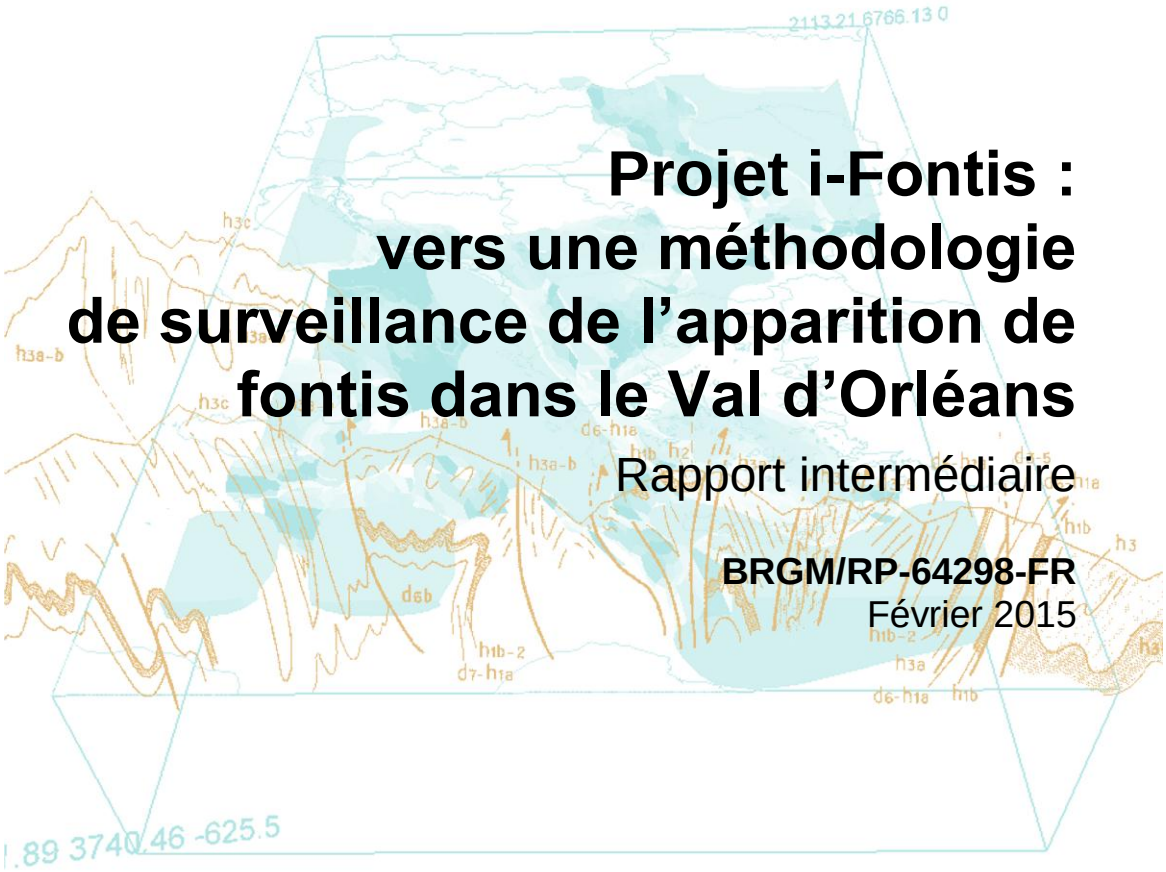
Document public



Projet i-Fontis : vers une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis dans le Val d'Orléans

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-64298-FR
Février 2015

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Projet i-Fontis : vers une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis dans le Val d'Orléans

Rapport intermédiaire

BRGM/RP- 64298-FR
Février 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Recherche du BRGM

Je. Perrin, E. Joigneaux et C. Château (DSA Technologies), N. Jozja (CETRAHE), C. Défarge (CETRAHE, ISTO), S. Binet (ISTO)
Avec la collaboration de
A. Guirimand-Dufour (CETRAHE), F. Matthieu, G. Ledocq (élève-ingénieur Polytech'Orléans)

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : E. Vanoudheusden	Nom : N. Dörfliger
	Fonction : Directrice D3E
Date : 10/02/2015	Date : 16/02/2015
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : fontis, effondrement, karst, Val d'Orléans, surveillance, piézomètre, capteurs, traçage

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

Perrin Je., Joigneaux E., Château C., N. Jozja, Défarge C., Binet S. (2015) – Projet i-Fontis : vers une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis dans le Val d'Orléans. Rapport intermédiaire. BRGM/RP- 64298 -FR, 40 p., 25 ill., 4 ann.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Cette étude s'inscrit dans le cadre des projets de recherche innovants cofinancés par le Conseil Général du Loiret. Elle est réalisée dans le cadre d'un partenariat entre des Instituts de recherche (BRGM, CETRAHE, ISTO) et une Entreprise (DSA Technologies) ; le projet a démarré en février 2014 et court sur deux ans. Ce rapport intermédiaire présente l'état d'avancement et les résultats obtenus après une année et sera complété par un rapport final à la fin du projet.

L'apparition de fontis dans le Val d'Orléans est un phénomène récurrent qui peut avoir des conséquences économiques et sociétales significatives. L'origine des fontis est liée à la présence de conduits naturels (conduits dits karstiques) formés par la dissolution des calcaires de Beauce qui constituent le substratum du Val sous une couverture peu épaisse d'alluvions : le soutirage de sédiments meubles des alluvions dans les conduits karstiques entraîne une perte de matière dans la couverture qui peut résulter en la déstabilisation de celle-ci jusqu'en surface pour former un fontis. Plusieurs études dans différentes régions karstiques montrent comment les phénomènes hydrologiques peuvent être des déclencheurs de fontis : ré-infiltration des eaux, baisse de la nappe phréatique, fluctuations de la nappe, etc. Cependant aucune étude ne présente de résultats détaillés avec des mesures de paramètres physiques dans la nappe et des observations concomitantes de déformations en surface à l'échelle d'un site.

Ce projet a donc pour objectif scientifique de progresser dans la compréhension des processus physiques menant à l'apparition de fontis. Une réflexion pourra ensuite être menée sur les pistes de développement d'une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis dans une perspective de gestion du risque.

Dans ce but, un site expérimental sur les territoires communaux de Jargeau et Darvoy et à cheval sur un tronçon de digue de Loire a été instrumenté et comprend trois piézomètres (deux dans les calcaires et un dans les alluvions) pour la mesure en continu des niveaux d'eau et des paramètres physico-chimiques de la nappe, et des jalons pour le suivi des déformations de surface par nivellement. Dès le début de l'année 2, des capteurs de déformation seront installés en surface et le suivi du site sera complétement opérationnel. Les données sont enregistrées automatiquement sur un acquisiteur puis télétransmises sur une plateforme (SIDEV) développée par l'Entreprise partenaire DSA Technologies.

En parallèle de l'instrumentation, une caractérisation hydrogéologique du site a été réalisée (essai de pompage, essais de traçage, diagraphies) et a permis de montrer la présence de conduits karstiques actifs dans les calcaires et leur connexion avec des pertes en Loire en amont.

La poursuite des mesures en année 2 du projet et l'interprétation des données permettra d'une part d'affiner le modèle de fonctionnement hydrogéologique du site et d'autre part de progresser dans la compréhension des processus en jeu lors de l'effondrement dans le sous-sol et la formation du fontis en surface.

Par le biais de ce projet, les Instituts de recherche pourront développer leur expertise sur le risque géologique associé à l'effondrement de cavités naturelles et l'Entreprise associée renforcera son offre dans le domaine du monitoring environnemental et de gestion des risques naturels.

Sommaire

1. Introduction 9

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS 9

1.2. LES EFFONDREMENTS D'ORIGINE KARSTIQUE DANS LE VAL D'ORLEANS 10

1.3. ORGANISATION ET GESTION DU PROJET 12

1.4. ETAT D'AVANCEMENT DU PROJET 13

2. Choix du site expérimental 17

2.1. SITE DE JARGEAU/DARVOY 17

2.2. SITE DE SAINT-PRYVE SAINT-MESMIN 20

2.3. SITE DE L'ILE CHARLEMAGNE 21

2.4. COMPARAISON DES SITES 23

3. Conception du suivi du site 24

3.1. DESIGN DU SITE EXPERIMENTAL 25

3.2. CAPTEURS SELECTIONNES ET PARAMETRISATION 26

3.2.1. Capteurs de niveau et physico-chimiques 26

3.2.2. Acquisiteurs 26

3.2.3. Capteurs de déformation 26

4. Equipement du site 27

4.1. FORAGES DES PIEZOMETRES 27

4.2. INSTRUMENTATION DU SITE EXPERIMENTAL 29

5. Suivi du site expérimental 31

6. Analyse et interprétation des données 33

6.1. ESSAI DE POMPAGE 33

6.2. ESSAIS DE TRAÇAGE 34

6.2.1. Points d'injection 35

6.2.2. Points de surveillance et mode de suivi 35

6.2.3. Déroulement des injections et quantités injectés 35

6.2.4. Résultats complets et interprétation 36

6.3. DIAGRAPHIES SUR PZ1 ET PZ3BIS 39

7. Perspectives et Conclusions 41

8. Bibliographie 43

Liste des illustrations

Illustration 1 - Compilation des données de Desprez 1976, 1977, BD-cavités, Donsimoni 2008, CETE, carte géologique 1/50 000 10

Illustration 2 - Effondrement d'une habitation suite à l'apparition d'un fontis, St-Pryvé-St-Mesmin, 22 mai 2010 11

