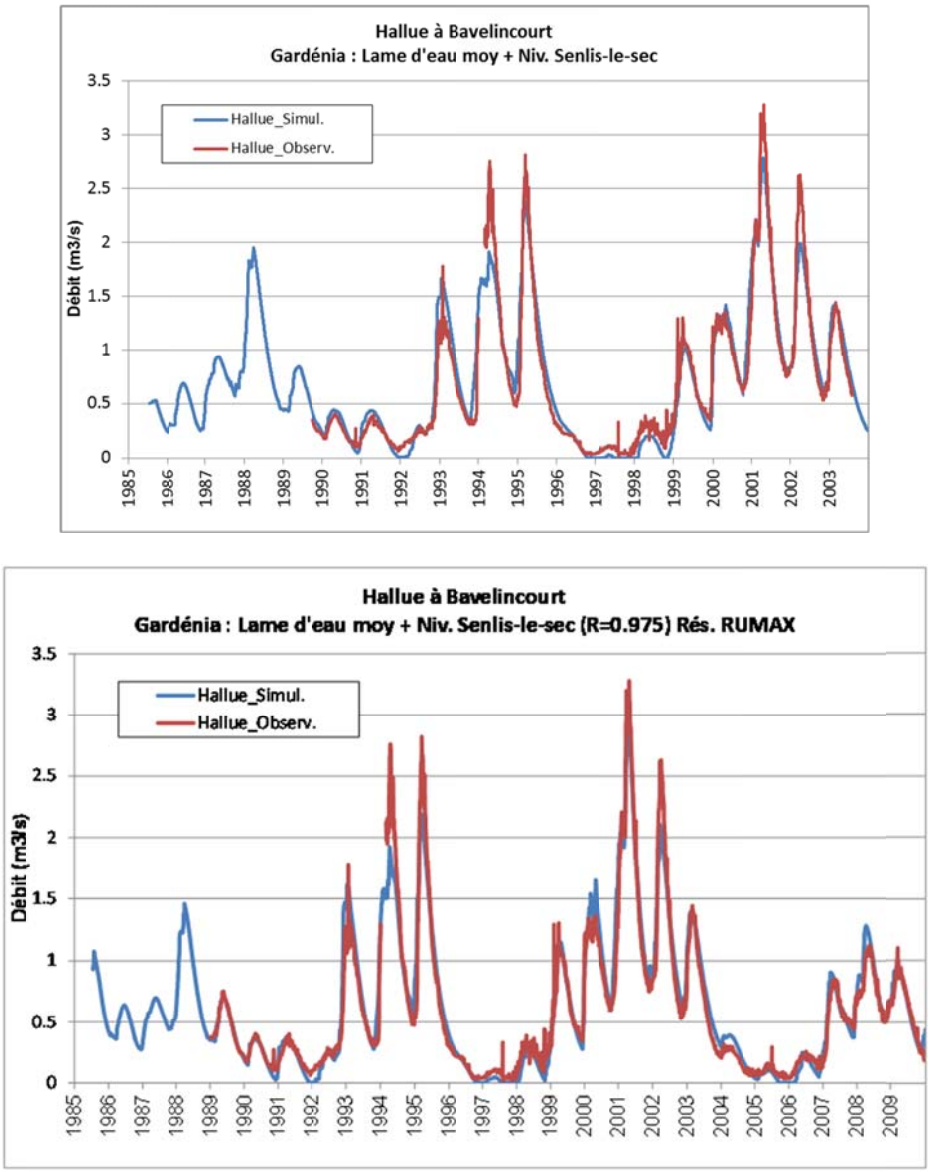


Figure 42 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Niveau Observé Senlis-le-Sec. Corrélation (Racine de Nash) = 0.969. => Amélioration : de 0.935 à 0.969. En bas, période 1985-2009. La simulation avec prise en compte du niveau piézométrique à Senlis-le-Sec permet une bonne simulation mais … peu de possibilité d'anticipation.

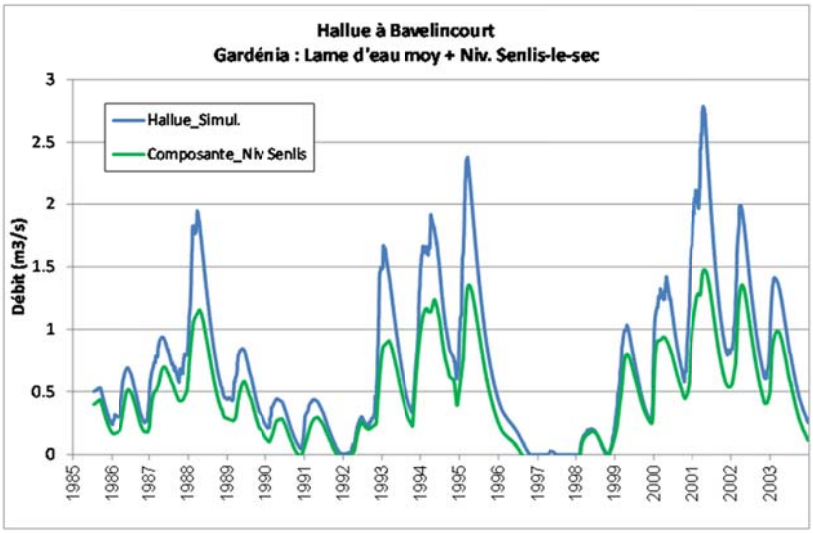


Figure 43 : Modélisation 1985-2003 : Entrée double = Pluie + Niveau Observé Senlis-le-Sec. Visualisation, en vert, de l'influence (à travers GARDÉNIA) du niveau piézométrique à Senlis.

