

Les fontis du val d'Orléans : étude des mécanismes de formation afin d'améliorer la prévision

Jérôme Perrin, Sylvain Pasquier, Alexis Gutierrez, Damien Salquebre, Emilie Vandoudheusden, Emmanuelle Joigneaux, Christophe Chateau, Audrey Guirimand-Dufour, Nevila Jozja, Christian Défarge, et al.

▶ **To cite this version:**

Jérôme Perrin, Sylvain Pasquier, Alexis Gutierrez, Damien Salquebre, Emilie Vandoudheusden, et al.. Les fontis du val d'Orléans : étude des mécanismes de formation afin d'améliorer la prévision . Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG 2016, Jul 2016, Nancy, France. hal-01338751

HAL Id: hal-01338751
https://brgm.hal.science/hal-01338751

Submitted on 29 Jun 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES FONTIS DU VAL D'ORLEANS : ETUDE DES MECANISMES DE FORMATION AFIN D'AMELIORER LA PREVISION

VAL D'ORLEANS SINKHOLES : STUDYING THE PROCESSES LEADING TO THEIR OCCURRENCE IN VIEW TO BETTER ANTICIPATE COLLAPSE

Jérôme PERRIN[1], Sylvain PASQUIER[1,2], Alexis GUTIERREZ[1], Damien SALQUEBRE[3], Emilie VANDOUDHEUSDEN[4], Emmanuelle JOIGNEAUX[5], Christophe CHATEAU[5], Audrey GUIRIMAND-DUFOUR[2], Nevila JOZJA[2], Christian DEFARGE[2,6], Stéphane BINET[6]

[1] *D3E, BRGM, Avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans [Je.perrin@brgm.fr]*
[2] *CETRAHE, Université d'Orléans, 45072 Orléans*
[3] *DAT-Centre, BRGM, Avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans*
[4] *DAT-Auvergne, BRGM, 12 avenue des Landais, 63170 Aubière*
[5] *DSA Technologies, 595 rue de la Goudronnerie, 45400 Semoy*
[6] *ISTO, CNRS - Université d'Orléans - BRGM, 45071 Orléans*

RÉSUMÉ – L'apparition de fontis dans le Val d'Orléans est un phénomène récurrent qui peut avoir des conséquences économiques significatives. L'origine des fontis est liée à la présence de cavités karstiques dans les calcaires de Beauce sous couverture alluviale. Les suivis de nappe sur un site expérimental montrent que les périodes de décrue sont favorables au soutirage. Le développement d'un capteur de déformation offre des perspectives pour le suivi des déformations pouvant précéder l'effondrement.

ABSTRACT – Occurrence of collapse sinkholes is widespread in Val d'Orléans and can have significant economic consequences. The sinkhole origin is due to a mantled karst setting with karstified limestone covered by alluvial deposits. Piezometric monitoring at an experimental site shows that decreasing limbs of flood events are favourable periods for suffosion process. The development of low-cost deformation sensors offers perspectives for ground subsidence monitoring preceding collapse.

1. Introduction

L'apparition de fontis dans le Val d'Orléans est un phénomène récurrent (Figure 1) qui peut avoir des conséquences économiques et sociétales significatives (impactant des secteurs habités et d'activités commerciales, des infrastructures telles que digues, routes, ponts, etc.) (Donsimoni *et al.*, 2008 ; Dore et Mathon, 2011 ; Gombert *et al.*, 2015).

L'origine des fontis est liée à la présence de cavités karstiques dans les calcaires de Beauce situés sous une couverture peu épaisse d'alluvions déposées par la Loire (Lorain, 1972 ; Lepiller, 2006 ; Gutierrez et Binet, 2010). Deux mécanismes de formation sont envisagés : 1) le soutirage des matériaux de couverture vers les cavités karstiques entraînant la formation d'un vide au sein des alluvions qui va progressivement remonter jusqu'à atteindre la surface ; 2) la rupture du toit d'une cavité karstique suite à une évolution de la taille du vide et/ou des variations de pression hydrostatique et/ou une fragilisation du toit calcaire.