Illustration 3 - Schéma illustrant la formation d'un fontis par soutirage/suffosion des particules fines vers les conduits karstiques puis effondrement de la cloche de fontis dans le contexte du val d'Orléans (Maurin 2012) 11

Illustration 4 - Schéma illustrant l'apparition d'un fontis par effondrement soudain du toit calcaire d'un conduit karstique dans le contexte du val d'Orléans 11

Illustration 5 - Organigramme du projet i-Fontis 12

Illustration 6 - Carte indiquant les fontis connus et les forages dans les environs du site expérimental potentiel de Jargeau/Darvoy 18

Illustration 7 - Photos des fontis apparus récemment à proximité immédiate du site de Jargeau/Darvoy : en haut fontis en pied de digue s'étant réactivé à l'automne 2013 (F1), en bas à gauche fontis apparu en Décembre 2013 (F2), en bas à droite fontis apparu en Novembre 2008 (F3, document SSL) 19

Illustration 8 - Carte indiquant les fontis connus et les forages dans les environs du site expérimental potentiel de Saint-Pryvé Saint-Mesmin. 20

Illustration 9 - Carte indiquant les fontis connus et les forages dans les environs du site expérimental potentiel de l'île Charlemagne 21

Illustration 10 - En haut image du fontis ouvert en aout 2007 avant et après traitement ; en bas déformation de la chaussée en sommet de digue potentiellement causé par le soutirage karstique 22

Illustration 11 - Tableau récapitulatif de l'évaluation des trois sites expérimentaux pré-sélectionnés : 1 indique un critère très favorable, 0.5 un critère moyennement favorable, 0 un critère peu ou pas favorable 23

Illustration 12 - Schéma de fonctionnement fontis-aquifère karstique : flux d'eau (flèches bleues), flux de matière en suspension (flèches oranges) 24

Illustration 13 - Détail du profil de tomographie électrique avec localisation des trois piézomètres prévus (barres rouges) 25

Illustration 14 - Carte de localisation des ouvrages finalisés (Pz1, Pz2bis et Pz3bis) et comblés (Pz2 et Pz3) (Source : IGN – extrait de carte au 1/25000 au-dessus, photo aérienne – BD Carto en-dessous) 27

Illustration 15 - Réalisation du forage Pz1 en sommet de digue 28

Illustration 16 - Installation de jalons dans le fontis principal (F1) : à gauche jalons J2, J3, J4 ; à droite jalons J5 & J6 30

Illustration 17 - carte de localisation des forages et liste des paramètres enregistrés sur Pz3 tels que présentés sur la plateforme SIDEV 31

Illustration 18 - Exemple d'une chronique de mesures sur le piézomètres Pz1 tel que présentée sur la plateforme SIDEV 32

Illustration 19 - Résultats obtenus lors de l'essai de pompage (débits et niveaux d'eau observés) 33
Illustration 20 - Interprétation du pompage d'essai à l'aide du logiciel Ouaip (BRGM). 34
Illustration 21 - Courbe de décroissance des concentrations en chlorures au piézomètre Pz2bis (suivi conductimètre) 37
Illustration 22 - Courbe de décroissance des concentrations en sulforhodamine B au piézomètre Pz3bis (suivi fluorimètre de terrain GGUN FL-24) 37
Illustration 23 - Courbes de restitution de naphtionate de sodiumà l'exhaure du Pz1 (courbe verte) et au piézomètre Pz3bis (courbe marron) 38
Illustration 24 - Diagraphies de température et de turbidité sur la partie trou nu de Pz1 (réalisées le 13/09/2014 16h00-16h40) 39
Illustration 25 - Diagraphies de température et de sulforhodamine sur la partie trou nu de Pz3bis (réalisées le 11/09/2014 18h45-19h15) 40

Liste des annexes

Annexe 1 - Levés géophysiques (tomographie électrique) sur le site expérimental de Jargeau/Darvoy 45
Annexe 2 - Logs géologique et technique des forages 55
Annexe 3 - Descriptif complet des opérations de traçage et résultats des analyses des eaux aux points d'injection et de suivi avant ces opérations 61
Annexe 4 - Analyse des ions chlorures à l'exhaure 65

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS

Cette étude s'inscrit dans le cadre des projets de recherche innovants cofinancés par le Conseil Général du Loiret (réponse à l'AAP projets innovants 2013). Elle a démarré en février 2014 et court sur deux ans. Ce rapport intermédiaire présente l'état d'avancement et les résultats obtenus après une année et sera complété par un rapport final à la fin du projet.

L'apparition de fontis dans le Val d'Orléans est un phénomène récurrent (Illustration 1) qui peut avoir des conséquences économiques et sociétales significatives (p.ex. villa à St-Pryvé en 2010 - Illustration 2, chaussée de l'autoroute A71 en novembre 2012, etc.). L'occurrence de fontis sous les digues de Loire fait craindre une déstabilisation/rupture locale de celles-ci avec les risques d'inondation qui pourraient en découler.

Ce projet doit permettre de progresser dans la compréhension des processus physiques menant à l'apparition de fontis. Sur cette base, des pistes de développement d'une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis vont être recherchées dans une perspective de gestion du risque.

D'un point de vue scientifique (compréhension des processus), les résultats attendus sont :

- Détermination des relations entre charges hydrauliques rivière/alluvial/karst et flux de matière dans le conduit.

- Détection de l'existence potentielle de seuils hydrauliques à partir desquels le soutirage est actif, *a contrario* devient inactif.

- Quantification des flux de matière dans les conduits et origine de la matière (turbidité de la Loire, alluvions, digue).

D'un point de vue méthodologique, les résultats attendus sont :

- Le développement de capteurs de déformation bas coût permettant la télétransmission des données (DSA Technologies).

- Une réflexion sur la possibilité de développer une méthodologie de surveillance de fontis basée sur les résultats et l'interprétation du suivi qui pourra le cas échéant faire l'objet d'un dépôt de brevet et constituer une plus-value pour les organismes participant au projet (acquisition d'une expertise spécifique, nouvelle méthodologie applicable à d'autres sites, etc.).

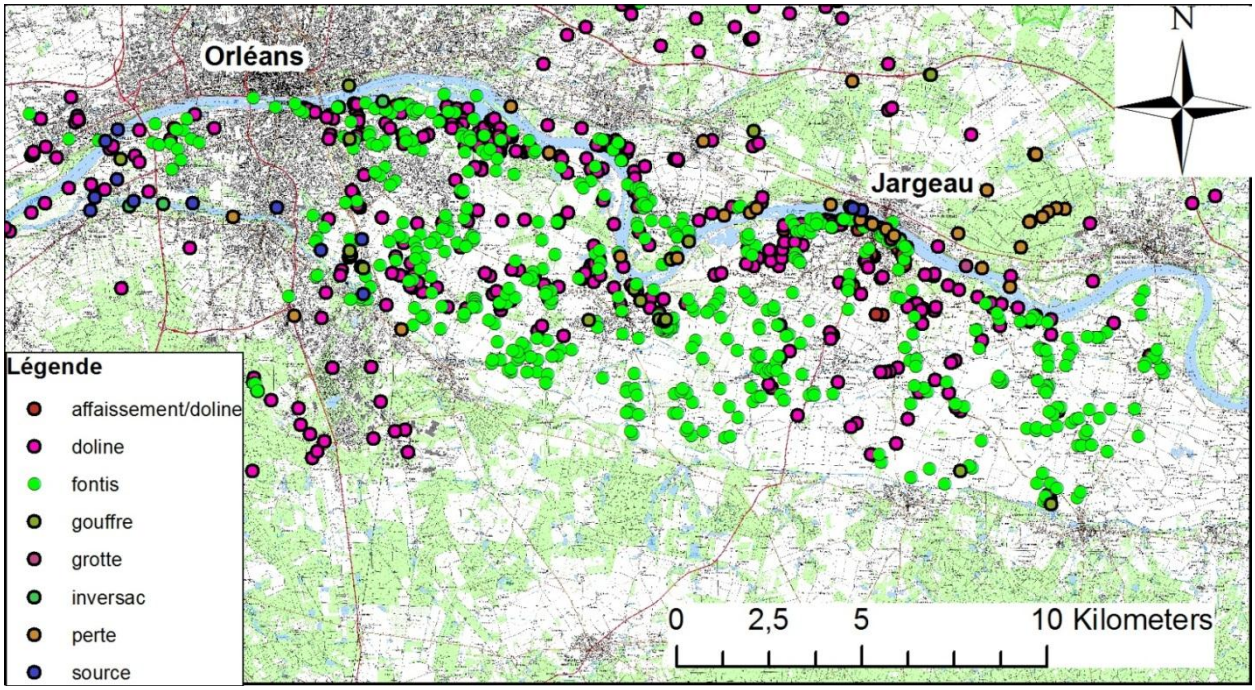


Illustration 1 – Compilation des données de Desprez 1976, 1977, BD-cavités, Donsimoni 2008, CETE, carte géologique 1/50 000

1.2. LES EFFONDREMENTS D'ORIGINE KARSTIQUE DANS LE VAL D'ORLEANS

L'origine des fontis est liée à la karstification des calcaires de Beauce qui forment le substratum du Val sous une couverture peu épaisse d'alluvions (Gutierrez & Binet 2010). Deux types de processus sont à l'origine de l'apparition de fontis :

1) le soutirage de sédiments meubles des alluvions dans les conduits karstiques entraîne une perte de matière dans la couverture qui peut résulter en la déstabilisation de celle-ci jusqu'en surface pour former un fontis (Illustration 3) ;

2) la rupture du toit calcaire d'un conduit naturel et l'effondrement des terrains meubles sus-jacent (Illustration 4).

