

Suivi du transport particulaire en contexte karstique. Méthode et application

Matthieu Fournier, David Viennet, Nicolas Massei, Jean-Paul Dupont

Abstract

Karst aquifers are heterogeneous and complex media. Their hydraulic conditions are highly variable in space and time. Particles transfer in these aquifers give some informations on transport properties and groundwater dynamics. The aim of this paper is to present some methods for the monitoring of particles transfer and their difficulties. Applications on identification of transfer modalities and controlling parameters are presented. The perspectives of a new monitoring source to sink by morpho granulometry are addressed.

Résumé

Les aquifères karstiques sont des milieux hétérogènes complexes dont les conditions d'écoulement sont très variables dans l'espace et dans le temps. Le transfert particulaire au sein de ces aquifères nous renseigne sur les propriétés de transport et constitue un témoin de l'hydrodynamisme souterrain. L'objectif de cet article est de présenter des méthodes de suivi du transport particulaire et leurs difficultés. Des applications à l'identification des modalités de transfert et des paramètres forçants sont présentées. Les perspectives d'un nouveau suivi « source to sink » par morpho granulométrie sont abordées.

Citer ce document / Cite this document :

Fournier Matthieu, Viennet David, Massei Nicolas, Dupont Jean-Paul. Suivi du transport particulaire en contexte karstique. Méthode et application. In: Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, numéro 19, 2017. Monitoring en milieux naturels. Retours d'expériences en terrains difficiles. pp. 235-242;

doi : <https://doi.org/10.3406/edyte.2017.1388>

https://www.persee.fr/doc/edyte_1762-4304_2017_num_19_1_1388

Fichier pdf généré le 22/04/2020

SUIVI DU TRANSPORT PARTICULAIRE EN CONTEXTE KARSTIQUE MÉTHODE ET APPLICATION

MONITORING OF PARTICLES TRANSFER IN KARST AQUIFER METHOD AND APPLICATION

MATTHIEU FOURNIER, DAVID VIENNET, NICOLAS MASSEI, JEAN-PAUL DUPONT

Normandie Université, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, 76000, Rouen.

Contact : matthieu.fournier@univ-rouen.fr

RÉSUMÉ

Les aquifères karstiques sont des milieux hétérogènes complexes dont les conditions d'écoulement sont très variables dans l'espace et dans le temps. Le transfert particulaire au sein de ces aquifères nous renseigne sur les propriétés de transport et constitue un témoin de l'hydrodynamisme souterrain. L'objectif de cet article est de présenter des méthodes de suivi du transport particulaire et leurs difficultés. Des applications à l'identification des modalités de transfert et des paramètres forçants sont présentées. Les perspectives d'un nouveau suivi « source to sink » par morphogranulométrie sont abordées.

MOTS-CLÉS : *MATIÈRE EN SUSPENSION, TRANSFERT PARTICULAIRE, KARST, TURBIDITÉ, MICROGRANULOMÉTRIE.*

ABSTRACT

Karst aquifers are heterogeneous and complex media. Their hydraulic conditions are highly variable in space and time. Particles transfer in these aquifers give some informations on transport properties and groundwater dynamics. The aim of this paper is to present some methods for the monitoring of particles transfer and their difficulties. Applications on identification of transfer modalities and controlling parameters are presented. The perspectives of a new monitoring source to sink by morphogranulometry are addressed.

KEYWORDS: *SUSPENDED PARTICULATE MATTER, PARTICLE TRANSFER, KARST, TURBIDITY, MICROGRANULOMETRY.*

SPÉCIFICITÉ DU CONTEXTE KARSTIQUE

L'aquifère karstique est le seul type d'aquifère de nature évolutive où la circulation d'eaux dans la formation géologique façonne les vides de l'aquifère et induit des caractéristiques aquifères spécifiques où structure et fonctionnement sont indissociables (Bakalowicz, 2005). Les aquifères karstiques sont reconnus pour leur très forte vulnérabilité et hétérogénéité spatio-temporelle engendrant des réponses hydrologiques diverses, complexes et plus ou moins intenses (Ford et Williams, 2008). Leur forte vulnérabilité dépend de leur degré de karstification et de l'existence de connexions hydrauliques entre la surface et le souterrain permettant l'engouffrement d'eau de ruissellement au droit de pertes et leur mélange avec les eaux de nappe, générant des épisodes turbides aux captages d'alimentation en eau potable. Ainsi, la turbidité, paramètre physique mesurant le trouble de l'eau, est mesurée en continu sur quasiment tous les captages karstiques pour lesquelles les valeurs atteintes peuvent être fortes et très variables (Figure 1).