Dans le cadre du projet de recherche iFontis, un site expérimental a été mis en place dans un secteur très impacté par l'apparition de fontis (Figure 1). Ce site se situe à environ 200 m de la Loire en rive Sud, sur et à proximité d'une digue. Un fontis de taille significative (10x5 m, Figure 2) empiète sur le pied de digue côté Loire : sa présence est

attestée sur la carte de Desprez (1976) où il est cartographié comme « doline », sa partie nord s'est cependant réactivée en automne 2013 (constat lors d'une visite de site). En outre, un nouveau fontis de 1 m de diamètre est apparu en décembre 2013 dans un champ à proximité. Proche de ce deuxième fontis, un autre fontis, désormais rebouché, était apparu en novembre 2008. Le site a été équipé de trois piézomètres (2 au calcaire, 1 aux alluvions) permettant la mesure des niveaux d'eau, de la conductivité, température et de la turbidité. Les potentiels mouvements de terrain sont suivis par le nivellement mensuel de jalons scellés dans le sol répartis sur l'emprise du fontis principal et ses alentours. Fin 2015, des capteurs de déformation ont été progressivement installés sur certains jalons afin d'obtenir des mesures à haute résolution temporelle de l'accélération et l'inclinaison. Le suivi en continu de ces paramètres a pour objectif de préciser les mécanismes évolutifs menant à la rupture.