L'aléa des effondrements liés au karst est en général approché par la combinaison de deux facteurs : la susceptibilité de présence d'une cavité karstique et la susceptibilité d'effondrement au droit d'une cavité potentiellement existante (Donsimoni *et al.* 2008, Nachbaur & Rohmer 2011). La qualification de l'intensité du désordre en surface (dimensions du fontis, pentes de l'affaissement) complète l'évaluation de l'aléa. A l'échelle du Val, l'aléa effondrement karstique est relativement élevé puisque les calcaires de Beauce sont intensément karstifiés et la couverture alluviale ne peut stopper la propagation d'une cloche de fontis.

Un troisième facteur à prendre en compte est le **processus déclencheur** de l'apparition de fontis. Pour le Val d'Orléans les variations de débit de la Loire et le contraste de diffusivité entre aquifères karstique et alluvial ont été suggérés (Dore et Mathon 2011). Cependant aucune étude spécifique n'a permis de dépasser le stade des hypothèses sur les processus physiques hydrologiques à l'origine de l'apparition de fontis liés aux cavités karstiques.

Sur la base d'une étude bibliographique plus large (Del Prete *et al.* 2010, Doctor *et al.* 2008, Hyatt et Jacobs1996, Kaufmann & Quinif 2002, Patton & Klein 1989, Waltham 2008), il semble clair que les processus hydrologiques jouent un rôle prépondérant (réinfiltration d'eau, baisse ou fluctuations de niveaux piézométriques, etc.).

Illustration 2 - Effondrement d'une habitation suite à l'apparition d'un fontis, St-Pryvé-St-Mesmin, 22 mai 2010

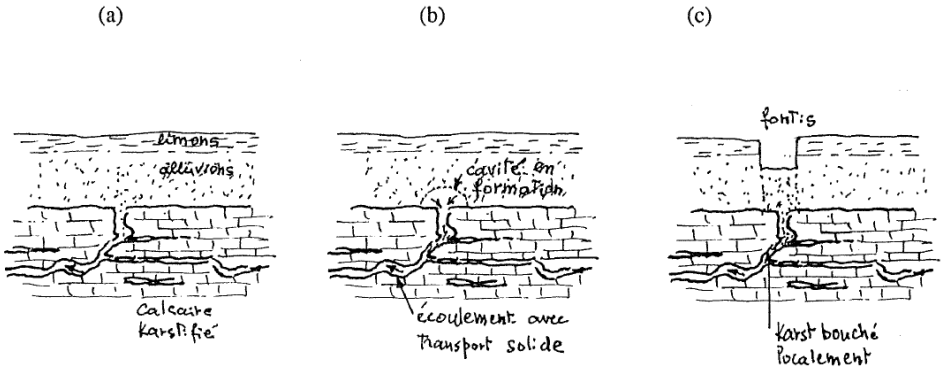


Illustration 3 – Schéma illustrant la formation d'un fontis par soutirage/suffosion des particules fines vers les conduits karstiques puis effondrement de la cloche de fontis dans le contexte du val d'Orléans (Maurin 2012)

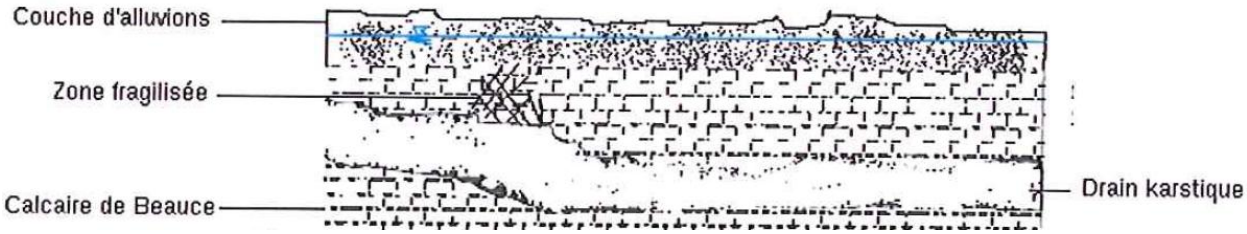


Illustration 4 – Schéma illustrant l'apparition d'un fontis par effondrement soudain du toit calcaire d'un conduit karstique dans le contexte du val d'Orléans

1.3. ORGANISATION ET GESTION DU PROJET

Le projet i-Fontis est constitué de 6 tâches (Illustration 5), les tâches 1 à 5 correspondant aux phases successives des opérations techniques du projet et la tâche 6 au suivi du projet et à la dissémination des résultats. Les résultats des tâches 1 à 5 sont présentés en autant de chapitres dans la suite du rapport.

Le projet est piloté par le BRGM et des réunions d'avancement régulières sont organisées. Sur la première année du projet, une réunion de lancement de projet et six réunions d'avancement ont été réalisées. Se réunissent les partenaires du projet (BRGM, DSA, CETRAHE et ISTO) ainsi que des représentants d'une association spéléologique locale (Spéléologie Subaquatique Loiret). De plus une réunion du comité scientifique du projet s'est tenue en fin d'année 1 (janvier 2015) et une seconde réunion du comité scientifique sera organisée en fin de projet.

Une convention de collaboration est en cours de finalisation entre les différents partenaires du projet.

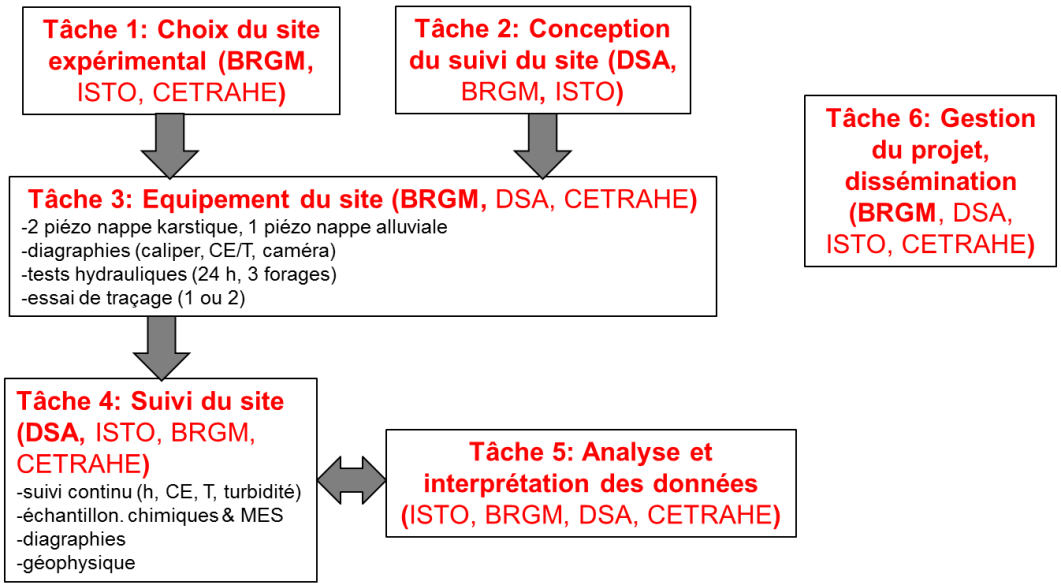


Illustration 5 – Organigramme du projet i-Fontis

1.4. ETAT D'AVANCEMENT DU PROJET

Le projet se déroule sur 24 mois et a démarré au 1er février 2014. Le tableau, page suivante, indique le déroulement de chaque tâche au pas de temps mensuel (M1 à M24). Par rapport au calendrier initial, les tâches 3 à 5 se sont décalées de 2-3 mois suite au retard pris par le chantier de forage (autorisation, disponibilité du foreur).

Faits marquants :

Février 2014 : choix du site Jargeau/Darvoy, présentation du projet aux mairies, prise de contact avec les propriétaires de parcelles à proximité du site

Avril 2014 : dépôt du dossier de déclaration de forages à la DDT

Juin-Août 2014 : forages des trois piézomètres et instrumentation du fontis (jalons)

Septembre 2014 : essai de pompage, essais de traçage, instrumentation des trois piézomètres

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24
T1 : choix du site																								
T2 : conception du suivi																								
T3 : équipement du site																								
T4 : suivi du site																								
T5 : analyse données & méthodo. surveillance																								
T6 : gestion projet & dissémination																								

En vert : réalisé *En gris : calendrier initial* *En orange : activités de l'année 2*

2. Choix du site expérimental

Afin de sélectionner le site expérimental le plus adapté à la réalisation du projet, plusieurs critères ont été pris en considération :

D'un point de vue contexte géologique et hydrogéologique : apparition récurrente de fontis dans le périmètre immédiat, présence de fontis actifs, existence de conduits karstiques actifs pouvant être atteints par forage, contexte non perturbé par l'existence de forages, de modifications des propriétés du sous-sol, etc.

D'un point de vue administratif et pratique : site accessible, autorisations pour l'installation des piézomètres et des capteurs, site avec risques de déprédation limités.

La pré-sélection de 3 sites potentiels a été réalisée sur la base des informations géologiques et hydrogéologiques existantes et accessibles (études, bases de données BSS & Géorisques, publications, levés géophysiques, cartes, consultation des spéléologues locaux, etc.)

2.1. SITE DE JARGEAU/DARVOY

Ce site est situé à l'ouest de la ville de Jargeau le long de la levée à proximité du village de Darvoy. Dans ce secteur, la levée est à une distance d'environ 200 m de la Loire. La formation alluviale, d'une épaisseur de 8-12 m, recouvre les calcaires de Beauce réputés très karstifiés dans le secteur (pertes de Loire au niveau et en aval de la plage de Jargeau, plusieurs forages agricoles recoupant des conduits karstiques, Illustration 6). Le site présente un nombre significatif de fontis récents dont un fontis en pied de digue qui s'est réactivé à l'automne 2013 (fontis F1, Illustration 6) et un nouveau fontis apparu dans un champ agricole en décembre 2013 (F2). A proximité de ce deuxième fontis, un autre fontis (F3), désormais rebouché, était apparu en novembre 2008 (Illustration 7).

