
La dynamique de l'ensemble multicouche Craie karstifiée/remplissage alluvionnaire dans le bassin intra-estuarien de la Seine

**Nicolas Massei, Jean-Paul Dupont, Abderrahim Jardani,
Matthieu Fournier et Julie Raux**

Université de Rouen, UMR 6143 M2C, 76821 Mont-Saint-Aignan, France

nicolas.massei@univ-rouen.fr ; jean-paul.dupont@univ-rouen.fr ; abderrahim.jardani@univ-rouen.fr ;

matthieu.fournier@univ-rouen.fr ; julie.raux@etu.univ-rouen.fr

I. INTRODUCTION

En vallée de la Seine aval, le lien entre le remplissage alluvionnaire et la nappe de la Craie s'écoulant vers l'estuaire de Seine ne reste que partiellement compris, soumis à la fois à l'apport de la nappe de la Craie et au contrôle mégatidal de l'estuaire. Le comportement hydrodynamique du remplissage alluvionnaire de la Seine, quasiment inutilisé pour l'adduction d'eau potable, reste une problématique régionale n'ayant suscité que peu d'intérêt jusqu'alors. Toutefois, les études antérieures ayant porté sur les systèmes karstiques affluant à la Seine en plaine alluviale [1,2,5,6] ont montré que la Craie était probablement partiellement karstifiée sous le remplissage alluvionnaire de la Seine. L'hypothèse avait été évoquée du rôle prépondérant des formations grossières à la base du remplissage dans la transmission des ondes de pression liées aux variations tidales de la Seine. Dans le cadre du projet de prolongement du Grand Canal du Havre à Tancarville par le Grand Port Maritime du Havre (GPMH), une étude a été conduite en collaboration avec le GPMH portant sur l'analyse exploratoire de la variabilité piézométrique dans l'ensemble alluvionnaire couvrant la Craie. L'objectif affiché de cette étude est l'identification des différents facteurs hydrologiques contrôlant les variations piézométriques dans les alluvions de la Seine aval en zone estuarienne, et d'établir dans quelle mesure le fonctionnement hydrogéologique des alluvions est lié à celui de l'aquifère karstifié de la Craie. L'étude d'un champ de piézomètres implantés dans le remplissage est utilisé ici dans l'objectif de vérifier les hypothèses concernant le rôle des alluvions de la Seine dans les liens entre systèmes karstiques affluant à la Seine et fleuve soumis à l'influence tidale.

II. LES SYSTEMES KARSTIQUES DE BASSE-VALLEE DE SEINE (EXEMPLE DU SITE DU HANNETOT)

Le système karstique du Hannetot, le site de Norville, situé en bord de Seine à 70 km de Rouen, vers le Havre, est typique des hydrosystèmes karstiques de la Seine-aval (Fig.1a). Sa taille réduite et sa configuration géomorphologique le positionneraient comme un bassin élémentaire à l'échelle régionale. Ce système comprend i) un bassin versant superficiel de plateau d'environ 8 km², drainé par une perte (perte du Bébec) qui constitue le point majoritaire d'engouffrement des eaux de surface, ii) une source karstique en pied de plateau, dans la vallée de Seine, constituant l'exutoire principal de l'aquifère et en connexion hydraulique avec la perte du Bébec, iii) un forage en aval de la source, tubé dans les alluvions de la Seine et crépiné dans la Craie fissurée/karstique sous alluvions (Fig.1b).

La source, initialement utilisée comme captage AEP, a été remplacée par un forage en 1993 implanté dans le remplissage alluvionnaire environ 150m en aval hydraulique de la source, en raison de l'occurrence par trop fréquente de phénomènes turbides.

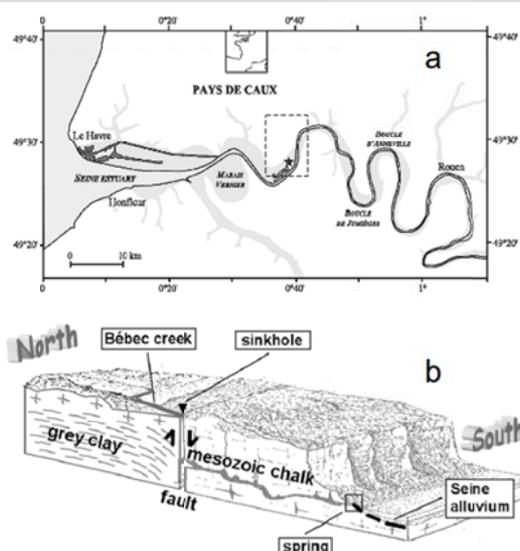


Figure 1 - Système karstique du Hannebot : localisation géographique (a) et schéma géomorphologique (b)