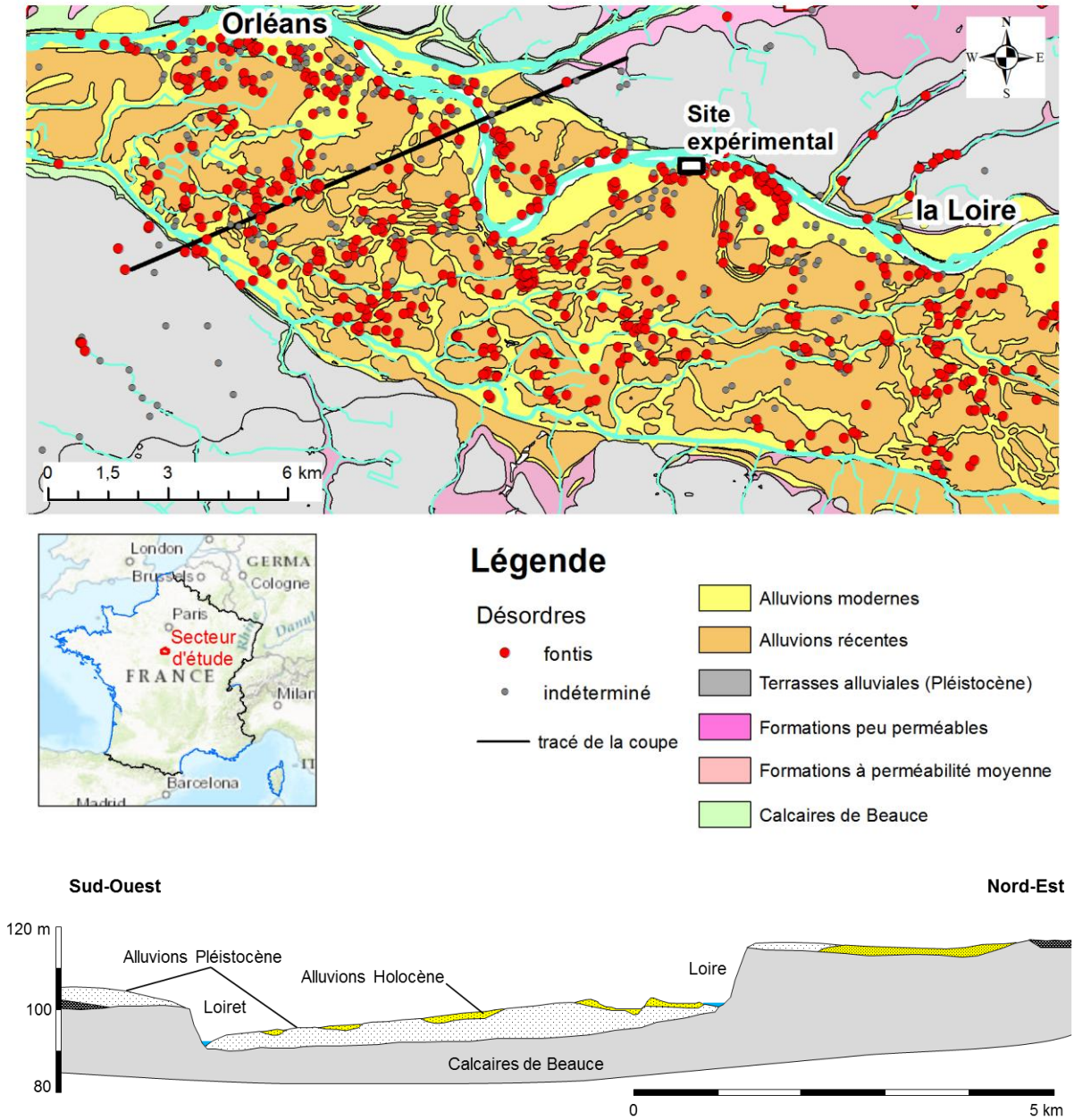


Figure 1. Carte de la zone d'étude, situation du site expérimental et coupe géologique à travers le Val.

2. Résultats

Le fontis a été topographié en début de suivi (Figure 2) : il a une forme ovale avec le grand axe orienté SO-NE ; la partie SO descend en pente douce sur environ 6 m (2 m de dénivellation entre les jalons J1 et J4) puis un ressaut vertical de 1.3 m conduit à la partie la plus profonde du fontis au niveau de J5n ; à cet endroit, les pentes sont sub-verticales suite à la réactivation récente du fontis d'abord en automne 2013 puis en août 2014 (approfondissement estimé à 60 cm lors de ce 2ème évènement).
Depuis cette date, des nivellements mensuels sur les jalons J1 à J5n ont montré que le fontis ne s'était pas approfondi dans sa partie ancienne (J2, J3, J4) ; par contre la partie récente (J5n) s'est progressivement approfondie entre avril 2015 et janvier 2016 de près de 1 cm. En parallèle, les pentes ont évolué avec l'apparition de petites loupes de glissement, fissures, tassement (Figure 2).