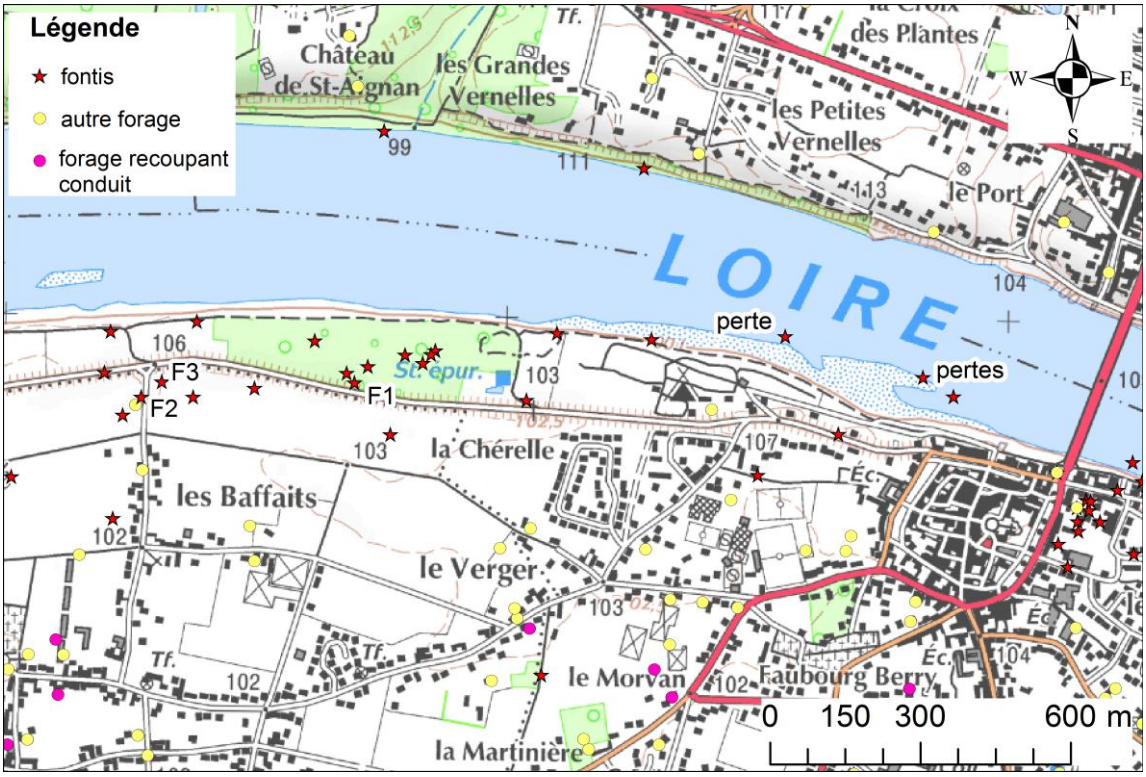


Illustration 6 – Carte indiquant les fontis connus et les forages dans les environs du site expérimental potentiel de Jargeau/Darvoy

Illustration 7 – Photos des fontis apparus récemment à proximité immédiate du site de Jargeau/Darvoy : en haut fontis en pied de digue s'étant réactivé à l'automne 2013 (F1), en bas à gauche fontis apparu en Décembre 2013 (F2), en bas à droite fontis apparu en Novembre 2008 (F3, document SSL)

2.2. SITE DE SAINT-PRYVE SAINT-MESMIN

Ce site est situé au nord de la ville de Saint-Pryvé Saint-Mesmin à proximité de la Loire (moins de 100 m, Illustration 8). Le contexte géologique est une couche d'alluvions d'une épaisseur de 6-12 m coiffant les calcaires de Beauce. Quelques fontis sont apparus au cours des dernières années, le plus spectaculaire étant celui qui a englouti une villa en mai 2010 (Illustration 2).

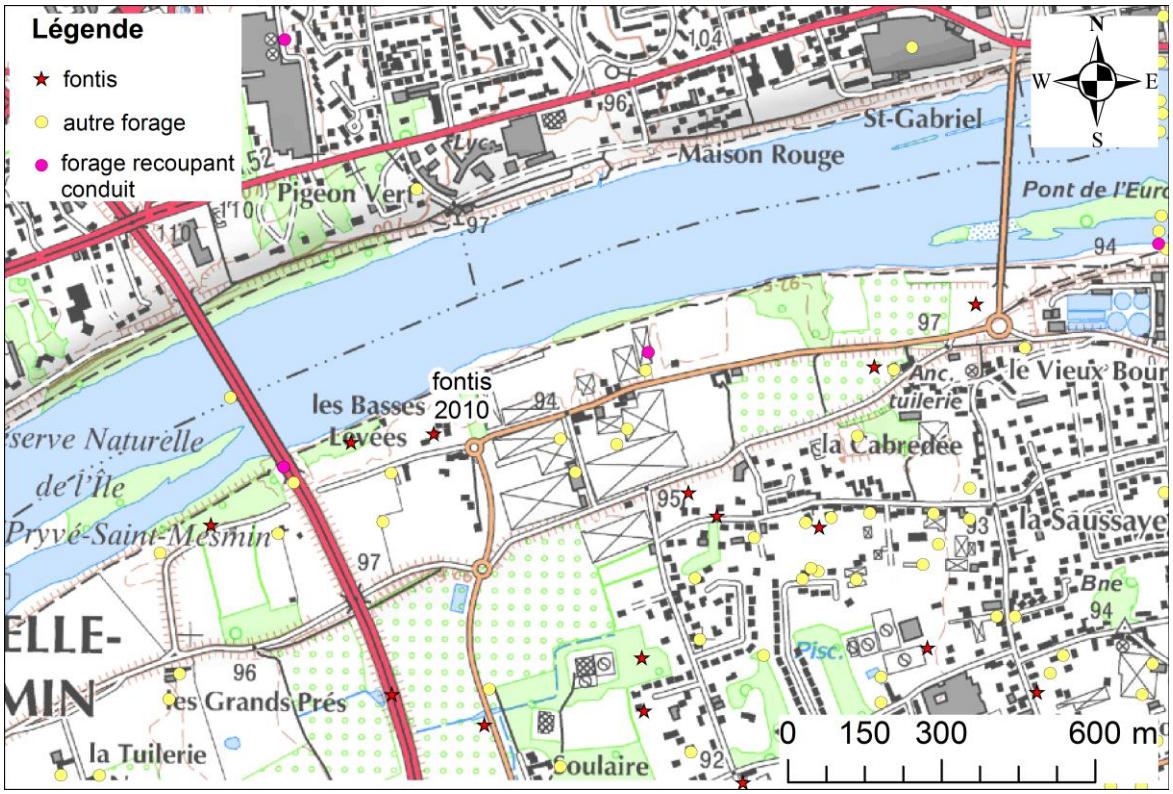


Illustration 8 – Carte indiquant les fontis connus et les forages dans les environs du site expérimental potentiel de Saint-Pryvé Saint-Mesmin.

2.3. SITE DE L'ILE CHARLEMAGNE

Ce site est situé au nord de la commune de Saint-Denis en Val à proximité immédiate de la base de loisirs de l'île Charlemagne (Illustration 9). Une couche d'alluvions de 3-8 m d'épaisseur recouvre les calcaires de Beauce. Dans le secteur, les calcaires sont bien karstifiés comme indiqué par la présence de conduits noyés sous le plan d'eau de l'île Charlemagne et la présence du gouffre de Montission au sud. Un fontis s'était ouvert en pied de digue en août 2007 (rapport du CETE Blois). Des déformations de la chaussée en sommet de digue visibles en 2014 pourraient indiquer des mouvements de terrain lents liés au soutirage karstique (Illustration 10). Un inconvénient de ce site est l'absence de nappe dans les alluvions comme le prouvent les sondages réalisés dans le secteur. En outre il est situé dans un secteur très fréquenté (base de loisirs) et la sécurité des équipements peut être plus délicate à assurer.