La turbidité est enregistrée pour rendre compte, d'une part, du risque sanitaire et, d'autre part, de la charge particulaire transitant dans l'aquifère karstique. Celle-ci a deux origines potentielles. Soit elle provient du transport direct par l'introduction d'eaux déjà chargées en particules, soit elle correspond à de la remobilisation de dépôts intra-karstiques remis en suspension. Les sources de sédiments mobilisables créant la turbidité peuvent avoir deux origines : soit (i) allochtone par rapport au karst, c'est-à-dire issus de sédiments érodés sur les plateaux et engouffrés aux bêttoires avec les eaux de ruissellement, soit (ii) autochtones, provenant de stocks déjà présents dans l'aquifère, parmi lesquels on peut distinguer les sédiments originaires de la surface stockés un temps dans le karst et remobilisés sous certaines conditions, et les résidus issus de la karstification.

Le transport des particules en milieu karstique est un processus complexe impliquant des phénomènes de transfert direct depuis la surface, de dépôt de matières

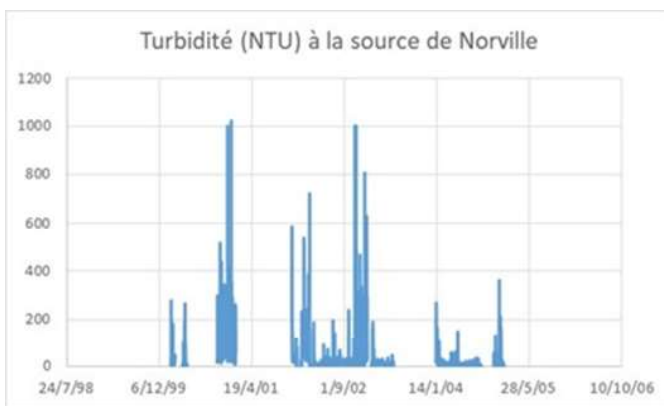


Figure 1 - Chronique de turbidité enregistrée à la source de Norville (76) et couleur de l'eau associée aux pics turbides.

en suspension (MES), lorsque la compétence de l'écoulement diminue (période de récession), et de remise en suspension, lorsqu'elle augmente (période de crue). Le fonctionnement des aquifères karstiques est rendu complexe du fait du nombre important de paramètres qui influent sur celui-ci, comme la structure de l'aquifère, les conditions aux limites, les forçages climatiques, les interactions avec les rivières ou les mers, l'impact anthropique. La recherche de ces paramètres est un enjeu important en hydrologie karstique mais difficile, et la distribution des tailles des particules constitue un traceur intéressant des modalités de transport (Atteia et Kozel, 1997 ; Massei, 2001 ; Fournier et al., 2008). L'analyse granulométrique des MES permet l'identification de la nature et de l'origine des

populations de particules retrouvées aux sources karstiques. Ainsi, Lacroix et al. (1998, 2000) ont comparé les spectres granulométriques des MES en surface, des résidus d'altération de la craie et ceux de MES d'un réseau spéléologique pour identifier les connexions hydrauliques entre la surface et le souterrain. De plus, associée à un hydrodynamisme transitoire, la granulométrie des MES transportées au sein des aquifères karstiques est très hétérogène et fortement variable au cours du temps, notamment lors des crues durant lesquelles les quantités de MES transportées peuvent augmenter de 2 à 3 unités log (Figure 2). Ainsi, la granulométrie des MES peut donc servir de marqueur des conditions d'écoulement et des connexions hydrauliques au sein des aquifères karstiques.

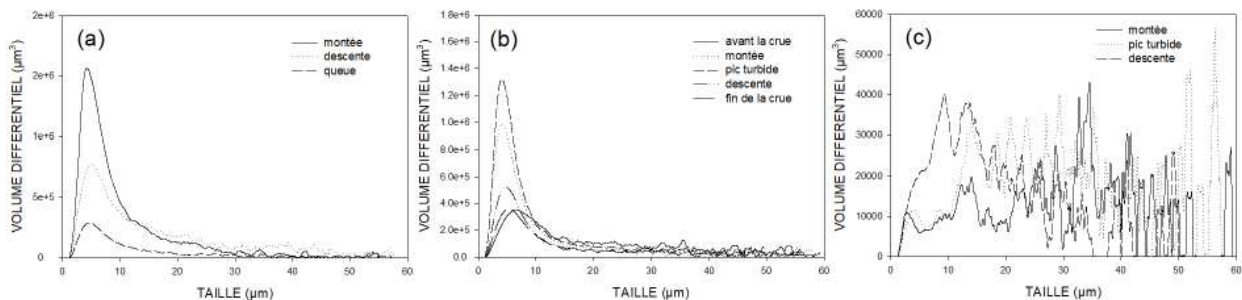


Figure 2 - Évolution de la microgranulométrie des MES à la source de Norville pour différentes crues (a, b) et en étiage (c).

INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DES PARTICULES DANS L'EAU

Mesure directe de la charge particulaire

La quantité de particules en suspension dans l'eau peut se mesurer par le calcul de la charge particulaire, ou concentration en MES ([MES] dans la suite du texte). La méthode consiste à filtrer l'eau sur une membrane afin de retenir toutes les particules de taille supérieure à 0,5 µm. Le rapport entre la pesée du filtre (masse sèche totale de matières en suspension) et le volume filtré détermine la concentration de ces particules dans l'eau (exprimée généralement en mg/l). La méthode de mesure est normalisée par l'AFNOR (AFNOR NF T 90-105-2 et NF EN 872) mais la technique de prélè-

vement se fait à 15-20 cm sous la surface de l'eau de sorte que seuls les sédiments transportés par suspension sont pris en compte en ignorant les processus de saltation et de roulement. Landemaine (2016) a montré que la méthode de prélèvement (collecte de la charge de fond, collecte par préleveur automatique) modifie l'évaluation de la concentration en MES d'un facteur allant de 0,5 à 8.

Un autre moyen vise à mesurer le spectre granulométrique des MES présentes dans l'eau au moyen d'un microgranulomètre. Outre la [MES], la concentration volumique par classe de taille est mesurée afin d'obte-

nir un spectre granulométrique des MES transportées dans l'eau. Il existe deux grands types de microgranulomètres : les granulomètres laser et les compteurs Coulter. Les premiers sont basés sur la technique de la diffraction de la lumière. Un rayon laser traverse le liquide et les particules présentes dans la zone sensible créent une extinction et une rétrodiffusion caractéristiques de leur taille et leur nombre. Selon la théorie de Mie et l'approximation de Fraunhofer pour les particules les plus grosses ($> 50 \mu\text{m}$), l'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction sont fonction de la taille des particules. Plus la particule est petite, plus l'angle de diffraction est grand. Les résultats par classe de taille sont exprimés en diamètre de particules sphériques diffusant la lumière de manière équivalente. Les mesures par granulomètres laser sont encadrées par la norme AFNOR NF ISO 13320 qui précise la théorie et les bonnes conditions d'utilisation.

Les seconds sont des compteurs de particules mesurant leur taille. Le compteur détecte le changement de la résistance électrique lorsque l'on fait passer un électrolyte calibré contenant des particules qui ne sont pas conductrices. La quantité de particules génère une variation de la résistance qui dépend de la taille de chaque particule comptée. Là encore, les résultats par classe de taille sont exprimés en diamètre de particules sphériques équivalentes.

Mesure indirecte de la charge particulaire par la turbidité

Malgré le développement des granulomètres laser de terrain, le suivi *in situ* de la charge particulaire est très largement effectué de manière indirecte par la mesure de la turbidité. D'une part parce que celle-ci est facile, pratique et peu coûteuse, d'autre part parce que ce paramètre a été défini comme marqueur de la qualité des eaux et tend ainsi à être mesuré en continu dans les captages d'alimentation en eau potable.

La turbidité correspond à la propriété optique de l'eau qui fait que la lumière incidente est diffusée ou absorbée en fonction de la concentration en MES provenant de divers éléments particuliers tels que argiles, limons, silts, sables, matières organiques et minérales, éléments et organismes biologiques. Il s'agit d'un paramètre dont la signification dépend de la technique de mesure utilisée. Plusieurs mesures optiques rendent compte de la turbidité (AFNOR NF EN ISO 7027) :

- les mesures de transmissiométrie permettant de calculer le coefficient d'atténuation, c , lié aux teneurs en particules en suspension dans l'eau. Cet appareil mesure la transmission de lumière à 660 nm à travers une trajectoire connue (10 cm). On en déduit un facteur t de transmission par mètre ;

- le turbidimètre néphélométrique mesurant en NTU ou NFU l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90° par rapport au trajet de la lumière incidente. Cette mesure détermine le coefficient angulaire de diffusion β_{90} . Cette diffusion (réflexion + réfraction +

diffraction) est surtout liée aux matières en suspension et elle dépend de la taille, de la forme et de l'indice de réfraction des particules, ainsi que de la longueur d'onde de la lumière incidente ; les substances dissoutes agissant très peu sur ce coefficient de diffusion.

De nombreux auteurs (Bunt *et al.*, 1999 ; Downing, 2006 ; Rymaszewicz *et al.*, 2017) ont mis en évidence les effets du type de mesure et d'appareil sur la mesure de turbidité, tentant même des intercalibrations. Les conclusions montrent l'absence de réponse univoque à cette question et avancent régulièrement la spécificité des mesures. De plus, d'autres études ont mis en évidence l'impact de la concentration, de la taille, de la nature et de la forme des particules sur les valeurs de turbidité mesurées (Thollet *et al.*, 2013 ; Merten *et al.*, 2014). Ainsi, des particules, en concentrations très différentes, peuvent avoir les mêmes valeurs de turbidité si elles sont de types très différents.