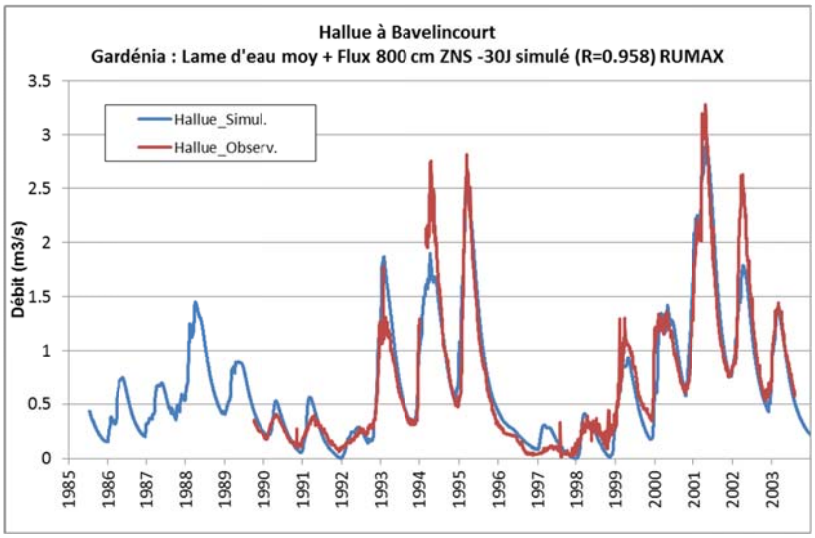


Figure 44 : Simulation avec prise en compte du flux de percolation à 800 cm 30 jours auparavant. Corrélation : R = 0.958 ; écart-quadratique = 0.193 m3/s => Gain 19%

5.5. CONCLUSION DE LA MODÉLISATION DU DÉBIT À BAVELINCOURT PAR GARDÉNIA AVEC 2 ENTRÉES

Nous avons montré que la modélisation GARDÉNIA Pluie-Débit avec intégration additionnelle d'une série temporelle d'un état de la ZNS (Teneur en eau, Stock en eau,

Flux de Percolation, Niveau piézométrique) permet une simulation largement améliorée.

L'utilisation d'états dans la zone non saturée calculés avec les données disponible 15 ou 30 jours auparavant est particulièrement intéressante car elle permet une anticipation opérationnelle.

L'exploitation des données suivies dans la ZNS jusqu'à la période mi-2011 permettra de disposer de séries considérablement plus longues. Il sera ainsi possible de conforter le calage des paramètres de modélisation. Les résultats pourront alors être étendus spatialement dans le bassin de l'Hallue.

6. Modélisation distribuée avec prise en compte de l'écoulement dans la zone non saturée

L'écoulement de l'eau à travers la zone non saturée de la craie fracturée se fait suivant deux mécanismes : à travers la matrice de la craie et/ou à travers les fractures (Amraoui et al., 2008 ; Ireson et al., 2006, Harias et al., 2003). La prédominance d'un processus par rapport à l'autre dépend d'une part des conditions de pression et de teneur en eau dans la ZNS, et d'autre part de l'intensité des précipitations. En période de hautes eaux, le temps de transfert de l'eau à travers la ZNS de la craie fracturée dépendra donc du mécanisme d'écoulement qui sera mis en jeu.

Pour mieux comprendre le rôle de la zone non saturée dans les crues de la Somme et pour enrichir le schéma conceptuel du fonctionnement du bassin crayeux en période de crue, des modélisations ont été réalisées à deux échelles : échelle locale (site de Warloy-Baillon) et échelle du bassin versant de l'Hallue. Deux types de modélisations ont été entrepris :

- Une modélisation 1D dans une colonne de craie non saturée avec prise en compte des deux mécanismes d'écoulement dans la zone non saturée de la craie. Parmi les objectifs de cette modélisation, le calcul des flux à la base de la zone non saturée, qui correspond aux flux de recharge de la nappe.

- Une modélisation distribuée à l'échelle du bassin versant de l'Hallue pour simuler les niveaux de la nappe et le débit dans l'Hallue en prenant en compte les flux de recharge issus du modèle 1D.

Dans ce rapport, seule la modélisation à l'échelle du bassin de l'Hallue est présentée.

6.1. MODÉLISATION À L'ÉCHELLE DU BASSIN DE L'HALLUE.

6.1.1. Localisation et description du bassin

Le bassin de l'Hallue se situe à une quinzaine de km au nord-est d'Amiens (cf. fig.45). Il a une superficie de 219 km² dont 56 % de plateaux et 34% de vallées ; l'altitude moyenne dans ce bassin est de 96 m avec un maximum de 160 m et un minimum de 27 m dans la vallée humide. La rivière Hallue prend sa source à Vadencourt. La longueur du cours d'eau est de 15 km environ, avec une pente moyenne de 2,4 m/km. Sa confluence avec la Somme se fait à Daours.

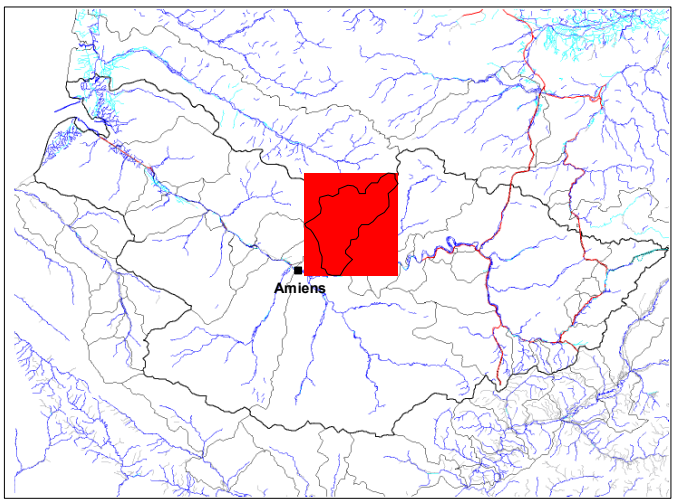


Figure 45 : Localisation du sous-bassin de l'Hallue

6.1.2. Rappel sur le modèle hydrodynamique du bassin de l'Hallue

Une première version du modèle hydrodynamique du bassin de l'Hallue a été développée dans le cadre du programme INTERREG III A, Flood-1 franco-britannique qui s'est terminé en juin 2008. Ce projet a été cofinancé par le FEDER et, pour le côté français, la DIREN Picardie, le Conseil Régional de Picardie et le Conseil Général de la Somme.

Le modèle hydrodynamique de l'Hallue est basé sur le modèle géologique détaillé du bassin de l'Hallue (rapport BRGM/RP-56422-FR) réalisé en partenariat avec l'université de Brighton dans le cadre du projet Flood-1. Un bref descriptif du modèle géologique est donné en annexe 1.

a) Caractéristiques du modèle hydrodynamique du bassin de l'Hallue

Le modèle hydrodynamique de la nappe de la craie du bassin de l'Hallue est un modèle bicouche avec, de la base au sommet :

- La couche inférieure de la craie grise (LESK) ;
- La couche supérieure, délimitée verticalement par le toit du LESK et la topographie et intégrant les trois niveaux de la craie blanche à silex ainsi que le quaternaire et les alluvions dans leur zone de présence.

La figure 46 montre des coupes Nord-Sud et Est-Ouest du modèle.