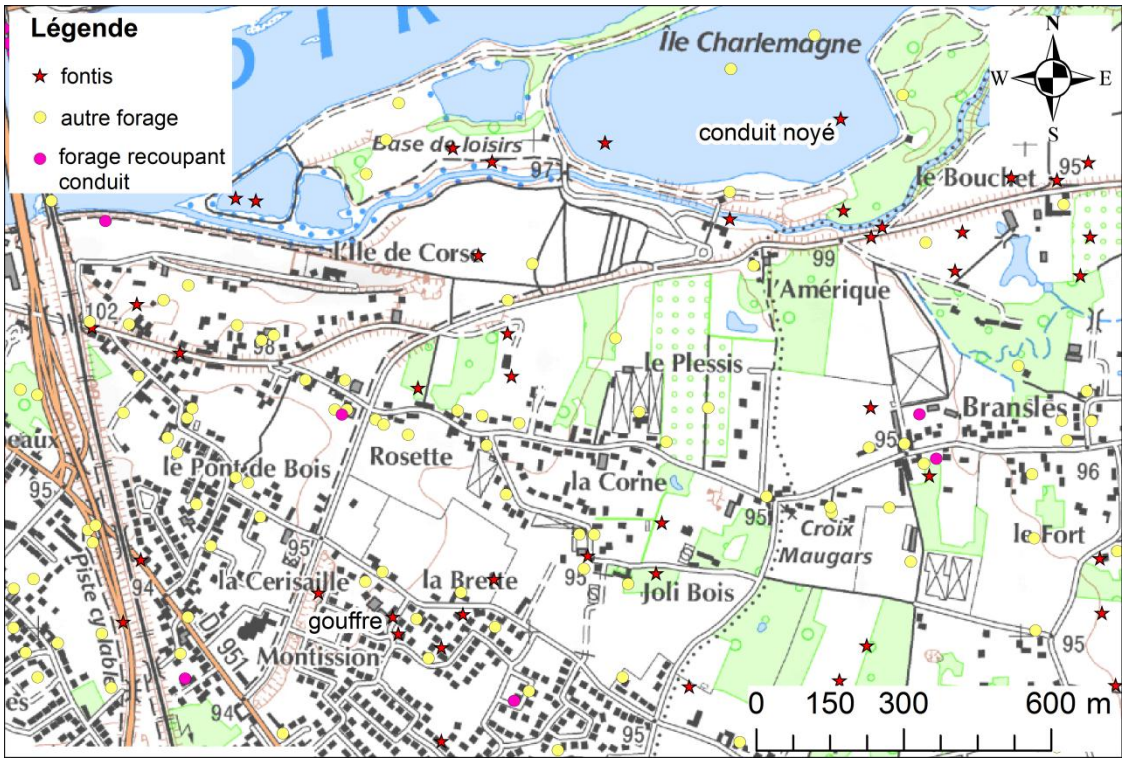


Illustration 9 – Carte indiquant les fontis connus et les forages dans les environs du site expérimental potentiel de l'île Charlemagne

Illustration 10 – En haut image du fontis ouvert en aout 2007 avant et après traitement ; en bas déformation de la chaussée en sommet de digue potentiellement causé par le soutirage karstique

2.4. COMPARAISON DES SITES

Une analyse multicritères des trois sites présélectionnés a permis de retenir le site de Jargeau/Darvoy comme site expérimental final (Illustration 11). L'avantage de ce site par rapport aux autres est la présence de fontis récents et en particulier un fontis de grande envergure actuellement en activité en pied de digue. Sa localisation en pied d'une infrastructure sensible renforce l'intérêt de mise en place d'un suivi. Un autre aspect favorable du site est sa proximité immédiate avec les pertes de Loire qui sont relativement bien connues, et sont par ailleurs une composante très importante du fonctionnement hydrogéologique dans le Val d'Orléans.

Critère	Jargeau	St-Pryvé	Ile Charlemagne
Activité fontis	1	0,5	0,5
Karst actif connu	1	0	1
Contexte géol. (alluvions)	1	1	0
Contexte hydro. (interférences, ΔH alluvions-karst, traçages)	1	0	0
Etudes existantes (géophysique, BSS, spéléo, etc.)	0	0	1
Accessibilité	0,5	1	1
Sécurité du site	1	1	0
Total	**5,5**	**3,5**	**3,5**

Illustration 11 – Tableau récapitulatif de l'évaluation des trois sites expérimentaux pré-sélectionnés : 1 indique un critère très favorable, 0,5 un critère moyennement favorable, 0 un critère peu ou pas favorable

3. Conception du suivi du site

L'objectif du suivi de site est de mesurer de manière concomitante des paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines (nappe alluviale et nappe karstique) et des paramètres indicateurs de mouvements de sol en surface. Pour ce faire, il a été choisi d'installer deux piézomètres dans les calcaires (recoupant autant que possible un conduit karstique actif), un piézomètre jusqu'à la base des alluvions, et de réaliser des mesures des déformations à la surface du sol au niveau du fontis actif (nivellement, inclinomètres) (Illustration 12).

Dans les piézomètres, deux types de suivis sont mis en place :

1) Un suivi de paramètres physico-chimiques (turbidité, conductivité, température) afin d'obtenir des informations sur les flux de matières en suspension (turbidité) et sur les interactions entre infiltration de la Loire, infiltration diffuse depuis la surface du sol, échanges entre nappe alluviale et nappe karstique (traceurs naturels conductivité et température).

2) L'évolution des différences de charge hydraulique entre Loire, aquifère alluvial et aquifère karstique permettra de voir si l'apparition de fontis se corrèle avec certains seuils ou la répétition de certains écarts de charge par exemple.

Les données mesurées sont récupérées automatiquement par une centrale d'acquisition puis télétransmises sur un serveur spécialement dédié au projet. Le système d'information SIDEV développé par DSA Technologies sert de plate-forme de collecte et de restitution de la donnée. Tous les partenaires du projet ont un accès personnalisé et sécurisé via le web. Des outils de type grapheur, historique des données, fiches stations sont disponibles pour la visualisation et l'export des données.

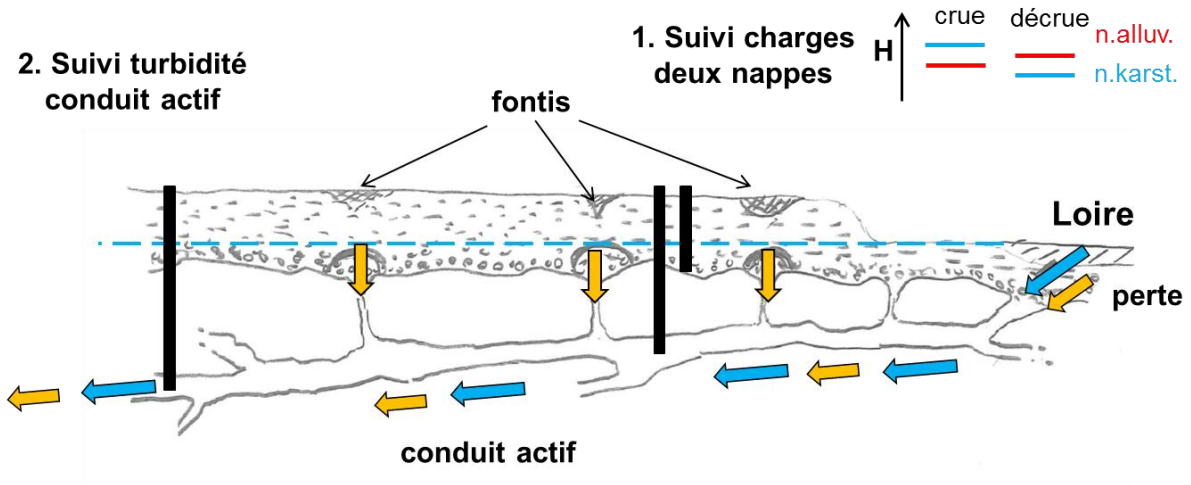


Illustration 12 - Schéma de fonctionnement fontis-aquifère karstique : flux d'eau (flèches bleues), flux de matière en suspension (flèches oranges)

3.1. DESIGN DU SITE EXPERIMENTAL

Dans le but de positionner au mieux les piézomètres, des profils géophysiques (tomographie électrique, sismique) ont été réalisés selon trois transects nord-sud (Annexe 1) : le premier le long du chemin menant de Darvoy à la digue et passant par un forage agricole connu pour sa très bonne productivité (indice de recoupement d'un conduit) et le fontis apparu récemment (F2) ; le deuxième positionné sur le fontis s'étant réactivé récemment (F1) ; le troisième positionné sur un fontis plus ancien mais encore bien visible sur le terrain (non rebouché car situé dans une zone boisée peu ou pas fréquentée). Seuls les résultats de tomographie électrique sont présentés en Annexe 1 car la sismique n'a pas donné d'information additionnelle (confirme uniquement la succession de lithologie : alluvions, calcaire altéré, calcaire sain).

Le deuxième profil montre les résultats les plus intéressants avec en particulier l'enracinement du fontis actif dans les calcaires (anomalie plus conductrice, soit de plus faible résistivité sur l'Illustration 13) et la présence d'une anomalie conductrice au sein des calcaires côté sud de la digue et pouvant correspondre à un conduit (abscisse 200 environ). Sur la base de ces interprétations, il a été décidé de réaliser les forages le long de ce transect et en particulier forer les deux anomalies visibles dans les calcaires : celle dans la prolongation du fontis et celle au sud de la digue (Illustration 13).

Le forage aux alluvions est positionné à proximité du forage au sud de la digue afin d'optimiser le système d'acquisition et de transmission des données.