S'il existe bien une tendance à la proportionnalité entre turbidité et concentration en MES, cette relation a des composantes géographiques, saisonnières et hydrologiques importantes. Néanmoins, d'une manière générale, celle-ci est tout à fait satisfaisante pour une région donnée si l'on se réfère à un même milieu, et ce, à condition que toutes les mesures de turbidité aient été faites avec le même appareil, calibré avec les mêmes étalons.

RELATION TURBIDITÉ-[MES] ET LIENS AVEC L'HYDRODYNAMIQUE KARSTIQUE

La turbidité, telle qu'elle est définie dans la méthode néphélométrique, correspond donc à une mesure non spécifique de la concentration des solides en suspension. Et puisque cette relation est complexe et dépend de multiples facteurs, il convient donc *a posteriori* d'établir une relation entre turbidité et [MES] à partir de la mesure directe de la charge particulaire par filtration. Cette courbe de tarage permet par la suite de calculer la charge particulaire par la mesure en continu de la turbidité.

Cependant, la Figure 3, qui rassemble tous les échantillons obtenus sur un même site mais dans des contextes hydrodynamiques différents, montre qu'il est difficile d'obtenir une relation claire entre turbidité et [MES] sans distinction des conditions hydrologiques. La droite d'équation $y=x$ permet de séparer au-dessous de celle-ci les MES dont la concentration particulaire est faible, donc des MES plutôt de nature organique, et au-dessus de celle-ci les MES dont la concentration particulaire est forte, donc des MES plutôt de nature minérale. La relation entre la turbidité et [MES] est plus complexe et ne peut pas seulement être abordée selon les classes de taille des particules. Elle dépend également de la nature organique ou minérale de ces dernières (Figure 3).

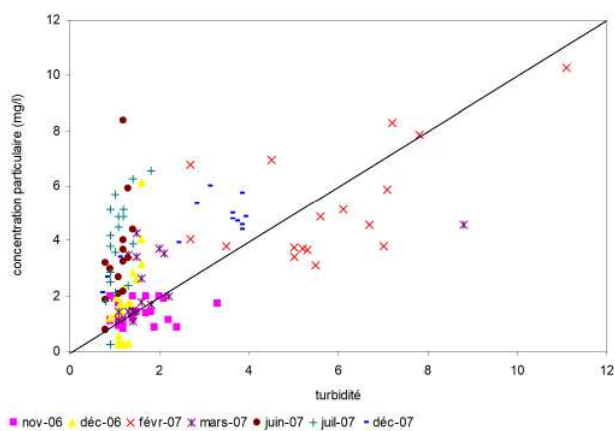


Figure 3 - Relation entre la turbidité et la concentration particulaire des échantillons prélevés au forage des Varras lors des 7 périodes d'échantillonnage dont 4 en crue (Fournier, 2008).

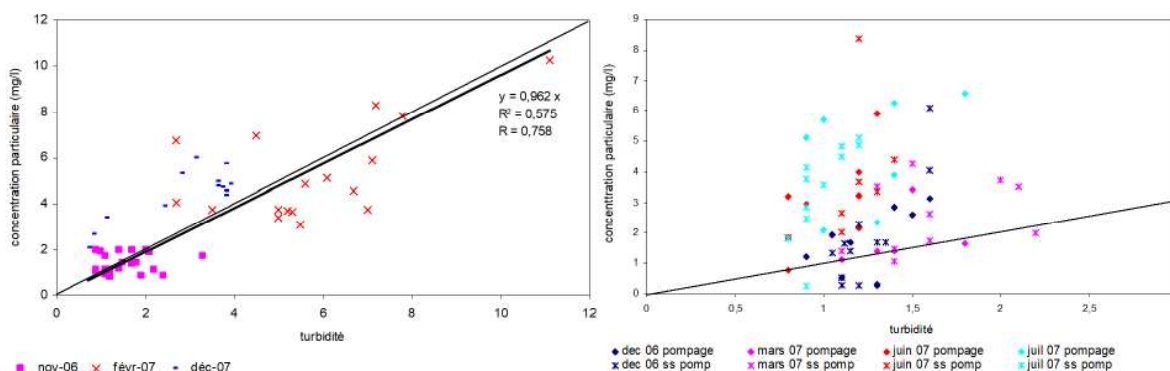


Figure 4 - Relation entre la turbidité et la concentration particulaire des échantillons prélevés au forage des Varras lors des trois épisodes de crue et en fonction des périodes de pompage et d'absence de pompage lors des quatre épisodes sans crue.