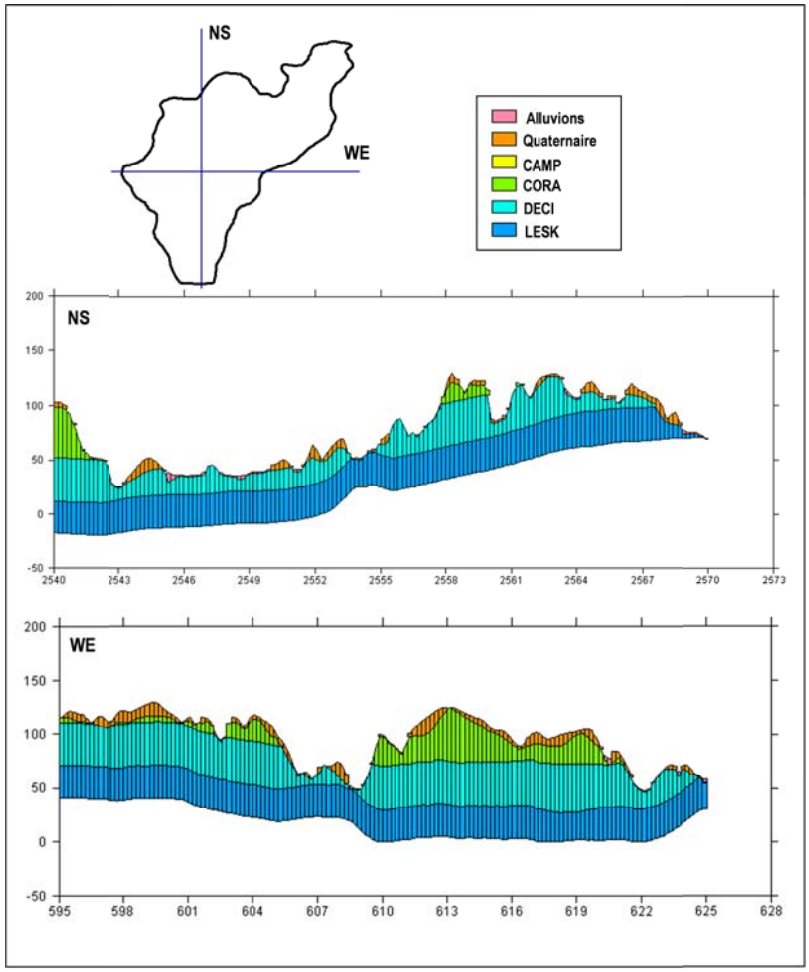


Figure 46 : Coupes NS et WE du modèle bicouche du bassin de l'Hallue.

Ce modèle a été construit avec le logiciel Marthe du BRGM (Thiéry 1990, 2004 et 2006). Il prend en compte l'écoulement dans la nappe et dans le cours d'eau, et les interactions entre ces deux systèmes. Il a été calibré sur la période 1989-2006. Les détails sur ce modèle et les résultats obtenus sont décrits dans le rapport BRGM/RP-51827-FR.

Cette version du modèle n'inclut pas le comportement à double porosité/double perméabilité de la zone non saturée de la craie. En effet, la recharge de la nappe ainsi que le ruissellement sont calculés à l'aide du modèle Gardénia qui utilise une approche classique basée sur la pluie, l'ETR, la réserve utile du sol et un temps de percolation.

L'analyse des premiers résultats obtenus par le modèle affiné du bassin de l'Hallue montrent que, dans cette configuration classique d'écoulement, le modèle ne permet pas de reproduire de manière satisfaisante les fluctuations rapides de la nappe observées. D'où la nécessité d'y intégrer les processus d'écoulement dans la zone non saturée (double porosité/double perméabilité) à l'échelle du bassin, ce qui devrait

améliorer notablement la modélisation des phénomènes de remontée rapide de nappe observés.

6.1.3. Prise en compte des écoulements à travers la zone non saturée de la craie fracturée dans le modèle de l'Hallue

La démarche suivie consiste à utiliser les flux calculés à la base des colonnes de craie fracturée non saturée issus de la modélisation 1D qui prend en compte les processus d'écoulements complexes dans ce milieu. Ces flux de recharge calculés à différentes profondeurs sont intégrés dans le modèle de nappe du bassin de l'Hallue à différents pas de temps de calcul. La figure 47 montre le schéma du principe.

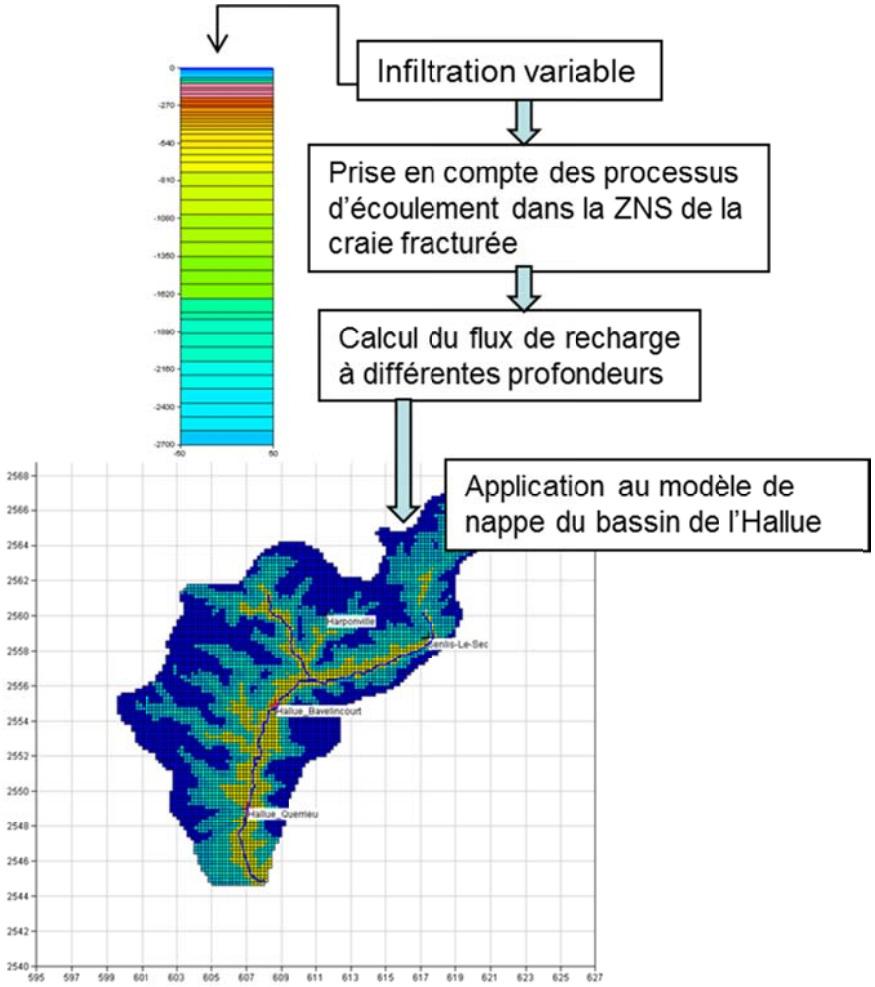


Figure 47 : Schéma décrivant la prise en compte dans le modèle de l'Hallue de l'écoulement à travers la zone non saturée de la craie.