De précédents travaux ont montré que pour ce type de système, les variations de niveau d'eau à la source, située en pied de plateau en bordure de Seine, une influence tidale pouvait être détectée, quoique de faible amplitude [5]. En effet, à la source du Hannebot, une composante tidale est visible tant sur un spectre de Fourier (Fig.2a) que sur un diagramme temps-fréquence de transformée en ondelettes continue (Fig.2b).

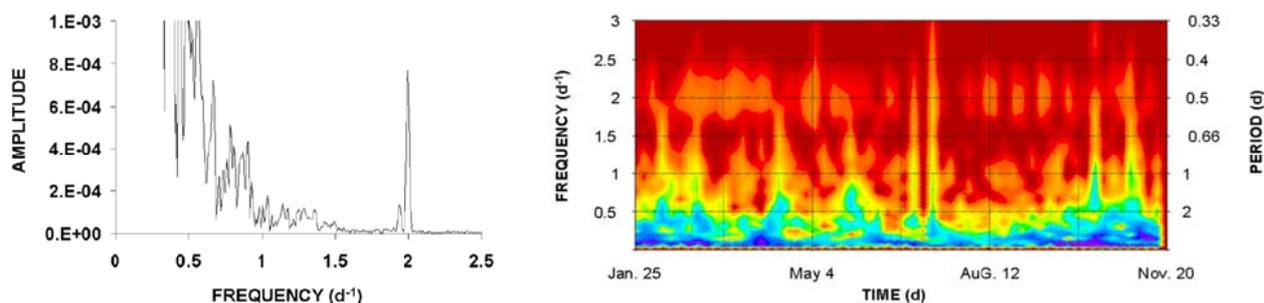


Figure 2 – a) Spectre de Fourier et b) spectre en ondelettes de la hauteur d'eau à la source du Hannebot

Sur le diagramme temps-fréquence en particulier, une composante de période 0.5j, illustrant le cycle tidal semi-diurne, apparaît nettement, dont l'amplitude varie suivant une périodicité d'environ 14j (i.e., l'énergie autour de la période 0.5j sur le diagramme semble distribuée de façon intermittente, avec des pics d'énergie atteignant un maximum tous les 14j).

Sur le même système, [1,2] et plus tard [3,4] ont montré que cette influence tidale affectait la qualité des eaux à la source en pied de plateau et au forage AEP en plaine alluviale en aval de la source, en agissant comme facteur limitant ou en favorisant l'amplitude du gradient hydraulique établi dans l'aquifère de la Craie depuis les plateaux vers la vallée de Seine. Les graves de fond des alluvions a priori très transmissives et situées quelques mètres au-dessus de la crépine du forage AEP, pourraient jouer un rôle important dans le transfert de l'onde de pression tidale depuis la Seine vers le forage et donc dans la dynamique hydrologique de tout le système karstique, puisqu'une influence tidale est identifiée jusqu'à la source vers l'amont. La caractérisation de la dynamique hydrologique du remplissage alluvionnaire, encore assez mal connue, revêt donc une importance particulière dans un tel contexte.

III. LE COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DE L'ENSEMBLE ALLUVIONNAIRE DE LA BASSE-VALLÉE DE SEINE

III. 1 Etat des connaissances

Dans la vallée de Seine, les alluvions modernes constituent l'ensemble aquifère couvrant la Craie en fond de vallée et sont la terminaison aval de l'aquifère de la Craie s'écoulant depuis les plateaux. Du point de vue lithologique, les alluvions sont composées : i) des sables fins argileux, silts, tourbes, reposant sur ii) des matériaux grossiers, constitués par les cailloutis du Wechsélien (graves de fond des alluvions). Ces deux sous-ensembles litho-stratigraphiques se distinguent donc également par leurs propriétés hydrauliques. De fait, les comportements aquifères de ces deux ensembles sont totalement différents. Avec une épaisseur de l'ordre de 10 à 20 mètres, les alluvions supérieures, de par leur lithologie (sables fins argileux et tourbes), sont considérées comme très peu perméables, avec une conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} m s⁻¹. En revanche, l'essentiel de l'eau mobile est pris en charge par les graves de fond (i.e., les cailloutis du Wechsélien), qui ont une conductivité hydraulique de l'ordre de $2 \cdot 10^{-3}$ m s⁻¹.