Pour observer la nature des MES, des observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées afin d'identifier (i) les différentes particules selon leur morphologie et leur nature (minérale, organique ou organominérale), (ii) les constituants des différentes populations mises en évidence par microgranulométrie (recherche par taille de particules à l'aide de cibles permettant une correspondance entre l'image 3D des particules obtenue au MEB et le volume particulaire mesuré par microgranulométrie), (iii) des marqueurs particuliers spécifiques des processus hydrogéologiques ou de l'origine des apports particuliers (micro-agrégats pédologiques, cendres volantes issues de la carburation des véhicules ou des rejets industriels, coccolithes et autres éléments de la craie, résidus de dissolution des carbonates, recristallisations de carbonates, marqueurs biologiques tels que des débris de racines, pollens, diatomées, thécamoebiens et autres protozoaires). Ces observations ont montré clairement une forte proportion de matériel organique lors des épisodes de crue. Dès lors, il devient possible de réaliser un bon ajustement linéaire entre turbidité et [MES] (Figure 4 gauche). La corrélation est bien meilleur et la régression s'ajuste autour de la droite $y = x$ signifiant la nature organique des MES. À l'inverse, en absence de crue, cette relation linéaire disparaît (Figure 4 droite) et la nature des MES est beaucoup plus minérale. La présence ou l'absence de pompage ne semble pas avoir d'effet sur la nature minérale des MES transportées au forage.

Le cortège granulométrique, la nature et l'origine des MES transportées dans les aquifères diffèrent au cours du temps à la faveur de l'hydrodynamique souterraine liée notamment aux épisodes de crues. Les proportions des différentes classes de taille changent selon le régime hydrologique (étiage, crue, récession, montée et pic de crue) et les modalités de transfert (direct depuis la surface, remise en suspension de sédiments intrakarstiques). La mesure par filtration des MES ne permet pas de rendre compte de la nature diverse des particules transportées et peut rendre impossible une courbe de tarage turbidité-[MES].

Diverses études (Massei, 2001 ; Fournier, 2006, 2008 ; Fournier *et al.*, 2008) montrent que sans être parfaites, les relations entre la turbidité, la concentration en MES et la concentration volumique des particules semblent proportionnelles : les périodes de crue présentent les plus fortes valeurs sauf exceptions des individus situés en début et fin de crue. Cependant, la granulométrie des MES est plus fine lors de ces périodes contrairement aux périodes d'étiage où les particules sont dominées par les silts moyens à grossiers. Ceci est confirmé par la diminution, lors des pics de turbidité, de la moyenne et de l'écart-type de la granulométrie.

À l'inverse, la moyenne et l'écart-type semblent plus élevés lorsque les échantillons sont prélevés en absence de crue. Ainsi, les périodes de crue apportent depuis la surface essentiellement du matériel organique (agrégat pédologique, floc organo-minéral, etc.) arraché au sol. La forte présence de ces éléments moins denses que le matériel minéral abaisse la concentration particulaire des échantillons lors des crues alors qu'en absence de crue, le matériel minéral issu des sédiments intrakarstiques se trouve seul dans les échantillons augmentant ainsi la concentration particulaire.

APPLICATION DU SUIVI GRANULOMÉTRIQUE À L'IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES FORÇANT L'HYDRODYNAMIQUE D'UN AQUIFÈRE KARSTIQUE

Le système karstique de Norville (réseau SNO Karst de l'INSU-CNRS), situé en bordure de Seine et soumis à la marée, se prête bien à l'étude des transferts entre la surface et le souterrain de par ses caractéristiques. C'est un système perte-source monoconduit, très réactif et conservatif (Massei, 2001 ; Fournier, 2006). De nombreux traçages artificiels ont été réalisés permettant d'ajuster une courbe débit-temps de transfert (Fournier *et al.*, 2008). À partir de cette relation, la connaissance du débit permet de déterminer le temps de transfert entre la perte et la source et ainsi comparer les caractéristiques des eaux infiltrées à la perte et restituées à la source afin de connaître la modulation effectuée par l'aquifère karstique. Les caractéristiques granulométriques de chaque échantillon d'eau introduit à la perte ont pu être comparées à celles restituées à la source afin d'identifier les modalités de transport (transfert direct, dépôt, resuspension) de chaque classe de taille particulaire (argile, silts, sables) (Figure 5).