a) *Hypothèse de travail*

- La craie non saturée est assez homogène dans le bassin de l'Hallue et peut être représentée par les lois d'écoulement dans la zone non saturée (relations teneur en eau–succion et perméabilité–succion) établies pour le site de Warloy-Baillon ;
- Pas de variabilité spatiale des flux de recharge, la seule variabilité des flux se faisant en fonction de la profondeur de la ZNS ;
- Le ruissèlement n'est pas pris en compte.

b) *Flux d'infiltration calculés à la base de la zone non saturée*

Les simulations faites sur les colonnes de craie non saturée au droit du site de Warloy-Baillon avec prise en compte de la double porosité et de la double perméabilité de la craie non saturée ont permis de calculer les flux de recharge de la nappe à 4 profondeurs de la zone non saturée (8 m ; 12 m ; 21 m et 27 m). Les flux sont calculés sur une longue période (1988-2011) couvrant les évènements de crue de 1995 et de 2001. Les figures 48 et 49 montrent l'évolution de ces flux à 4 profondeurs et un zoom sur la l'année 2001.

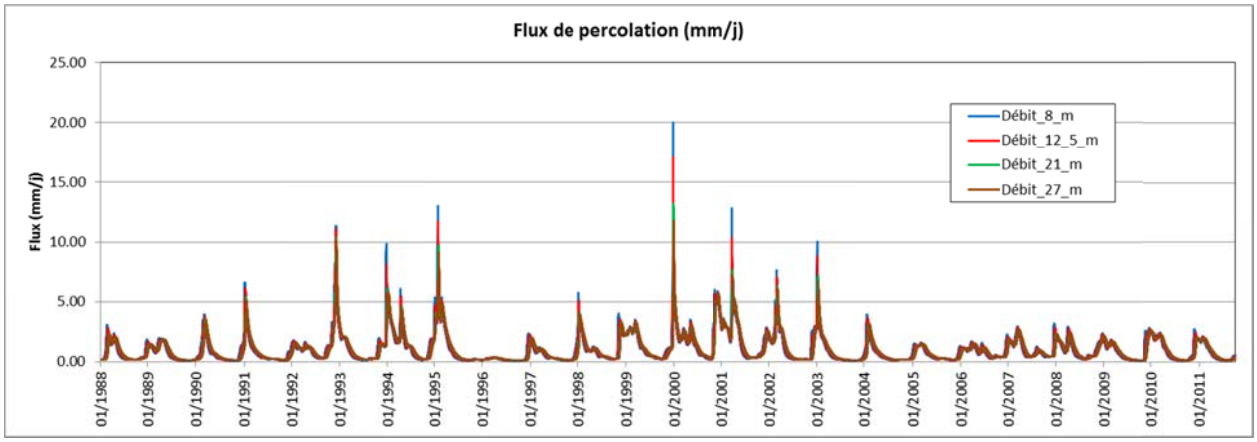


Figure 48 : Flux de percolation calculé à la base de la colonne de craie non saturée à différentes profondeurs.

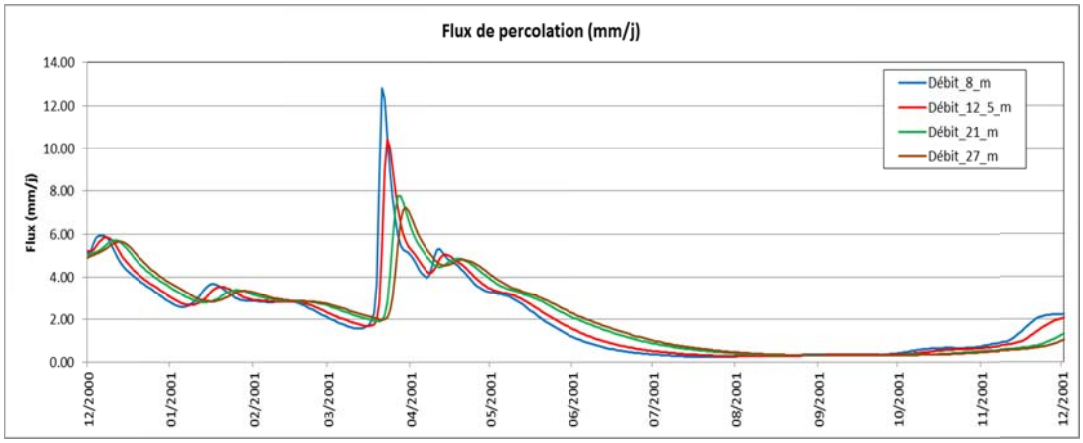


Figure 49 : Zoom sur l'année 2001.

c) *Application des flux au modèle de nappe de l'Hallue*

Les flux de recharge sont appliqués au modèle de l'Hallue par tranche d'épaisseur de la zone non saturée. Cette épaisseur a été calculée à partir de la cote topographique et du niveau moyen de la nappe. Quatre classes d'épaisseur ont été définies (figure 50). Le flux à 8 m est appliqué à la classe d'épaisseur (0-9 m) ; le flux à 12 m à la classe d'épaisseur (9 m – 16 m) ; le flux à 21 m est appliqué à la classe d'épaisseur (16 m – 25 m) et le flux à 27 m est appliqué à la classe d'épaisseur (26 m – 90 m).