Les cailloutis constituent une couche très transmissive sous-jacente à une couche de très faible perméabilité que sont les alluvions supérieures. Le contraste de perméabilité entre alluvions inférieures et supérieures est très important, de sorte que la nappe des cailloutis peut être considérée comme semi-captive sous les alluvions supérieures fines. Sur le plan lithologique, le passage de la Craie aux alluvions est très net: des observations réalisées sur des chantiers de gravières montrent clairement que le cailloutis repose directement sur le toit de la Craie. Au dessous, la nappe de la Craie circule dans un aquifère à triple-porosité liée à la porosité matricielle de la Craie, à sa porosité de fissure et à la présence de phénomènes karstiques. Tout l'ensemble Craie/alluvions correspond à un seul et même aquifère compartimenté, dont la conductivité hydraulique moyenne serait de l'ordre de $1.5 \cdot 10^{-3}$ m s⁻¹.

Le rôle du cailloutis de fond serait donc capital, siège de sous-écoulements importants de l'amont de la vallée vers l'estuaire. En effet, le flux des eaux souterraines depuis les plateaux vers la vallée de la Seine constitue un apport important dont les sources de débordement en pied de plateau ne représentent nécessairement qu'une petite manifestation. Ce sont pourtant d'importants points de captage : par exemple, 50% de l'AEP de l'agglomération havraise est fournie les sources de Radicatel, exutoires karstiques de pied de plateau en vallée de Seine.

III. 2 Détermination des contributions respectives de l'aquifère de la Craie et du niveau de la Seine dans les variations piézométriques du remplissage alluvionnaire

Le GPMH a équipé et assuré le suivi de plus de 35 piézomètres répartis implantés tantôt dans les alluvions fines du sommet (piézomètres « moyens »), tantôt dans les graves de fond à la base du remplissage (piézomètres « longs ») entre le canal de Tancarville et la Seine au niveau du marais Vernier en rive droite de Seine (Fig.1a, Fig.3). Les données acquises couvrent une période de trois mois pour la plus courte série, jusqu'à un an pour la plus longue, entre les mois de septembre 2005 et octobre 2006.



Figure 3 – Zone d'implantation du champ piézométrique dans le remplissage alluvionnaire entre Tancarville et Le Havre

Une analyse par ondelettes continue a été utilisée pour la caractérisation des facteurs de contrôle de la variabilité piézométrique au niveau des différents piézomètres. La recherche non seulement de périodicités liées au régime tidal, mais également d'une variabilité liée à la contribution de processus très certainement non-stationnaires (variations piézométriques de la nappe de la Craie), a justifié l'emploi de cette approche méthodologique.

Les diagrammes temps-fréquence des piézomètres tant moyens (alluvions fines) que longs (graves de fond) montrent dans tous les cas la présence caractéristique d'une bande d'énergie typique du signal tidal de période d'environ 12h, en outre clairement modulée par une périodicité à 14j, comme cela pouvait être observé à la source karstique du Hannetot (Fig.2b). Dans le cas des graves de fond, le diagramme temps-fréquence montre que la variation tidale est la composante dominante de la variabilité piézométrique (Fig.4). Cet impact tidal perdure malgré un effet notable de la distance à la Seine : la part de variance calculée pour les variations liées au marnage explique pour les piézomètres implantés dans les graves de fond de forte transmissivité de 39% à plus de 97% de la variabilité piézométrique totale selon l'éloignement du piézomètre par rapport à la Seine.