les caractéristiques granulométriques des MES introduites à la perte et celles restituées à la source mais celle-ci dépend des conditions hydrodynamiques, de l'intensité des événements pluvieux et de la phase de l'hydrogramme. Les échantillons prélevés lors des montées de crues présentent le plus de remobilisation alors que ceux prélevés durant le pic présentent le plus de transport direct avec de fortes restitutions de particules et enfin ceux prélevés lors des phases de décrue et de récession présentent le plus de décantation. Mais les variables hydrodynamiques de l'aquifère et de la Seine ont également un impact important sur les caractéristiques des spectres granulométriques des MES. Les plus fortes restitutions à la source sont associées à un niveau piézométrique élevé et à une faible hauteur d'eau en Seine. Ceci a mis en évidence que ces variables définissent le gradient hydraulique qui contrôle les modalités de transport des MES au sein du système karstique. En effet, des échantillons prélevés lors de petits épisodes pluvieux mais correspondant au plus haut niveau piézométrique montrent les plus fortes restitutions de particules par transfert direct. De la même manière, des échantillons d'étiage prélevés lors d'un haut niveau piézométrique, montrent de fortes remobilisations de sédiments intrakarstiques en absence d'événement pluvieux. À l'inverse, des échantillons prélevés durant les hauts niveaux d'eau

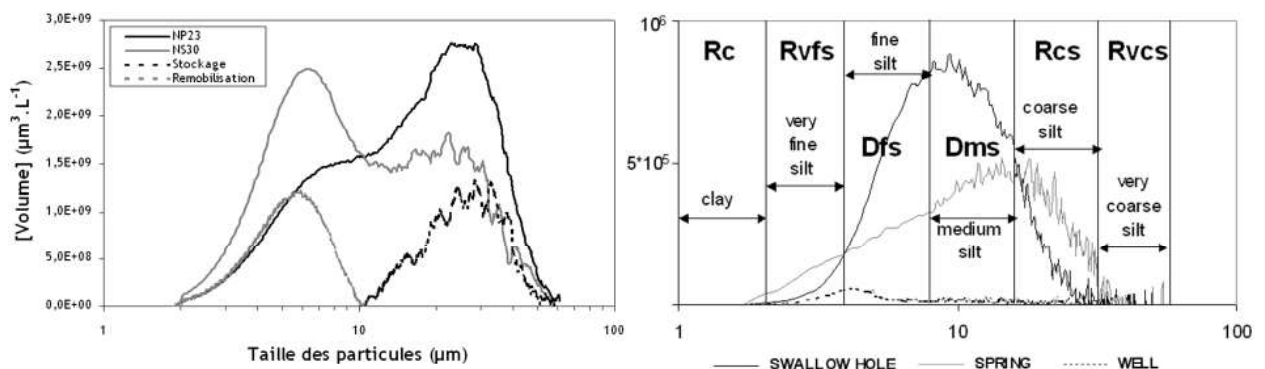


Figure 5 - Comparaison des spectres microgranulométriques d'un même échantillon d'eau à la perte et à la source de manière globale ou selon les classes granulométriques.

en Seine lors des événements pluvieux présentent des phénomènes de décantation et ceux prélevés lors des bas niveaux d'eau montrent des phénomènes de remobilisation ou de fortes restitutions par transfert direct. Ceci met en évidence l'impact sur le transfert particulaire des conditions de gradient hydraulique

établi entre le niveau piézométrique et le niveau d'eau en Seine indépendamment des intensités de pluies. Cette étude (Fournier et al., 2008) a montré l'utilisation possible de la granulométrie des MES comme marqueur des modalités de transport et des conditions hydrodynamiques.

PERSPECTIVE DE DÉVELOPPEMENT : LA MORPHOGRANULOMÉTRIE COMME OUTIL D'IDENTIFICATION DE LA NATURE ET DE L'ORIGINE DES MES

Les relations complexes entre turbidité-[MES]-modalités de transport amènent à mieux les définir, notamment en séparant la turbidité, marqueur global de la teneur en particules, selon la nature et l'origine des éléments qui la composent. La méthodologie actuelle repose sur des observations au MEB et le calcul de charge particulaire afin de séparer la turbidité en différents lots de même nature et origine. Néanmoins, cette procédure est complexe, coûteuse et très discontinue au regard de l'extrême variabilité hydrologique des aquifères karstiques.

La forme des particules renseigne sur leur nature et leur origine ainsi que sur les modalités de transport qu'elles ont subies. Ces liens sont utilisés en sédimentologie pour identifier les différents stocks sédimentaires, les transferts et les mécanismes de sédimentation par morphométrie. Actuellement, les analyses morphométriques sont réalisées de manière discontinue avec un microscope couplé à un programme d'analyse d'image mesurant les paramètres de taille et de forme des particules observées. Ces mesures discontinues ne répondent pas à la nécessité de suivi haute fréquence des MES transportées au sein des aquifères karstiques. Pour pallier cette difficulté technique, l'utilisation d'un morphogranulomètre à flux continu (caméra couplée à une pompe péristaltique) est actuellement testée pour identifier des particules de différentes natures et origines (Fournier et al., 2016 ; Viennet et al., 2017). Cet appareil prend des images alors qu'un échantillon d'eau circule à tra-

vers une fenêtre d'écoulement, permettant d'analyser de grande quantité de particules (plusieurs centaines de milliers) par analyse d'image en un temps réduit (2 minutes). Chacune des particules est alors décrite par une centaine de paramètres de taille et de forme tels que les diamètres sphériques équivalents moyen, minimum, maximum, élongation, circularité, convexité, dimension fractale, linéarité du contour, rapport entre les différentes tailles, etc. (Figure 6).