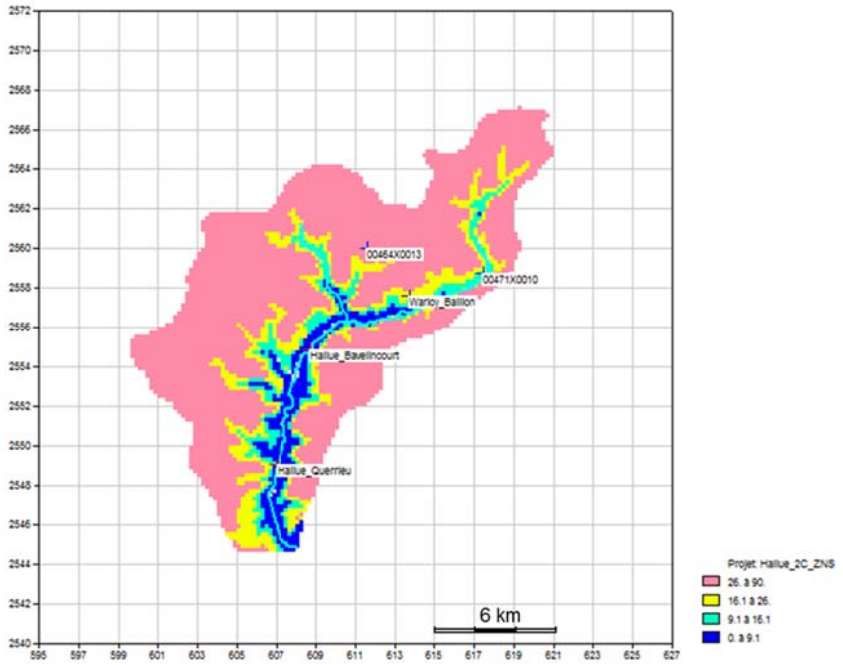


Figure 50 : Classes des épaisseurs de la zone non saturée et localisation des piézomètres et des stations hydrométriques présents sur le bassin.

d) *Analyse des flux de recharge et simulations réalisées*

Au droit du site de Warloy-Baillon, le ruissellement superficiel est très faible car la craie est sub-affleurante (l'épaisseur du sol est d'environ 0.7m). Dans la simulation en colonne 1D sur le site, il est considéré que l'eau s'infiltre verticalement à travers la zone non saturée de la craie et que le ruissellement hypodermique est négligeable. Par conséquent, dans le modèle de l'Hallue et surtout dans les zones à forte pente ou sur les plateaux où l'épaisseur des limons peut atteindre 10 m, les flux appliqués au modèle sont probablement surestimés. À cela s'ajoute le fait que les précipitations sont plus importantes au nord du bassin qu'au sud.

Les premières simulations réalisées en appliquant directement à l'ensemble du bassin les flux à la base de la zone non saturée calculés par le modèle 1D fournissent un débit à Bavelincourt nettement supérieur à celui observé. Toutes ces considérations nous ont conduits à appliquer un coefficient sur le flux de recharge. Les meilleurs résultats sont obtenus en appliquant un coefficient de 0.6 sur les valeurs des flux.

Les simulations ont été réalisées sans recalage des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (perméabilité et coefficient d'emmagasinement) sur la période 1989 – 2006avec un pas de temps journalier. Les niveaux de la nappe à Senlis-le-Sec et à Harponville, ainsi que le débit à Bavelincourt, sont calculés et comparés aux données d'observation sur cette période.

6.1.4. Résultats

Les niveaux de nappe calculés au droit des piézomètres de Senlis-le-Sec et d'Harponville ont été comparés, d'une part aux données mesurées dans ces piézomètres, et d'autre part aux résultats fournis par le modèle de l'Hallue qui ne prend pas en compte l'écoulement dans la zone non saturée dans le calcul de la recharge. Les résultats montrent que les fluctuations de niveau de nappe sont nettement mieux reproduites en prenant en compte l'écoulement dans la zone non saturée (figures 51 et 52). Les montées rapides du niveau de la nappe observées pendant la crue de 1995 et celle de 2001 sont bien reproduites sans déphasage de la réaction de la nappe, ce qui confirme bien l'importance des écoulements rapides à travers les fractures, qui sont à l'origine des remontées rapides de la nappe.

Concernant le débit de l'Hallue à Bavelincourt, là encore, en période de crue, les montées rapides du débit de l'Hallue simulées par le modèle avec prise en compte de la zone non saturée sont parfaitement en phase avec celles qui sont observées (figure 53). Les amplitudes sont moins bien simulées du fait que le modèle ne prend pas en compte le ruissellement hypodermique.

Bien qu'elle soit simplifiée, cette approche avec prise en compte des écoulements à travers la zone non saturée permet de mieux reproduire les montées rapides du niveau de la nappe et du cours d'eau et de rendre compte des processus complexes pouvant se produire dans la zone non saturée de la craie, notamment en période de très hautes eaux. Elle montre l'importance de la prise en compte des écoulements rapides dans la craie fracturée en période de crue.

Il est important de noter qu'à l'heure actuelle l'écoulement de l'eau à travers la zone non saturée de la craie fracturée reste encore mal connu, notamment dans le contexte de crues par remontées de nappe. Les données acquises dans la zone non saturée depuis 2005 nous ont permis de mieux comprendre les mécanismes d'écoulement dans ces milieux qui sont mis en jeu lors des remontées rapides du niveau de la nappe. Il est important de poursuivre l'effort sur l'acquisition des données pour disposer de chroniques de longue durée, aussi bien pour consolider les connaissances que pour alimenter les modèles et valider les développements sur ces aspects.