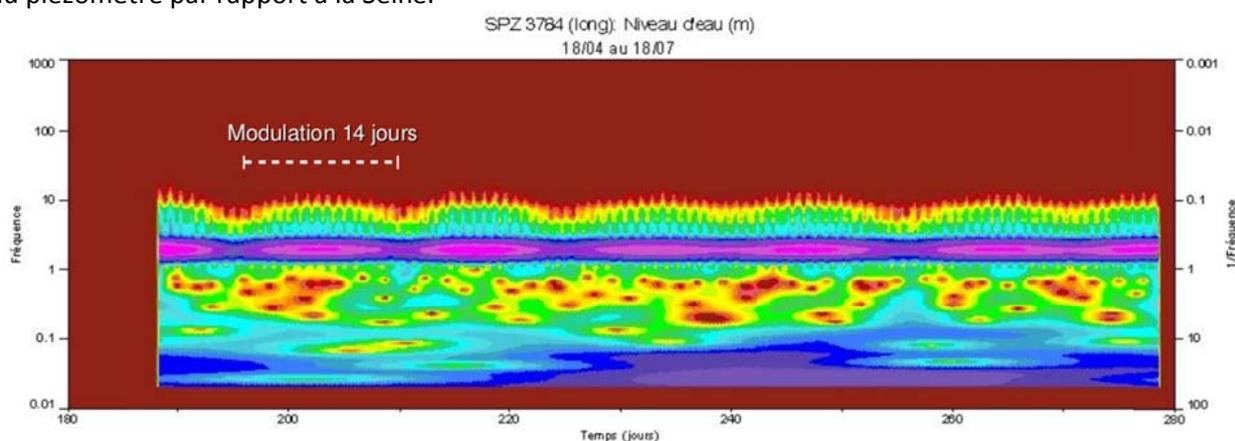


Figure 4 – Spectre en ondelettes d'un signal piézométrique pour un piézomètre long (graves de fond)

Dans les alluvions fines (piézomètres moyens), l'effet du marnage tidal, bien que présent, est fortement atténué, sauf pour les piézomètres localisés tout à fait au bord de la Seine où il reste conséquent. L'essentiel des variations piézométriques dans les alluvions fines s'apparentent aux variations, connues par ailleurs, de la charge dans l'aquifère karstifié de la Craie (Fig.5).

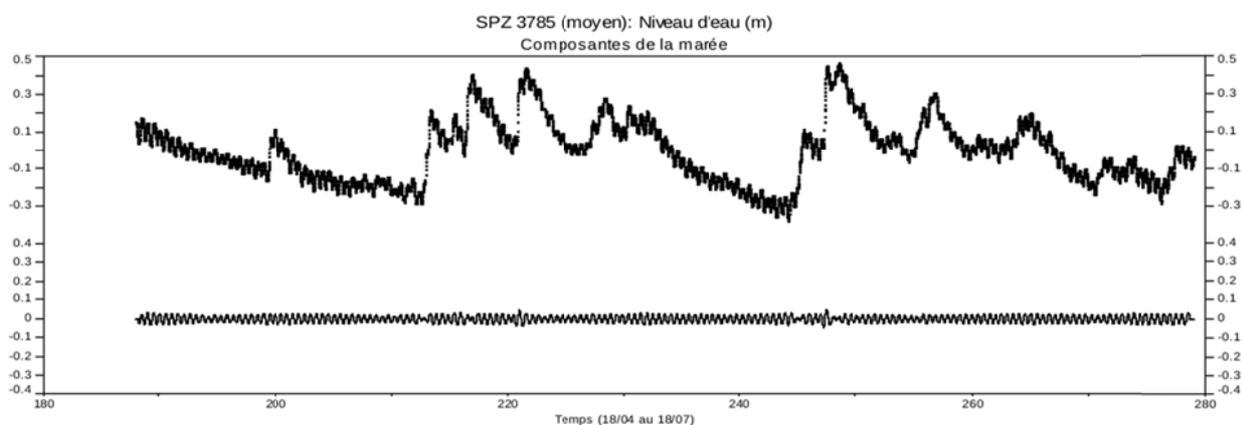


Figure 5 – Charge hydraulique pour un piézomètre moyen (alluvions fines du supérieures, en haut) et composante tidale extraite par transformée en ondelettes (en bas)

Une analyse multirésolution sur les piézomètres des graves de fond permet l'extraction des différentes composantes du signal piézométrique : il est ainsi possible d'isoler la part de variabilité liée au marnage en Seine (détail de la décomposition multirésolution, Fig.6), ainsi que la présence de variations de plus grande

échelle temporelle (approximation, Fig.6). L'analyse montre que même si la piézométrie dans les graves de fond est largement dominée par les cycles tidaux, les fluctuations basse-fréquence (approximation, Fig.6) sont manifestement structurées de manière analogue aux variations piézométriques des alluvions fines du dessus, c'est à dire à la manière des réponses karstiques de l'aquifère de la Craie.