Plusieurs échantillons de différentes nature et origine (sable, craie, argile, limons, sols, charbon, matière organique) ont été mesurés au morphogranulomètre afin d'identifier les paramètres permettant de différencier des pôles purs (Figure 7). Des tests statistiques ont permis d'identifier 3 paramètres significatifs (aspect ratio=rapport des longueurs, straightness=circularité du contour, bluntness=présence de particules satellites en périphérie) permettant de séparer les particules de nature minérale et organique. Ainsi, il est possible de distinguer sur un diagramme ternaire, présentant des échantillons plus complexes de sols, deux pôles, minéral et organique avec une zone de mélange (Figure 8).

Après une phase de calibration en laboratoire avec des mesures d'échantillons purs (de nature et origine unique et connues) et d'eau provenant du karst, une méthodologie sera développée et adaptée à la mesure de terrain afin de tester la possibilité d'étendre cette technique à la mesure en continu.

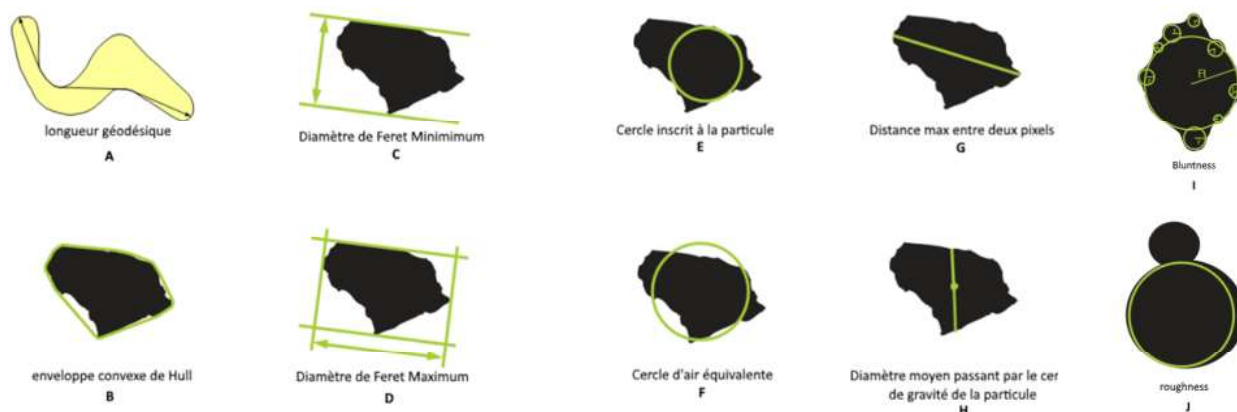


Figure 6 - Exemples de paramètres de taille et de forme mesurés par un morphogranulomètre via l'analyse d'image (Viennet et al., 2017).

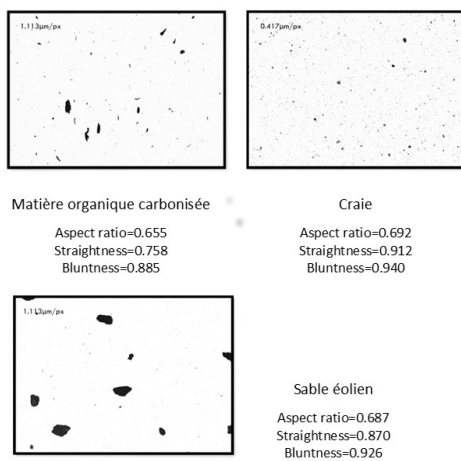


Figure 7 - Images obtenues par morphogranulométrie sur différents matériaux purs et grandeurs caractéristiques des 3 paramètres discriminant (Viennet et al., 2017).

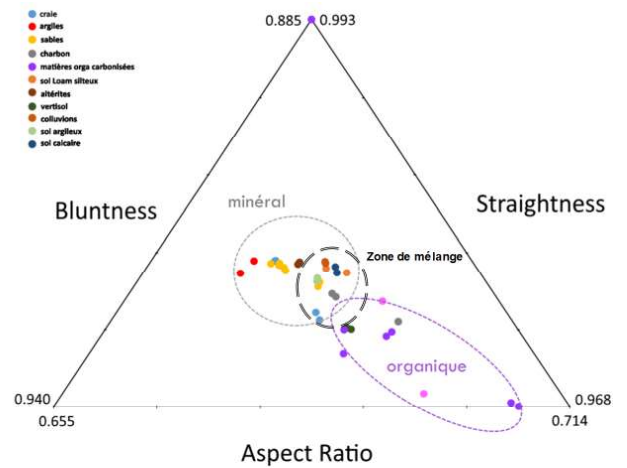


Figure 8 - Identification de la nature minérale ou organique des particules par morphogranulométrie (modifié d'après Viennet et al., 2017).