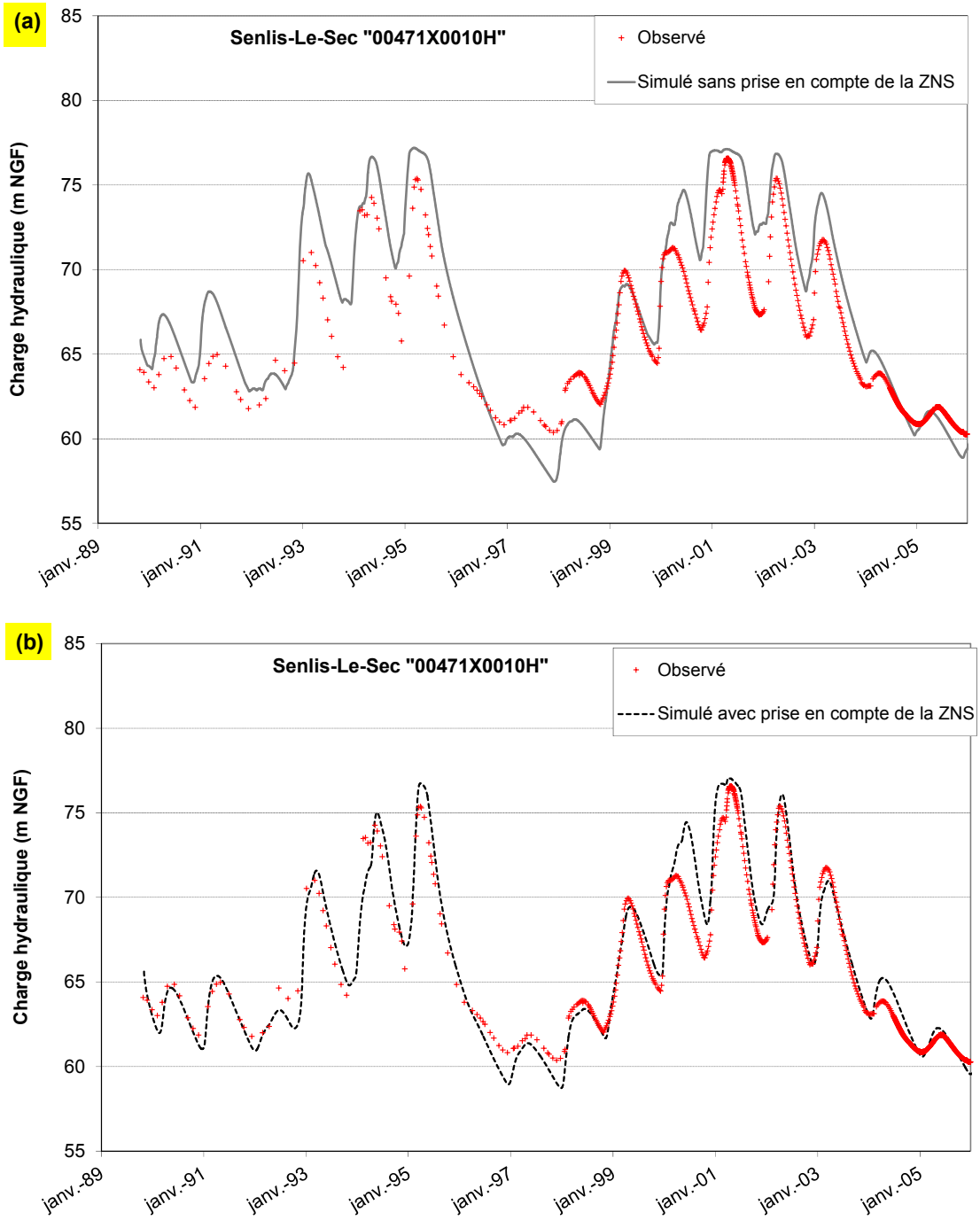


Figure 51 : Simulation du niveau de la nappe à Senlis-le–Sec, avec (b) et sans (a) prise en compte de l'écoulement à travers la zone non saturée dans le calcul de la recharge.

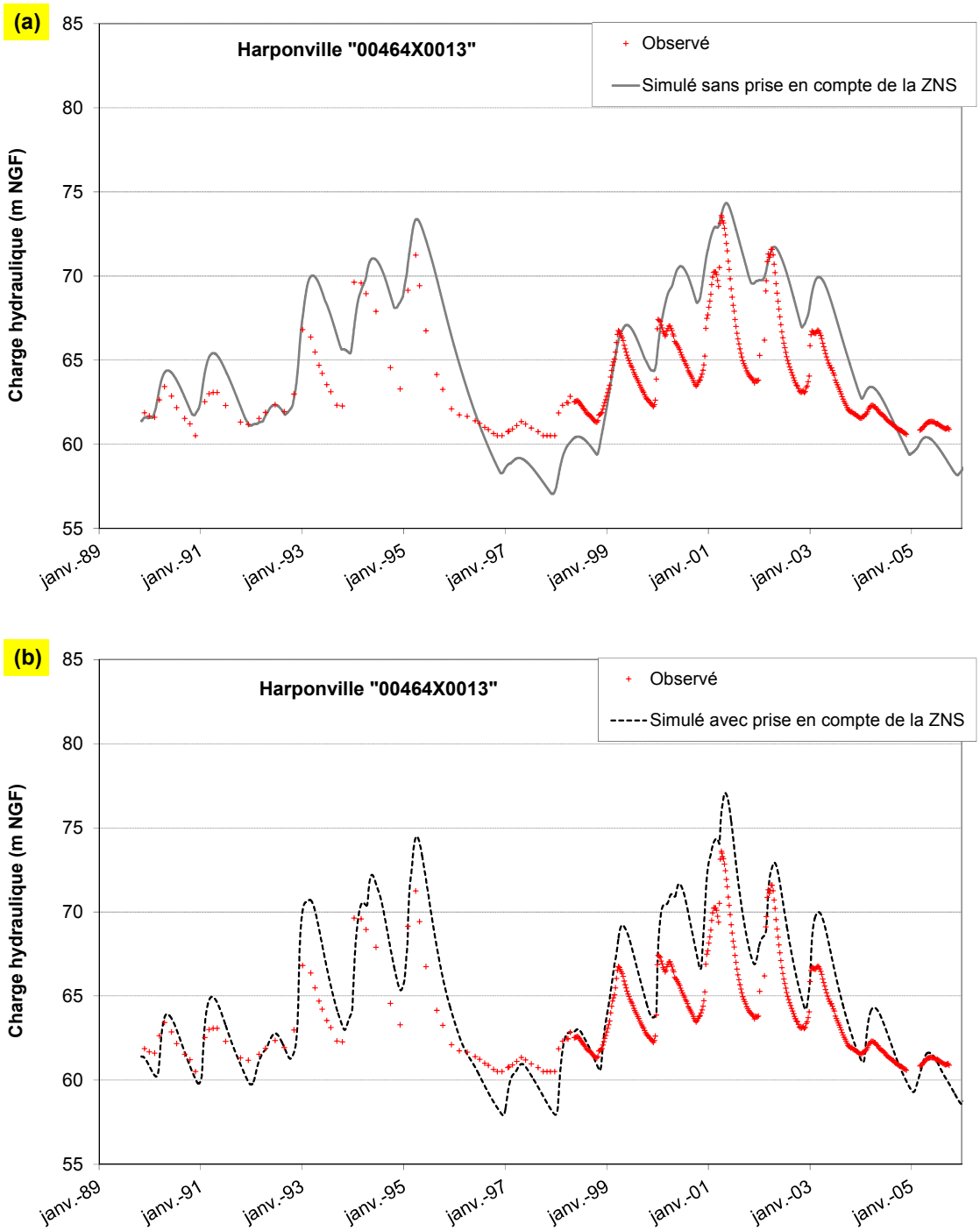


Figure 52 : Simulation du niveau de la nappe à Harponville, avec (b) et sans (a) prise en compte de l'écoulement à travers la zone non saturée dans le calcul de la recharge.