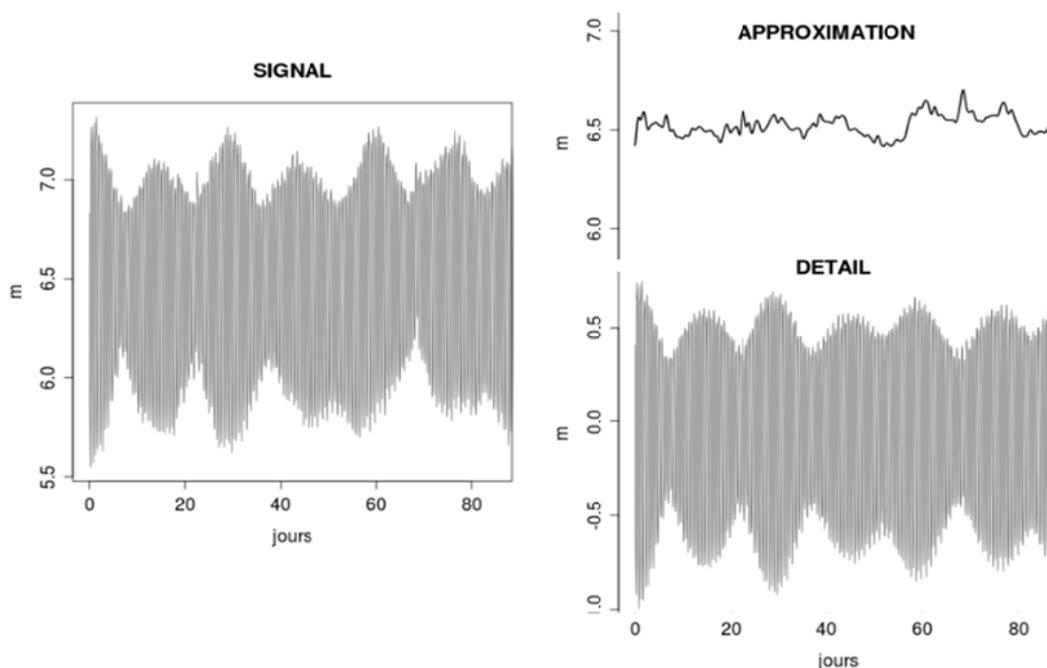


Figure 6 – Analyse multirésolution de la charge hydraulique dans un piézomètre long (graves de fond), faisant apparaître pour les grandes échelles de la décomposition (approximation) des variations liées à la réponse hydrologique de l'aquifère karstifié de la Craie.

Dans tous les cas, quelque soit le piézomètre considéré, la composante basse-fréquence prend l'allure d'hydrogrammes de crue, manifestement en lien avec la nature localement karstique de la Craie sous-jacente. Une comparaison avec les hydrogrammes de deux bassins versants superficiels majeurs localisés en bordure de plateau crayeux de part et d'autre de la zone étudiée montre une bonne adéquation des différentes réponses hydrologiques à la succession des événements pluvieux (Fig.7). Une telle réactivité dans l'ensemble alluvionnaire correspondrait donc à l'expression de l'aquifère de la Craie karstifiée sous les alluvions.

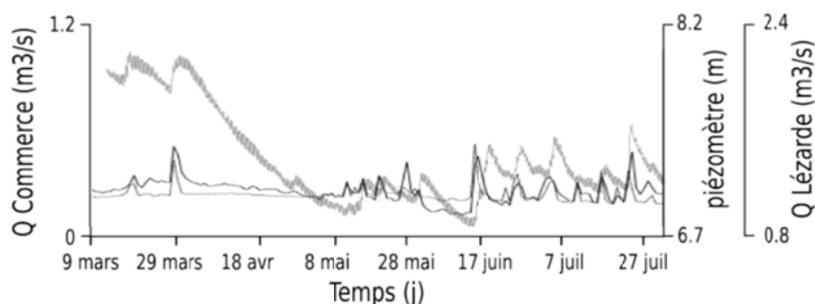


Figure 7 – Comparaison entre fluctuations piézométriques basse-fréquence du remplissage alluvionnaire et réponses hydrologiques de 2 rivières encadrant la zone étudiées.