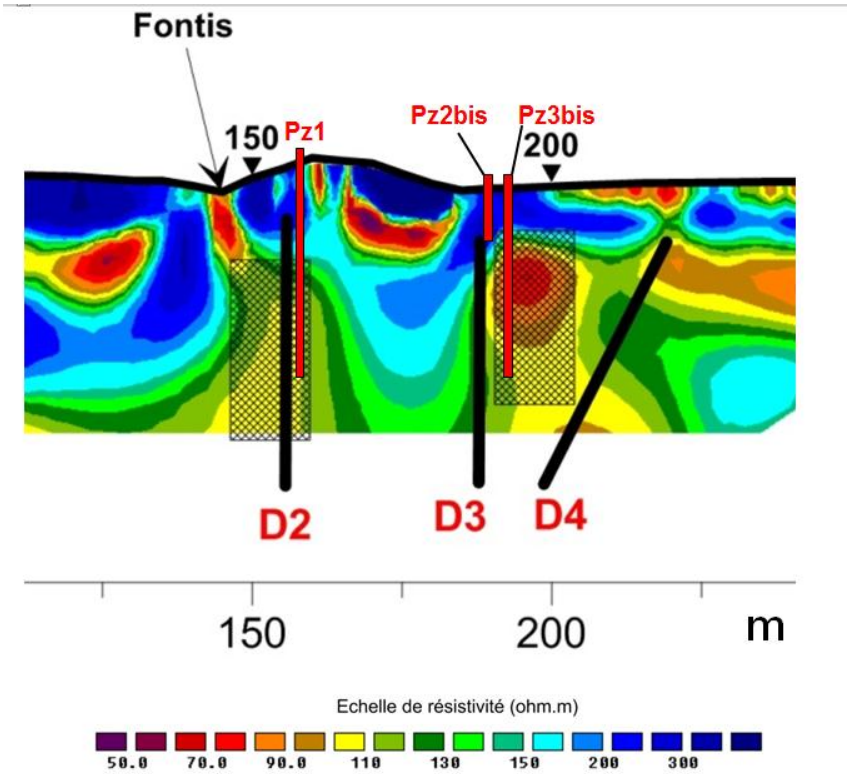


Illustration 13 – Détail du profil de tomographie électrique avec localisation des trois piézomètres prévus (barres rouges)

3.2. CAPTEURS SELECTIONNES ET PARAMETRISATION

3.2.1. Capteurs de niveau et physico-chimiques

DSA Technologies a sélectionné pour le projet i-Fontis des capteurs que la société connaît et a déjà mis en place chez différents clients.

Les capteurs de niveau sont des Vegawell de marque Vega avec une cellule de mesure céramique et équipés de boîtiers de mise à l'air pour compensation atmosphérique. Trois capteurs de niveau ont été fournis.

Les capteurs de conductivité/température et ceux de turbidité sont des capteurs numériques de marque Ponsel Mesure. Ils permettent de calculer automatiquement d'autres paramètres de type TDS, salinité, etc… Trois capteurs de conductivité et deux de turbidité ont été fournis.

3.2.2. Acquisiteurs

Deux acquisiteurs VLP développés par DSA Technologies permettent de fournir l'énergie nécessaire aux capteurs, de récupérer les données et de les transmettre via le réseau GPRS. Chaque acquisiteur est équipée d'une batterie qui permet une autonomie d'environ 2 mois et demi.

Il a été décidé d'acquérir les données de niveau, conductivité et température toutes les 15 minutes. Les données de turbidité, quant à elles, sont acquises toutes les 5 minutes. Les stations d'acquisitions ont été paramétrées pour transmettre les données chaque matin à 6h.

3.2.3. Capteurs de déformation

Les capteurs de déformation de surface sont en cours de développement chez DSA. Leur mise en place s'effectuera en février 2015. Autonomes en énergie, la vingtaine de capteurs qui seront installés au niveau du fontis seront équipés d'un module de récupération des données en local. Dans un second temps, ils seront équipés d'un module pour une transmission automatique via le vecteur Radio. La description de ces capteurs ne peut être plus détaillée dans ce rapport public intermédiaire, en raison du caractère confidentiel du développement en cours et pour des soucis de propriété industrielle.

4. Equipement du site

4.1. FORAGES DES PIEZOMETRES

Les forages ont été réalisés entre juin et août 2014 par la société Exeau (Bouzit la Forêt, 45). Le détail des opérations de forage peut être trouvé dans le rapport BRGM/RP-63868-FR (Gutierrez, 2014).

Ci-dessous, un résumé des résultats principaux est présenté.

La localisation des forages est présentée par les cartes et image suivantes (Illustration 14). Les forages ont été réalisés avec le système ODEX de tubage à l'avancement dans la partie alluvions puis au marteau fond de trou dans la partie calcaire (Illustration 15).

Suite à l'échec des premières tentatives de forage de Pz2 et Pz3 qui se sont éboulés en cours de forage (actuellement rebouchés), de nouveaux ouvrages ont été réalisés par le foreur à quelques mètres des emplacements initialement prévus et renommés Pz2bis et Pz3bis.

Les deux forages au calcaire (Pz1 et Pz3bis) ont atteint la base des alluvions à une profondeur conforme aux interprétations géophysiques puis ont chacun recoupé un drain karstique actif (Annexe 2). De plus Pz3bis a recoupé au-dessous du drain actif une zone productive avec une eau très turbide qui est interprétée comme un conduit colmaté. Dès lors Pz3bis présente des turbidités relativement élevées.

Illustration 14 – Carte de localisation des ouvrages finalisés (Pz1, Pz2bis et Pz3bis) et comblés (Pz2 et Pz3) (Source : IGN – extrait de carte au 1/25000 au-dessus, photo aérienne – BD Carto en-dessous)

Illustration 15 – Réalisation du forage Pz1 en sommet de digue

Le tableau ci-dessous récapitule les principales informations sur les trois piézomètres réalisés (coordonnées, profondeur, tubages, niveau statique). Le log géologique et technique des forages peut être consulté à l'Annexe 2.

	Pz1 (calcaire)	**Pz2bis** (alluvions)	**Pz3bis** (calcaire)
N°BSS	03984X0596	03984X0597	03984X0598
Coordonnées (Lambert93)	X= 633096.38 Y= 6752426.92	X= 633098.33 Y= 6752394.30	X= 633095.62 Y= 6752391.70
Altitude sol[1] (m)	106,25	101,07	101,10
Profondeur finale (m/sol)	26,80 m/sol (le fond s'est rebouché suite à effondrement)	8,08 m/sol	25,30 m/sol
Hauteur du casing (m)	0,55	0,95	0,90
Profondeur finale (m/tube)	27,30 m/réf	9,07 m/réf	26,20 m/réf
Profondeur forée (m/sol)	31 m	8,50 m	25,35 m
Niveau statique Le 11/07/2014	10,84 m/réf 10,29 m/sol	6,55 m/réf 5,60 m/sol	
Niveau statique le 03/09/2014	11,30 m/réf 10,75 m/sol	6,47 m/réf 5,52 m/sol	6,53 m/réf 5,63 m/sol
Altitude nappe le 03/09/2014	95,50	95,55	95,47
Partie tubée	0-16,60 m	0-4,90 m	0-11,7 m/sol

[1] Nivellement avec rugby 100 (Leica) et référence altitude 101,10 m Pz3bis issu du MNT Lidar DREAL

Suite à la réalisation des forages, des diagraphies ont été effectuées par la société SEMM logging.

Sur Pz1 :
- Inspection vidéo et diamétreur.
- Profil température et conductivité.
- Gamma naturel.
- Contrôle de cimentation par Gamma Densité.

Sur Pz2bis :
- Gamma Naturel.

Sur le forage agricole à la sortie de Darvoy (n° BSS 03984X0017) :
- Gamma naturel.
- Inspection vidéo.

L'inspection télévisée sur Pz1 montre bien la présence d'un conduit karstique qui correspond à la zone productive observée lors du forage. Des blocs tombés ont partiellement obstrué le trou nu vers 25 m de profondeur et indiquent la nécessité de poser un tube crépiné pour assurer la pérennité de l'ouvrage. Cette opération devrait pouvoir être réalisée en année 2 du projet. L'activité du conduit est confirmée par le déplacement de particules observé sur la vidéo et par la présence d'une anomalie de conductivité et température.

L'inspection télévisée sur le forage agricole indique un fort encroutement de la partie productive de l'ouvrage ; un tel colmatage ne permet pas d'envisager ce forage comme représentatif de l'aquifère karstique.

Le gamma naturel permet de repérer la base de la digue sur Pz1 et la base des alluvions mais ne permet pas de détecter un niveau repère au sein des alluvions.

4.2. INSTRUMENTATION DU SITE EXPERIMENTAL

Début septembre les forages ont été équipés des capteurs de niveau, conductivité/température et de turbidité. Sur Pz1, étant donné la localisation en bordure de digue, l'acquisiteur a été placé au-dessus de la tête de forage, dans un coffret sécurisé. Le second acquisiteur récupère les données à la fois de Pz2bis et Pz3bis. Les forages étant situés dans un champ, il a été décidé d'enterrer l'acquisiteur, cette configuration ne gênant aucunement la transmission des données.

Comme précisé auparavant, les capteurs de déformation seront installés dans et autour du fontis proche de Pz1 en février 2015.

En attendant la mise en place de capteurs de déformation, des jalons ont été installés dans l'axe du fontis. Au total 6 jalons métalliques (J1-J6) d'une longueur de 1 m ont été installés le 26 juin 2014 en réalisant un trou à la tarière d'1 m de profondeur et en cimentant l'espace annulaire entre le jalon et le trou (Illustration 16). Les deux jalons situés dans la partie la plus profonde (J5, J6) ont été recouverts de sédiments suite à l'essai de pompage du mois de septembre et ont été remplacés par un nouveau jalon métallique (J5n) enfoncé dans le sol (pas de cimentation). En outre le 18 décembre 2014, 5 jalons métalliques d'une longueur de 1 m ont été ajoutés au sud-ouest du fontis dans un secteur où deux petites dépressions sont visibles. Ces jalons (Ja-Je) ont été simplement enfoncés dans le sol.

Illustration 16 – Installation de jalons dans le fontis principal (F1) : à gauche jalons J2, J3, J4 ; à droite jalons J5 & J6

5. Suivi du site expérimental

Les données acquises sont transférées automatiquement une fois par jour sur un serveur situé dans un datacenter sécurisé. La plate-forme de restitution, SIDEV, offre plusieurs fonctionnalités pour la visualisation et l'export des données :

- carte de localisation des forages avec affichage des dernières valeurs (Illustration 17),
- fiches descriptives des stations avec coordonnées, matériel en place, vidéos, photos, tableaux récapitulatifs des forages, etc.,
- grapheur pour la création de profils de courbes avec export (Illustration 18),
- historique des variables avec export,
- prochainement, interface de saisie manuelle pour la saisie des mesures ponctuelles.