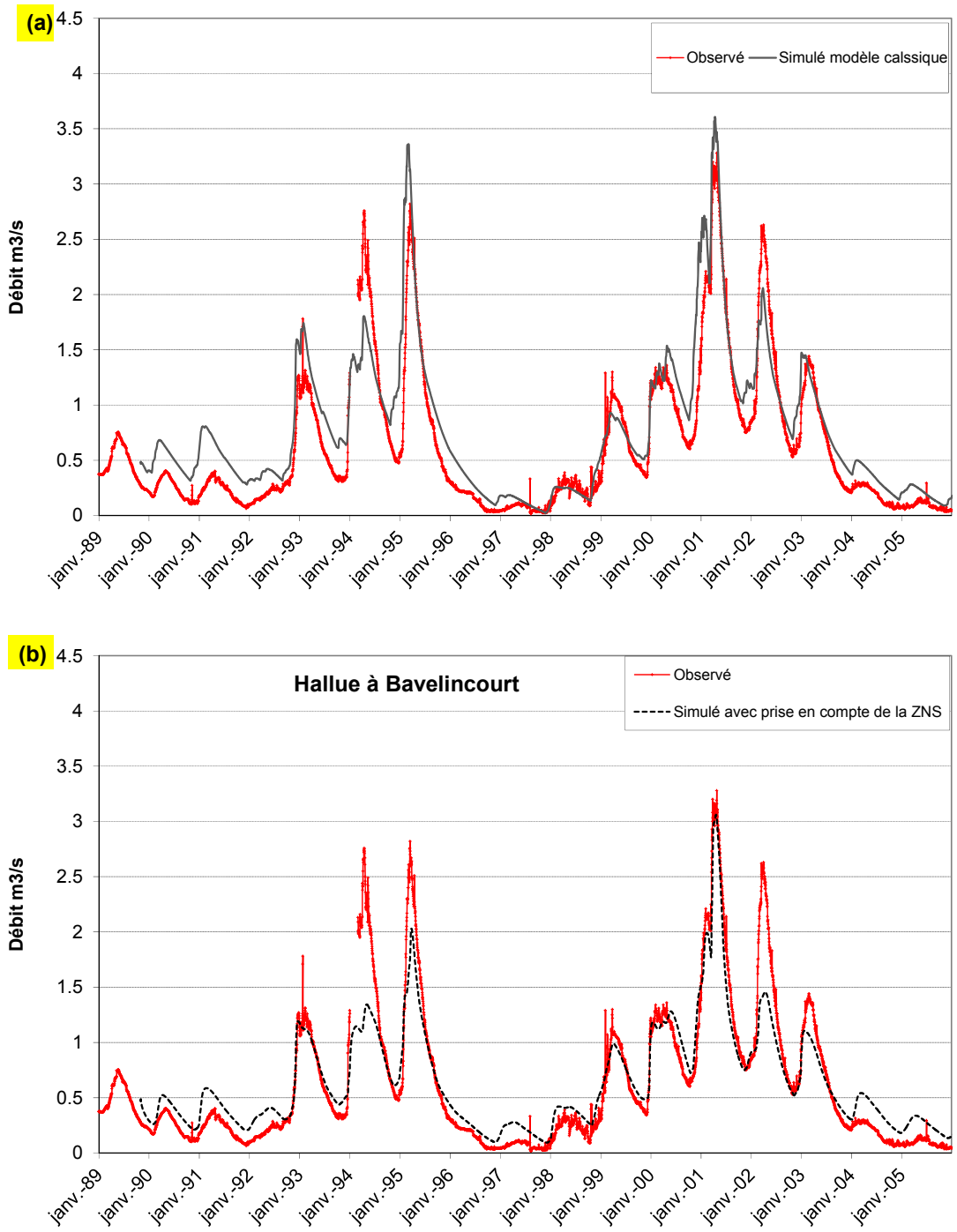


Figure 53 : Simulation du débit de l'Hallue à Bavelincourt, avec (b) et sans (a) prise en compte de l'écoulement à travers la zone non saturée dans le calcul de la recharge.

7. Conclusions

La présente étude sur les remontées rapides du niveau de la nappe de la craie et l'apport du suivi de la zone non saturée pour l'amélioration de la prévision des crues montrent que le phénomène de remontée piézométrique rapide n'est pas spécifique à un secteur donné du bassin de la Somme ni aux années de fortes inondations. Ce phénomène s'accentue cependant de façon importante en année très humide et peut générer des crues en cas de succession d'années humides (crues de 1995 et de 2001, par exemple).

Dans le bassin de l'Hallue, bien que l'analyse de l'impact du comportement de la zone non saturée sur les montées rapides du niveau de la nappe et du débit du cours d'eau, avecmodélisation associées, soit basée sur des chroniques de courte durée (, elle permet d'avancer sur l'apport du suivi de la zone non saturée à l'amélioration de la prévision des crues.

En effet,l'analyse conjointe des chroniques de succion (pression négative de l'eau) dans la zone non saturée de la craie, de la pluie, du niveau de la nappe et du débit de l'Hallue à Bavelincourt permet de montrer que :

- Les mesures de la pression négative de l'eau dans la zone non saturée à des profondeurs de 1.5 et 4 m peuvent être utilisées comme indicateur pour anticiper de quelques jours l'augmentation rapide du niveau de la nappe et du débit de l'Hallue à Bavelincourt.

- Les vitesses de remontée du niveau de la nappe sont maximales quand le seuil de pression de -5 kPa est atteint sur toute la profondeur de la zone non saturée et que les précipitations hivernales excédent 100 mm/mois.

Les modélisations GARDÉNIA Pluie-Débit avec intégration additionnelle d'une série temporelle d'un état de la ZNS (Teneur en eau, Stock en eau, Flux de Percolation, Niveau piézométrique) permettent une simulation largement améliorée. Par ailleurs, l'utilisation d'états de la zone non saturée calculés avec les données disponible 15 ou 30 jours auparavant est particulièrement intéressante car elle permet une anticipation opérationnelle.

La modélisation maillée du bassin de l'Hallue avec prise en compte des mécanismes d'écoulement dans la zone non saturée permet de démontrer l'importance de la prise en compte des écoulements rapides dans la craie fracturée en période de crue. En effet, par rapport aux résultats du même modèle obtenus à partir d'un calcul de recharge classique, on constate que :

- Les remontées rapides du niveau de la nappe observées pendant les crues de 1995 et 2001 sont nettement mieux reproduites, sans déphasage temporel de la réactivité de la nappe ;

- Les remontées rapides du débit de l'Hallue, calculées par le modèle maillé avec prise en compte de la zone non saturée, sont également parfaitement en phase avec celles qui sont observées ; les amplitudes sont cependant moins bien simulées parce que le modèle ne prend pas en compte le ruissellement superficiel et hypodermique.

Le suivi du site expérimental de Warloy-Baillon a été assuré en 2011 et a permis d'actualiser les données hydrogéologiques et climatiques. L'exploitation des données suivies dans la ZNS jusqu'en 2011 permettra de disposer de séries considérablement plus longues. Il sera ainsi possible de conforter le calage des paramètres de modélisation.