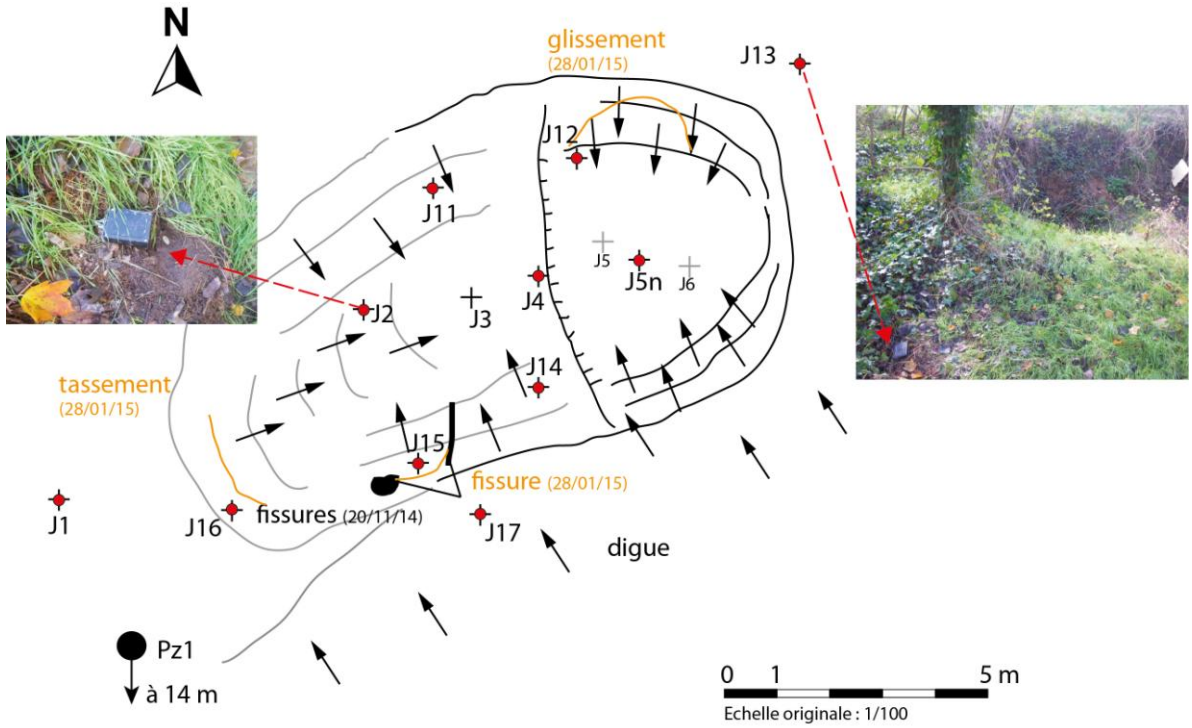


Figure 2. Topographie du fontis (les dates indiquées correspondent aux dates d'observation) et répartition des jalons (J) sur lesquels ont été installés les capteurs de déformation (photos). Le jalon J5n correspond à la partie la plus profonde du fontis.

Un profil géophysique (tomographie électrique) a été réalisé selon un transect nord-sud perpendiculaire à la digue et au grand axe du fontis. Les résultats permettent de préciser la position du toit du calcaire, d'identifier les secteurs plus karstifiés pouvant correspondre à des anomalies plus conductrices au sein des calcaires (D2, D3, Figure 3) et de visualiser l'enracinement du fontis actif dans les calcaires (anomalie plus conductrice, Figure 3). Sur la base de ces interprétations, les piézomètres Pz1, Pz2bis et Pz3bis ont été installés le long du transect au niveau des anomalies conductrices.

Les deux forages au calcaire (Pz1 et Pz3bis) ont atteint la base des alluvions à une profondeur conforme aux interprétations géophysiques (15 m sous la surface incluant 8 m de corps de digue pour Pz1, 9 m sous la surface pour Pz3bis) puis ont chacun recoupé un drain karstique actif à respectivement 24 m et 17 m sous la surface. De plus, Pz3bis a

recoupé à 20 m sous la surface une zone productive avec une eau très turbide qui a été interprétée comme un conduit colmaté. Le toit des calcaires est altéré et perméable comme attesté par les pertes de circulation observées lors de la réalisation des forages. Une inspection télévisée sur Pz1 confirme la présence d'un conduit karstique de section allongée et dont la superficie a été estimée à 1 m^2. L'écoulement dans le conduit est attesté par le déplacement de particules observé sur la vidéo et par la présence d'une anomalie de conductivité et température.

Des essais de traçage ont montré que les deux conduits sont alimentés par des pertes de Loire situées 750 m en amont du site ; les deux conduits sont distincts. L'interprétation des résultats du traçage avec injection au fontis indique l'absence de communication avec les conduits recoupés par les forages ; il semble donc qu'un troisième conduit karstique passe sous le fontis.