IV. CONCLUSIONS SUR LA DYNAMIQUE PIÉZOMÉTRIQUE DU REMPLISSAGE ALLUVIONNAIRE

De ces quelques résultats préliminaires, il ressort que l'ensemble constitué par les alluvions fines et les graves de fond au contact de la Craie peut effectivement être caractérisé par un ensemble hydrogéologique

multicouche enregistrant de manière différentielle l'influence des facteurs de contrainte principaux que sont la hauteur d'eau en Seine contrôlée par la marée et la réponse de l'aquifère karstifié de la Craie. Les résultats obtenus ici ont montré que:

1. les alluvions fines filtrent les variations tidales, les oscillations correspondantes étant par trop rapides pour que ces formations de faible transmissivité puissent les enregistrer;
2. du fait de leur forte capacité de filtrage des hautes fréquences, la variabilité piézométrique des alluvions fines est largement dominée par des fluctuations typiques de l'aquifère de la Craie, les zones les plus karstifiées sous alluvions enregistrant par contre les événements de crue observables dans la réponse hydrologique des bassins versants superficiels de plateau situés alentour;
3. la piézométrie des graves de fond est pour plus de 50% dominée par le signal tidal: leur forte transmissivité les soumet en premier lieu à la dynamique du marnage en Seine, ce qui prouve une très forte connexion entre le fleuve et l'aquifère. Il est toutefois possible par filtrage des composantes spectrales d'identifier, lorsqu'elle ne se manifeste pas clairement, et dans tous les cas de quantifier la part de contribution de l'aquifère dans la variabilité piézométrique.

La Craie karstifiée constitue donc bien avec le remplissage alluvionnaire de la basse-vallée de Seine un aquifère multicouche à drainage verticale, la nappe des alluvions n'étant en fait que l'ennoiement du remplissage par la nappe de la Craie semi-captive sous les alluvions fines. L'existence de marais (omniprésents dans la vallée avant leur assèchement pour l'agriculture), en est d'ailleurs une parfaite illustration. Les facteurs de contrôle de ce système seraient à la fois liés la dynamique hydrologique sur les plateaux sous l'effet des précipitations s'infiltrant rapidement dans l'aquifère crayeux, et à la hauteur d'eau en Seine, soumise au marnage d'origine tidale. L'infiltration directe à l'aplomb des alluvions fines est selon toute vraisemblance de faible importance vis-à-vis de ces deux forçages, compte-tenu de la faible conductivité hydraulique de ces formations de surface. Le marnage tidal en Seine a donc bien un effet sur le fonctionnement hydrologique des systèmes karstiques de pied de plateau développés dans l'aquifère de la Craie, et les alluvions de base très perméables (graves de fond des alluvions) jouent un rôle prépondérant dans le transfert de cette onde de pression tidale.

Références bibliographiques :

- [1] Fournier, M., 2006 - Identification des modalités de transport et de la vulnérabilité du karst de la craie. Application de nouveaux outils statistiques d'analyse des données au système du Hannetot (Seine-Maritime, France). Thèse de doctorat, Université de Rouen, 233 pages.
- [2] Fournier M., Massei N., Bakalowicz M. and Dupont J.P., 2007.- Use of univariate clustering to identify transport modalities in karst aquifers. C.R. Géosciences, 2007, Volume: 339 Pages: 622-631.
- [3] Khaldi S., Ratajczak M., Fournier M., Gargala G., Favennec L., Dupont J.P., 2011 - Intensive exploitation of karst aquifer lead to *Cryptosporidium* release and water supply contamination, Water Research, 45 (9): 2906-2914 doi : 10.1016/j.watres.2011.03.010
- [4] Khaldi S., 2009 - Etude de la pathogénicité des oocystes de *Cryptosporium*, et étude de la circulation des oocystes dans les aquifères karstiques, Thèse de Doctorat de l'Université de Rouen, soutenue le 14 septembre 2010.
- [5] Massei, N., 2001 - Transport de particules dans l'aquifère crayeux karstique et à l'interface Craie/alluvions, Thèse de doctorat, Université de Rouen, 200 pages.
- [6] Massei, N., Dupont, J.P., Mahler, B.J., Laignel, B., Fournier, M., Valdes, D. & Ogier, S., 2006b - Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses. J.Hydrol., 329:244-257.