Des alarmes ont été configurées pour suivre l'état des stations : humidité du boîtier de l'acquisiteur et tension de la batterie. Aucune alerte n'a été transmise pour l'humidité des boîtiers. Concernant la tension des batteries, les partenaires ont été alertés par mail d'une tension basse (avec un laps de temps pour intervenir sur le terrain d'environ 2 semaines).

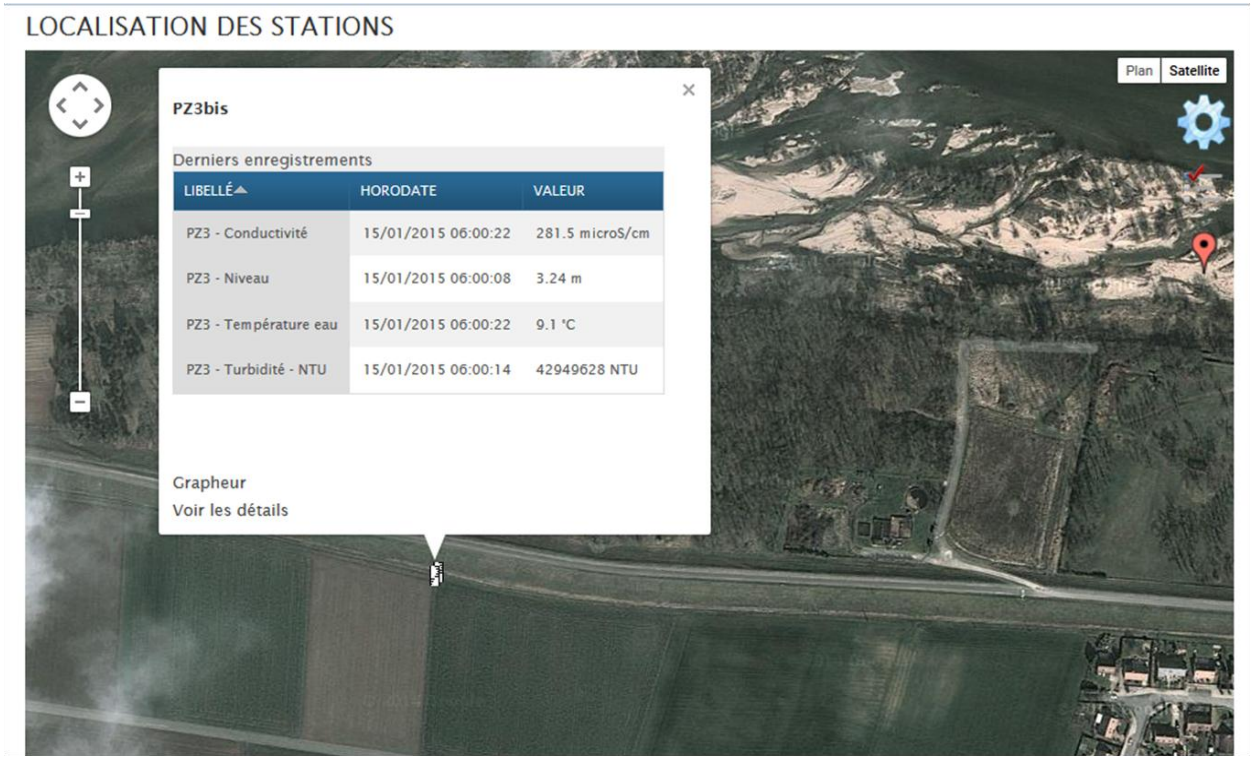


Illustration 17 – carte de localisation des forages et liste des paramètres enregistrés sur Pz3 tels que présentés sur la plateforme SIDEV

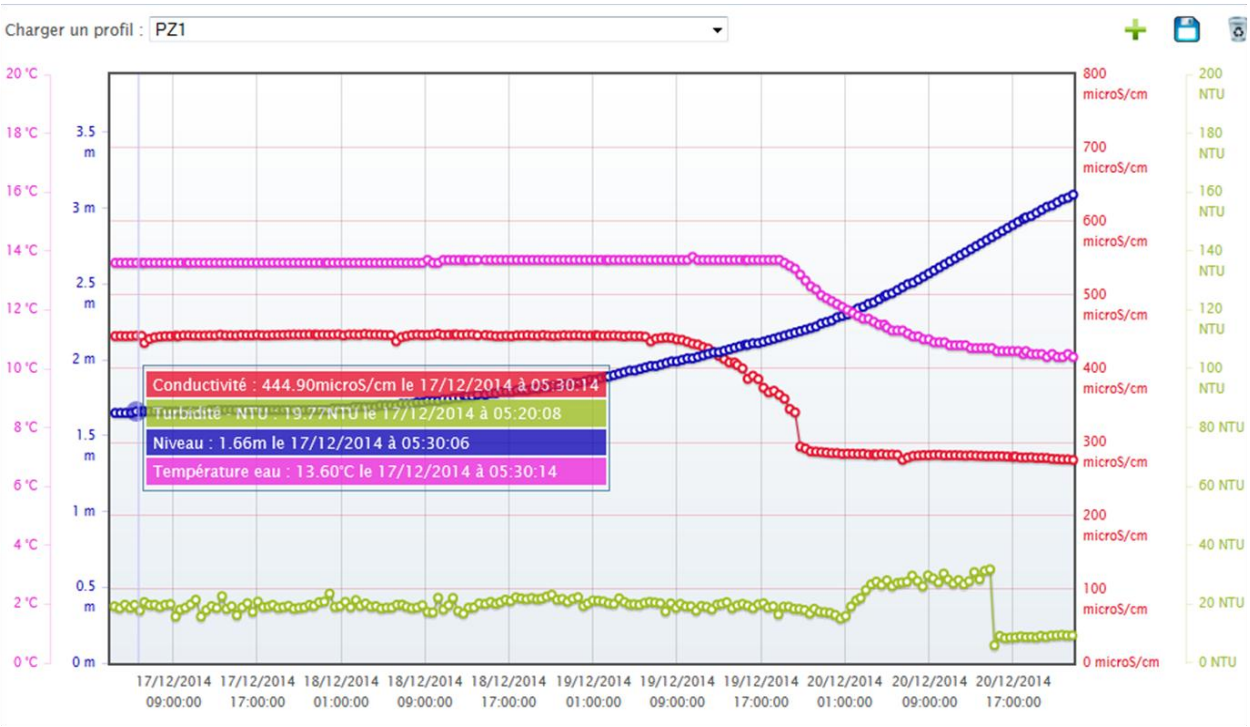


Illustration 18 – Exemple d'une chronique de mesures sur le piézomètres Pz1 tel que présentée sur la plateforme SIDEV

Outre le suivi automatisé des paramètres présentés ci-dessus, une visite du site à fréquence mensuelle permet de 1) mesurer les déformations du fontis par nivellement, 2) mesurer le niveau d'eau statique dans les piézomètres, 3) le cas échéant changer les batteries des acquisiteurs et/ou réaliser une calibration des sondes.

En année 2 du projet, il est prévu de réaliser des échantillonnages d'eau pour des analyses chimiques et de la matière en suspension (eau prélevée dans les piézomètres et en Loire). La fréquence de ces prélèvements n'a pas encore été arrêtée mais pourrait être mensuelle à l'exception d'une campagne plus resserrée lors d'un épisode de crue.

6. Analyse et interprétation des données

En fin de première année de projet, trois types de données ont été interprétées : les données de l'essai de pompage réalisé en fin de forage, les données des essais de traçage réalisés en parallèle du pompage et les données de diagraphies sur les forages au calcaire. Ces trois types de données sont utilisés pour la caractérisation hydrogéologique du site expérimental.

6.1. ESSAI DE POMPAGE

Un essai de pompage à débit quasi-constant sur Pz1 (pompage de 40 m^3/h) avec suivi piézométrique sur Pz2bis et Pz3bis, a été réalisé entre le 10 et le 13 septembre 2014.

L'essai de pompage a débuté à 10h38 le 10/09 à un débit stabilisé de 35 m^3/h et un rabattement de 54 cm sur Pz1 (Illustration 19). Le pompage a dû être interrompu à 20h à cause de fuites importantes en tête d'ouvrage (détérioration d'un joint au raccord de tuyaux). Aucun rabattement n'a été mesuré sur Pz2bis et Pz3bis.

L'essai a repris le 11/09 dès 10h pour se dérouler normalement jusqu'au 13/09 à 10h30, soit une durée totale de pompage de 48h30. Le débit stabilisé a été de 40 m^3/h et le rabattement sur Pz1 de 1 m. Aucun rabattement n'a été mesuré sur Pz2bis et Pz3bis. Vers 23h le 11/09, les niveaux piézométriques ont commencé à remonter sur les piézomètres (Pz2bis et Pz3bis) et également sur le forage pompé Pz1. Cette remontée des niveaux s'est poursuivie jusqu'à la fin du pompage et au-delà. En fin de pompage, elle a atteint 42 cm sur tous les ouvrages. Cette remontée est attribuée à la montée du niveau de la Loire qui s'est produite en parallèle (données DREAL).