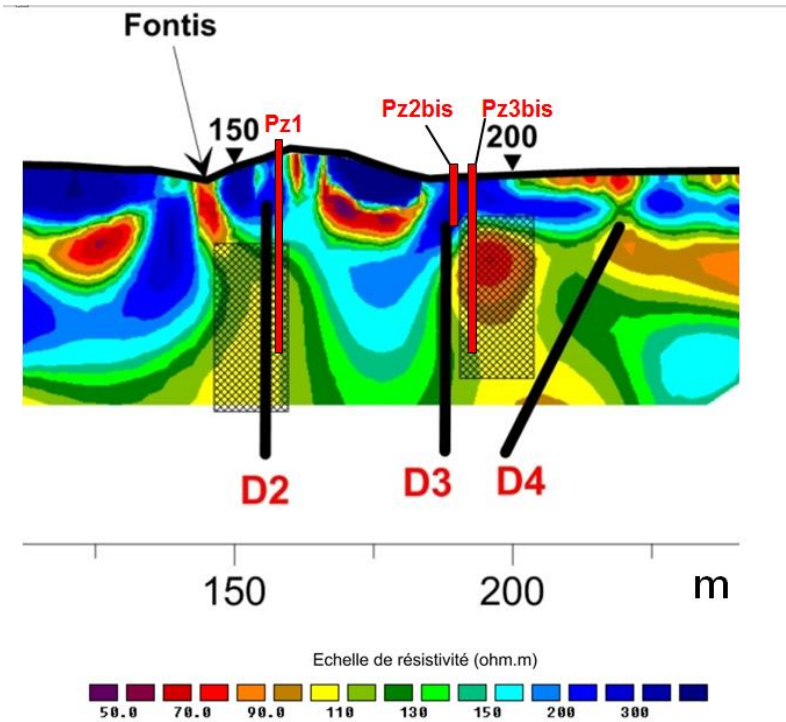


Figure 3. Détail du profil de tomographie électrique avec localisation du fontis, des secteurs plus karstifiés D2 et D3 et des trois piézomètres (barres rouges).

Les résultats du suivi piézométrique (Figure 4) montrent des variations pluri-métriques à l'échelle saisonnière et métrique à l'échelle d'une crue ; ces variations sont similaires dans la nappe des alluvions et la nappe karstique. Elles sont synchrones des fluctuations de niveaux d'eau mesurés sur la Loire (Figure 4). Toutefois l'amplitude des variations est plus importante dans les piézomètres.

En période de décrue, un déphasage est visible entre les nappes alluviale et calcaire sur la période hivernale 2014-2015 (Figure 4). Ce déphasage peut s'expliquer par la différence de diffusivité entre les deux nappes. Ce déphasage n'est plus détectable à partir du printemps 2015 ; cela peut être dû à des niveaux de nappe plus bas ou éventuellement à un changement du comportement du piézomètre aux alluvions Pz2bis suite à des prélèvements par pompage (développement de l'ouvrage résultant en une meilleure connectivité hydraulique). La charge plus importante dans la nappe alluviale pendant les périodes de décrue est un élément pouvant favoriser le soutirage d'alluvions vers le karst. En effet, le différentiel de charge entre les deux nappes oriente les

écoulements de la nappe alluviale vers la nappe calcaire permettant l'entraînement de matières en suspension issues de la couverture.

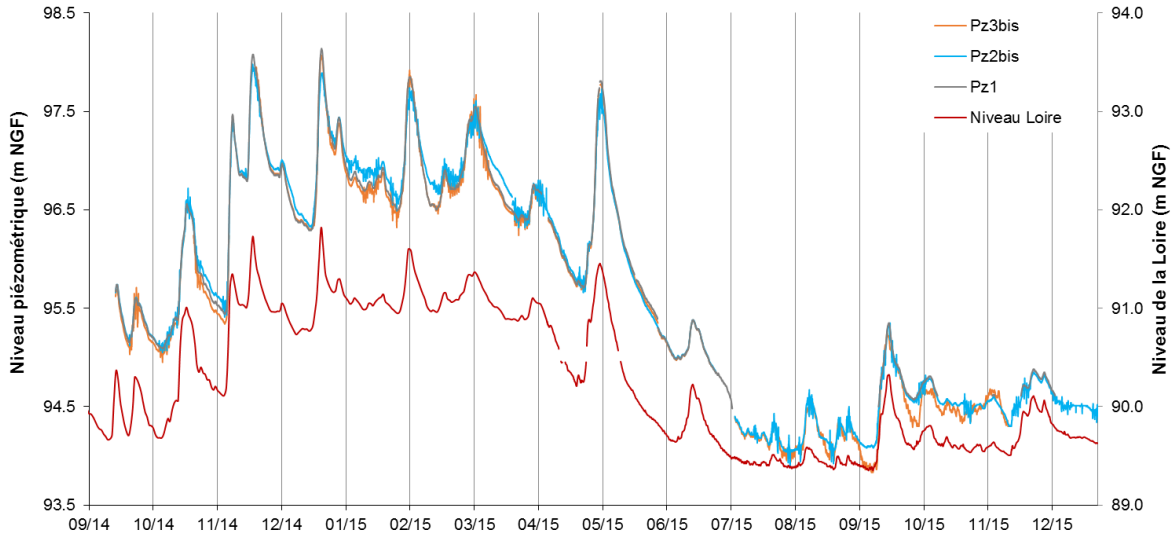


Figure 4. Suivi des nappes alluviale (Pz2bis) et karstique (Pz1 et Pz3bis) et évolution concomitante du niveau de la Loire à Orléans (15 km en aval) pour la période allant de Septembre 2014 à Décembre 2015.