Vie et mort d'une station de mesure. 1 à 4 : installation d'une station de mesure en continu (turbidité, conductivité électrique, hauteur d'eau, température, débitmétrie à effet dopler) avec panneaux solaires ; 5 à 8 : vie de la station avec quelques mesures en crue et nettoyages réguliers ; 9 à 12 : destruction lors d'une grosse crue avec embâcles et réinstallation

Remerciements

Ces travaux ont été permis avec le concours financier du CNRS, de la Région Haute-Normandie, de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et dans le cadre du SNO-Karst (INSU-CNRS).

BIBLIOGRAPHIE

- ATTEIA O., KOZEL R., 1997. Particle size distributions in waters from a karstic aquifer: from particles to colloids. *Journal of Hydrology*, 201(1-4), 102-119.
- BAKALOWICZ M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 148-160.
- BUNT J.A.C., LARCOMBE P., JAGO C.J., 1999. Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter. *Continental Shelf Research*, 19, 1199-1220.
- DOWNING J., 2006. Twenty-five years with OBS sensors: the good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research* 26, 2299-2318. doi:10.1016/j.csr.2006.07.018
- FORD D.C., WILLIAMS P.W., 2008. *Karst Geomorphology and Hydrology*. Wiley, 562 p.
- 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 Hannebot (Seine-Maritime, France). Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 228 p.
- FOURNIER M., 2008. Fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère de Caumont et incidence des aménagements de bassin versant sur la qualité des eaux du forage des Varras. Rapport post-doc CNRS, 103 p.
- FOURNIER M., MASSEI N., MAHLER B., BAKALOWICZ M., DUPONT J.P., 2008. Application of multivariate analysis to suspended matter particle size distribution in a karst aquifer. *Hydrological Processes*, 22(13), 2337-2345.
- FOURNIER M., VIENNET D., DUPONT J.P., MASSEI N., 2016. An experimental lab approach of morpho-granulometry on suspended particle matter to identify particle transfer properties in karst aquifer. IAH 2016, Montpellier, 26-29 septembre 2016, abstract 2295, p.647.
- HOROWITZ A.J., CLARKE R.T., MERTEN G.H., 2014. The effects of sample scheduling and sample numbers on estimates of the annual fluxes of suspended sediment in fluvial systems. *Hydrol. Process.*, 543, 531-543. doi:10.1002/hyp.10172
- LACROIX M., LEBOULANGER T., WANG, H.Q., 1998. Mise en évidence des relations surface-endokarst par la microgranulométrie, exemple du karst crayeux haut-normand. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 169(2), 177-187.
- LACROIX M., RODET J., WANG H.Q., MASSEI N., DUPONT J.P., 2000. Origine des matières en suspension dans un système aquifère karstique : apports de la microgranulométrie: Origin of suspended particulate matter in a karstic aquifer system: contribution of the microgranulometry. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 330(5), 347-354.
- LANDEMAINE V., 2016. Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris: analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 235 p.
- MASSEI N., 2001. Transport de particules en suspension dans l'aquifère crayeux karstique et à l'interface craie/alluvions. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 189 p.
- MERTEN G.H., CAPEL P.D., MINELLA J.P.G., 2014. Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. *J Soils Sediments*, 14, 1235-1241. doi: 10.1007/s11368-013-0813-0
- RYMSZEWICZ A., O'SULLIVAN J.J., BRUEN M., TURNER J.N., LAWLER DM, CONROY E., KELLY-QUINN M., 2017. Measurement differences between turbidity instruments, and their implications for suspended sediment concentration and load calculations: A sensor inter-comparison study. *Journal of Environmental Management*, 199, 99-108.
- SKARBØVIK E., STÅLNACKE P., BOGEN J., BØNSNES T.E., 2012. Impact of sampling frequency on mean concentrations and estimated loads of suspended sediment in a Norwegian river: implications for water management. *Sci. Total Environ*, 433, 462-71. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.072
- THOLLET J., LE COZ G., ANTOINE P., FRANÇOIS L., SAGUINTA AH M., LAUNAY B., CAMENEN B., 2013. Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau. *La Houille Blanche*, 4, 2013, 50-56. DOI 10.1051/lhb/2013033
- VIENNET D., FOURNIER M., DUPONT J.P., 2017. Développement méthodologique du suivi des transferts de turbidité dans les aquifères karstiques par morpho-granulométrie: caractérisation de la nature, de l'origine et des processus de transport des particules organiques, minérales et biologiques. Colloque SNO Karst, Bordeaux.