Le rôle de la zone non saturée dans les modalités de recharge des nappes dans les bassins crayeux relève encore du domaine de la recherche, notamment dans le contexte de crues par remontées de nappe. L'effort sur l'acquisition et l'analyse des données sur la ZNS doit être poursuivi, d'une part pour améliorer et consolider les connaissances sur les mécanismes d'écoulement dans ces milieux, et d'autre part pour alimenter les modèles et valider les concepts et les développements sur ces aspects.

8. Bibliographie

Amraoui, N., Machard de Gramont, H., Robelin, C., Wuilleumier, A., Noyer, M.L., Feret, M.J.,2008 - Flow process in the unsaturated Chalk of the Hallue Basin (France). First European conference on Unsaturated Soils, July 2008 Durham, UK

Amraoui N., Noyer M.L., Wuilleumier A., Chrétien P., Feret M.J. avec la collaboration de Bertrand L., Poinclou C. (2008) – Projet INTERREG IIII A FLOOD1 : Rôle des eaux souterraines dans le déclenchement des crues. Instrumentation et suivi du site expérimental de la Somme, caractérisation hydrodynamique de la craie. BRGM/RP – 56632-FR, 121p., 28 fig.,2 tabl.,5 ann.

Amraoui N., Golaz C., Mardhel V., Negrel P., Petit V., Pinault J.L., Pointet T. (2002) - Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. Rapport BRGM/RP-51827-FR, 184 p., 83 fig.,11 tabl., 5 ann..

Hamm V., Amraoui N., Thiéry D. (2008) - Projet INTERREG IIIA, FLOOD1 : Rôle des eaux souterraines dans le déclenchement des crues. Modélisation hydrogéologique du bassin de l'Hallue (Somme). Rapport BRGM/RP-57135-FR, 43 p., 16 fig., 1 tabl., 2 ann

Haria, A.H., Hodnett, M.G, Johnson, A.C., 2003. Mechanism of groundwater recharge and pesticide penetration to a Chalk aquifer in southern England.. J. Hydrol. 275, 122-137.

Ireson, A.M., Wheater, H.S, Butler, A.P., Mathias, S.A., Finch, J., Cooper, J.D., 2006. Hydrological processes in the Chalk unsaturated zone – Insights from an intensive field monitoring programme. J. Hydrol. 330, 29-43.

Mardhel V., Negrel P., Pointet T. (2001) – Première analyse des composantes des écoulements souterrains du bassin versant de la Somme en période de crues. Rapport BRGM/RP-51030-FR.

Pinault, J.L., Amraoui, N., Golaz, C. 2005. Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes. Water Resour. Res., 41, W05001, doi:10.1029/2004WR003169

Robelin C. (2008) – Projet INTERREG III A, FLOOD1. Rôle des eaux souterraines dans le déclenchement des crues : Rapport géologique du site de l'Hallue. BRGM/RP-56422-FR, 63 p., 25 fig., 1 tabl

Thiéry, D., Amraoui, N., Wuilleumier A., Chrétien, P., Noyer, M.L., 2008. Analysis and modelling of groundwater floods in fractured Chalk following extreme rainfall events. In Groundwater and Extreme Events - The Geological Society - London – 02/12/2008.

Thiéry, D. (1990) - Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.

Thiéry D. (2003) - Logiciel GARDÉNIA version 6.0 - Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-52832-FR.

Thiéry D. (2006) – Didacticiel du préprocesseur WinMarthe v4.0. Rapport BRGM/RP-54652-FR

Wellings, S.R., Bell, J.P., 1980. Movement of water and nitrate in the unsaturated zone Upper Chalk near Winchester, Hants. England. J. Hydrol. 48, 119-136.

Wellings, S.R., 1984. Recharge of the upper Chalk aquifer at a site in Hamshire England, 1. Water balance and unsaturated flow. J. Hydrol. 69, 259-273.

Annexe 1

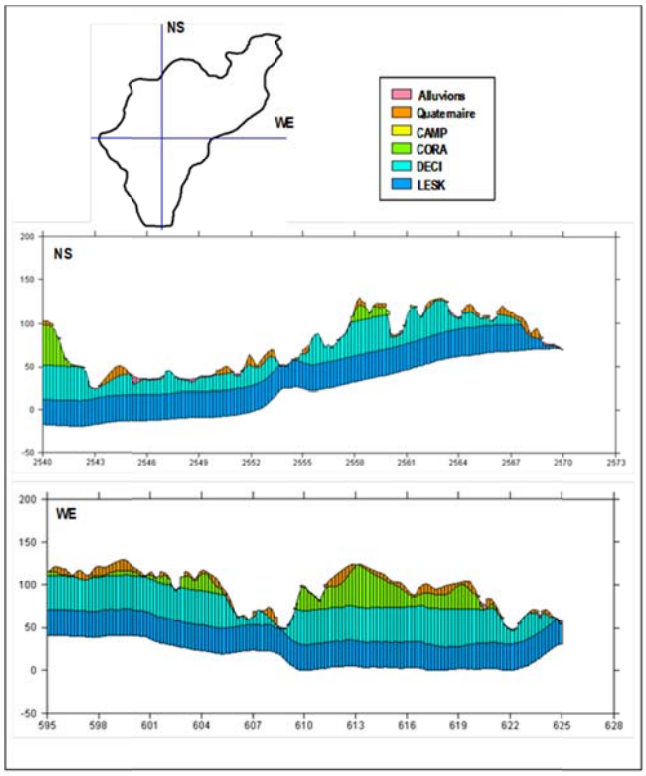
Éléments sur le modèle géologique du bassin de l'Hallue

a)Modèle géologique du bassin de l'Hallue

Le modèle géologique détaillé du bassin de l'Hallue (rapport BRGM/RP-56422-FR) a été développé avec le logiciel Multilayer du BRGM et comporte 6 couches dont l'extension et l'importance sont très variables comme le montre la figure 36. Il s'agit du haut en bas de :

1- Les alluvions
2- Les formations quaternaires,
3- La craie blanche à silex du Campanien (CAMP);
4- la craie blanche à silex du Santonien (CORA);
5- la craie blanche à silex du Coniacien (DECI) ;
6- et la craie grise (Lesk).

La figure 36 présente deux plans de coupe dans le bassin de l'Hallue dans les directions NS et WE. Elle permet de visualiser notamment la présence prépondérante des formations de la craie grise (LESK) et de la craie blanche à silex coniacienne (DECI).



Coupes NS et WE du modèle géologique à 6 couches.

.

Centre scientifique et technique
Service EAU
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34