Les données géologiques et hydrogéologiques collectées lors de la mise en place du site expérimental et son suivi sur une année permettent de proposer une coupe hydrogéologique synthétique (Figure 5). Il apparait qu'en période d'étiage, il est possible qu'une partie des formations alluviales soit désaturée ; en outre en période de hautes eaux, la zone non saturée entre le fond du fontis et le toit de la nappe alluviale ne fait plus qu'environ 2,5 m d'épaisseur.

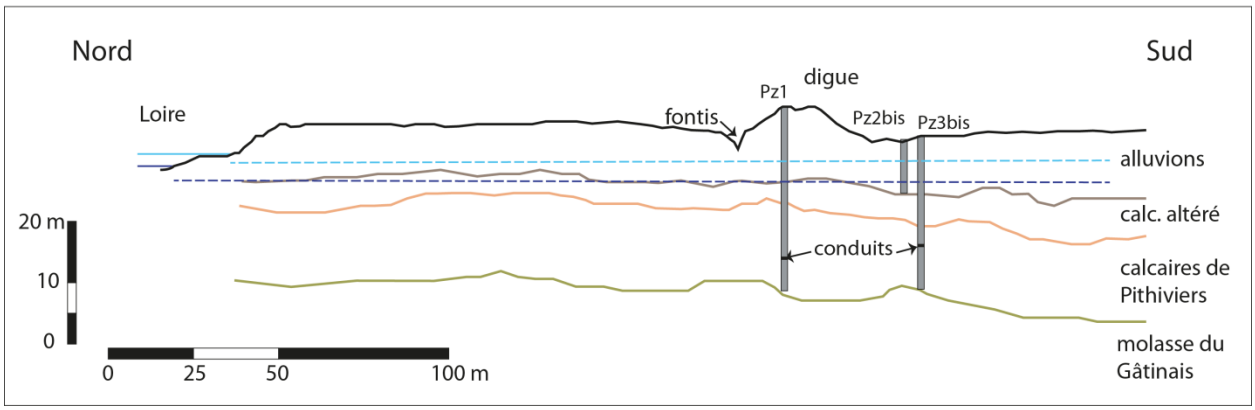


Figure 5. Coupe hydrogéologique du site d'étude

Les mesures de nivellement effectuées chaque mois ont été comparées au premier nivellement réalisé (03/09/2014) qui est considéré comme le nivellement de référence. Les déplacements des jalons mesurés tout au long du suivi du site sont très faibles (inférieurs à 3 mm pour J2, J3, J4 et jusqu'à 8 mm pour J5n) (Figure 5). Les variations observées sur les trois premiers jalons sont imputables à l'incertitude sur la mesure ; la baisse progressive observée au point bas du fontis sur J5n pourrait indiquer un phénomène naturel d'approfondissement lent.

Les capteurs de déformation illustrés Figure 2 ont été installés fin 2015 lors d'une phase de test, puis définitivement en Février 2016. Les chroniques disponibles sont à ce stade très fragmentaires ; cependant aucun mouvement de terrain n'a été observé.

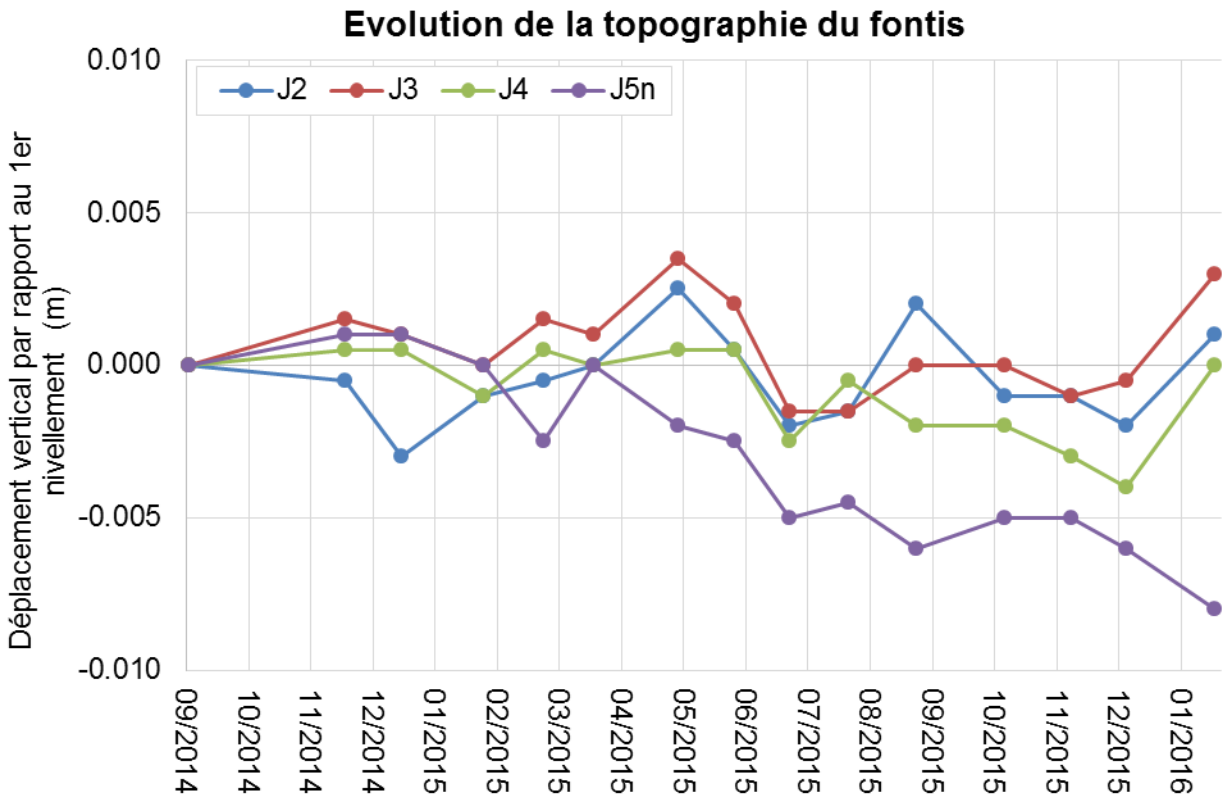


Figure 5. Evolution de la topographie du fontis selon le grand axe jalonné par J2, J3, J4 et J5n. Les mesures ont été effectuées par nivellement au pas de temps mensuel. Le déplacement vertical correspond à un déplacement vertical par rapport à la première mesure réalisée le 03/09/2014

3. Discussion et conclusions

Les différences de charge observées entre la nappe des alluvions (Pz2bis) et la nappe des calcaires (Pz1, Pz3bis) sont au maximum de 10 cm. De telles différences de charge donnent des vitesses d'écoulement verticales au sein des alluvions de l'ordre 5 x 10^{-6} m/s en se basant sur des paramètres hydrodynamiques typiques de la nappe alluviale (perméabilité de 10^{-5} m/s et porosité efficace de 10%) et sur une épaisseur saturée de 2 m.

Des vitesses d'écoulement critiques permettant le soutirage de particules ont été estimées par des modèles expérimentaux pour différentes conditions de site en Chine : 6,5 10^{-3} m/s pour des formations argileuses, 1,46 10^{-3} m/s pour du sable (Lei et al. 2002), 8,8 10^{-5} m/s pour une formation cohésive argileuse (Jiang et al. 2015) et 1,5 10^{-4} m/s pour un sol sableux cohésif au Japon (Sato & Kuwano 2015).

Même si ces données expérimentales ne correspondent pas au contexte du Val d'Orléans, il semblerait que les vitesses verticales estimées pour le site expérimental ne soient pas suffisantes pour permettre l'entrainement de particules par un simple flux d'eau entre nappe alluviale et nappe des alluvions. Cette interprétation très préliminaire

mériterait d'être étayée par des données hydrogéologiques complémentaires et une détermination de la vitesse critique d'entrainement propre aux alluvions du Val.

Outre les différences de charge entre les deux nappes, il est possible que l'amplitude des battements de nappe et la position de ces battements par rapport à l'interface alluvions-calcaire puissent jouer un rôle sur l'apparition des fontis et donc la répartition spatiale des fontis. Une étude plus spécifique pourrait être réalisée afin de confirmer ce lien ; une confirmation permettrait de réelles avancées pour la cartographie des secteurs les plus susceptibles à l'apparition de fontis. Dans la littérature, l'étude de Newton (1987) sur les karsts sous couverture de l'Est des Etats-Unis décrit de manière conceptuelle l'influence d'un battement de nappe à l'interface couverture-karst sur le processus de soutirage.

En terme de surveillance de ce risque géologique, la piste la plus concrète à ce stade est la mise en place de capteurs de déformation sur et aux alentours d'un site sensible. De tels capteurs ont été développés dans le cadre du projet iFontis. Leur fonctionnement a été validé au laboratoire et les premières mesures ont été acquises sur le site expérimental. Le suivi va se poursuivre et devrait amener des enseignements précieux sur la capacité de tels capteurs à détecter de légères déformations souples en surface pouvant annoncer l'imminence d'un évènement brutal (effondrement).

Remerciements : *cette étude a bénéficié de la collaboration de plusieurs personnes ayant apporté un soutien technique et/ou logistique précieux, nous tenons à remercier en particulier Odile de Chalus, Denis Trassebot, Gilbert Delahaye et l'Association de Spéléologie Subaquatique du Loiret. L'étude a bénéficié du soutien financier du Conseil Départemental du Loiret dans le cadre de l'appel à projet innovant 2013.*

4. Références bibliographiques

Desprez N. (1976). Val d'Orléans à l'Est d'Orléans (Loiret) : étude hydrogéologique. *Rapport BRGM 76 SGN 109 BDP*.

Donsimoni M., Berthier H., Martin J.C., Nachbaur A. (2008). Détermination de la présence de karsts sous les levées domaniales du bassin de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels - Tranche 1 : analyse géologique et hydrogéologique. *Rapport BRGM/RP-55711-FR*.

Dore L., Mathon D. (2011). Essai de cartographie de l'aléa « effondrement karstique » dans le Val d'Orléans. *Jounées techniques de l'IFSTTAR, Cabourg, 8-10 nov. 2011*.

Gombert P., Orsat J., Mathon D., Alboresha R., Al Heib M., Deck O. (2015). Rôle des effondrements karstiques sur les désordres survenus sur les digues de Loire dans le Val d' Orléans (France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment 74, pp. 124-140*.

Gutierrez A., Binet S. (2010). La Loire souterraine : circulations karstiques dans le val d'Orléans. BRGM – La Loire, agent géologique. *Géosciences Magazine, n° 12, décembre 2010, pp. 42-53.*

Jiang F., Lei M., Jiang-ling D. (2015). Study on the critical velocity of groundwater to form subsidence sinkholes in a karst area. *14th Sinkhole conference, NCKRI Symposium 5, pp. 531-536.*

Lei M.T., Jiang X.Z., Li Y. (2002). New advances in karst collapse research in China. *Environmental Geology 42 (5), pp. 462-468.*

Lepiller M. (2006). Val d'Orléans. *In: Aquifères et eaux souterraines en France, J.-C. Roux éditeur, BRGM I, pp. 200-214.*

Lorain J.M. (1972). La géologie du calcaire de Beauce. In : géologie – hydrogéologie applications en construction routière et génie civil. *Compte-rendu des journées d'études des 8 et 9 juin 1972 à Blois organisées par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées et le Laboratoire régional de Blois, pp. 14-53*.

Newton J.G. 1987. Development of sinkholes resulting from man's activities in the Eastern United States. *USGS Circular 968, 54 p.*

Sato M., Kuwano R. (2015). Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil. *Soils and Foundations. http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2015.10.008*