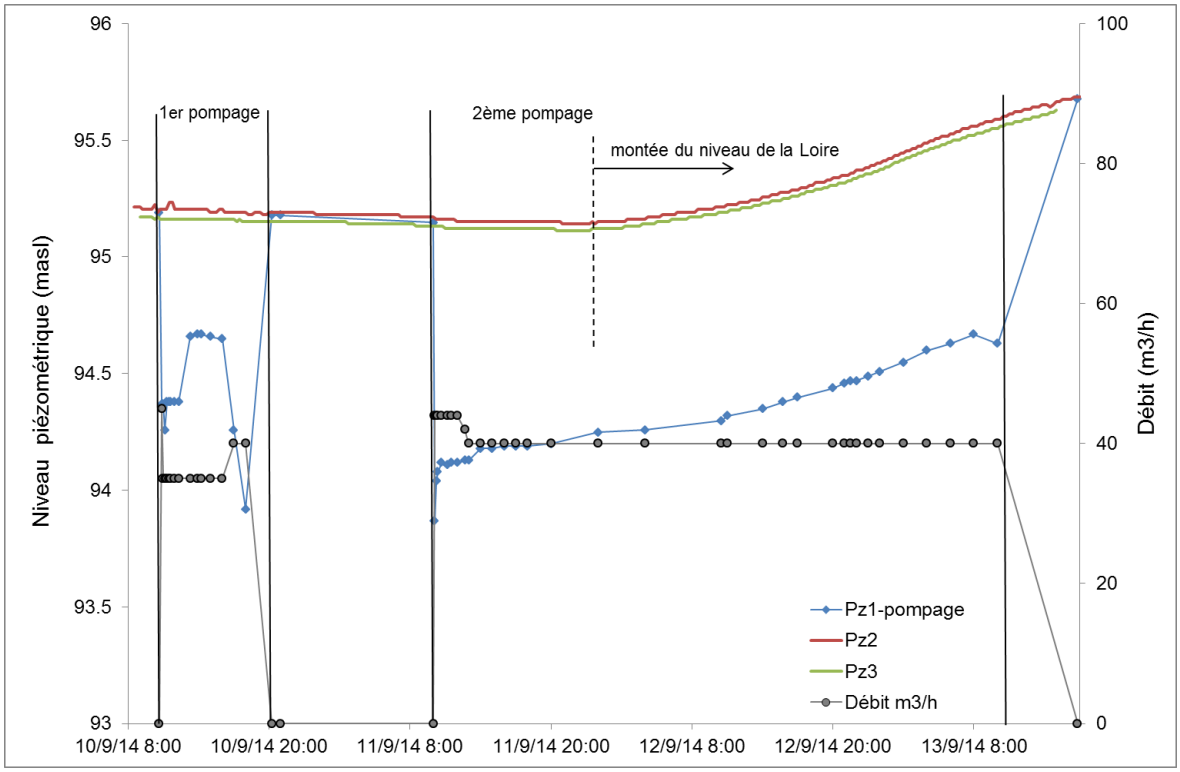


Illustration 19 - Résultats obtenus lors de l'essai de pompage (débits et niveaux d'eau observés)

Afin d'interpréter le pompage d'essai, il est nécessaire de corriger les niveaux de la fluctuation induite par la crue de la Loire. Cette correction est faite à partir des niveaux dans Pz2bis, que l'on considère comme non affecté par le pompage d'essai.

Le débit de pompage décroit durant les 500 premières minutes pour se stabiliser autour de 40 m^3/h. Une correction est apportée également au débit en début d'essai par interpolation entre les valeurs mesurées (Illustration 20).

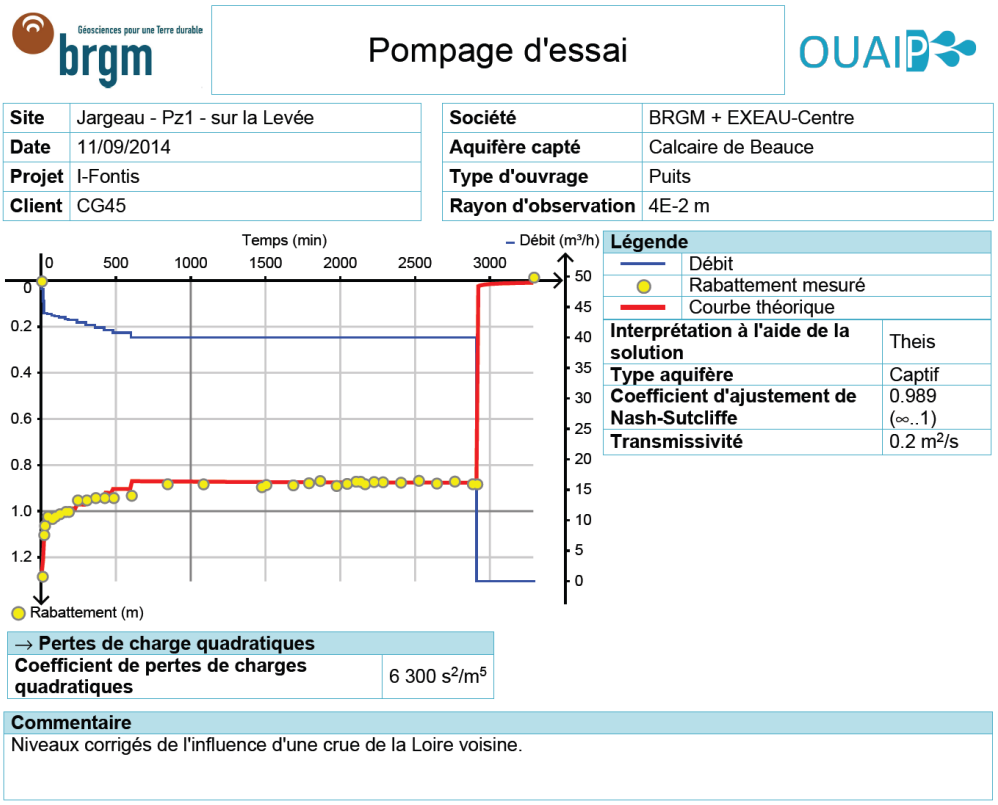


Illustration 20 - Interprétation du pompage d'essai à l'aide du logiciel Ouaip (BRGM).

Les résultats du pompage d'essai montrent une très forte transmissivité (0,2 m^2/s). Les pertes de charges quadratiques, bien que relativement faibles, sont responsables de 90% du rabattement. Ce phénomène est typique des captages d'eau dans les aquifères karstiques, où la perméabilité de l'aquifère est bien plus importante que celle du dispositif de captage (crépine et pompe). Le coefficient d'emmagasinement ne peut être estimé par cet essai.

6.2. ESSAIS DE TRAÇAGE

Quatre opérations de traçage ont été réalisées durant l'essai de pompage, dans le but d'apporter des connaissances sur l'organisation des conduits karstiques autour de la zone d'étude, ainsi que de vérifier la relation entre le fontis et l'axe principal de drainage dans le Val. Certaines injections ont dû être répétées en raison de l'interruption accidentelle du pompage, d'autres pour adapter les quantités de traceurs aux investigations menées. Le descriptif complet de ces opérations est donné dans l'annexe 3.

En chaque point d'injection et de suivi, des échantillons d'eau ont été prélevés immédiatement avant les injections (ou le démarrage du suivi), de façon à déterminer les concentrations naturelles en traceurs. Ces prélèvements ont permis de réaliser une analyse des matières en suspension (MES) et des principaux ions dissous, dont les résultats sont reportés dans l'annexe 3.

Les analyses de traceurs fluorescents et les analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire CETRAHE de l'Université d'Orléans. Pour les mesures de fluorescence, l'appareil utilisé est un spectrofluorimètre HITACHI F-7000, tandis que pour les analyses ioniques les chromatographies ioniques Dionex (ThermoScientific) ICS 900 (pour les anions) et ICS1100 (pour les cations) ont été utilisées.

6.2.1. Points d'injection

Quatre points ont être tracés, avec quatre traceurs différents :

- le fontis, pour vérifier sa relation avec le drain principal et l'exutoire principal du système (source du Bouillon), ainsi qu'avec les nappes. Traceur utilisé : uranine,
- des pertes de la Loire en amont du site (aval de la plage de Jargeau) pour vérifier leur relation avec le fontis. Traceur utilisé : naphtionate de sodium ,
- Pz2bis (en radial convergent). Traceur utilisé : sulforhodamine B,
- Pz3bis (en radial convergent). Traceur utilisé : chlorures (sous forme de NaCl).

6.2.2. Points de surveillance et mode de suivi

Afin de vérifier toutes les relations hydrauliques possibles sur le site d'étude, une surveillance a été mise en place aux points suivants :

- Exhaure du pompage : suivi à l'aide d'un fluorimètre de terrain (GGUN FL-30) couplé avec des prélèvements réalisés par échantillonneur automatique (ISCO 24 flacons) et prélèvements manuels,
- Pz2bis : suivi à l'aide d'un conductimètre en continu et de prélèvements manuels,
- Pz3bis : suivi à l'aide d'un fluorimètre de terrain (GGUN FL-24) et de prélèvements manuels,
- source du Bouillon : suivi à l'aide d'un préleveur automatique.

6.2.3. Déroulement des injections et quantités injectés

Fontis

Trois injections avec des quantités croissantes d'uranine ont été réalisées à la base du fontis pendant l'essai de pompage. En raison de la très courte distance entre le fontis et le forage Pz1, seule une quantité de 10 g d'uranine a été initialement injectée (10/09/14), pour éviter une éventuelle saturation des appareils de suivi ; aucune trace de traceur n'a été retrouvée à l'exhaure du pompage. L'opération a été répétée avec une quantité de 99 g d'uranine (11/09/14), avec le même résultat (pas d'uranine détectée). Pour vérifier la liaison fontis-Bouillon, une 3ème injection (13/09/14) a été effectuée avec 891 g d'uranine ; malgré cette grande quantité de traceur, l'uranine n'a pas ni été retrouvée à l'exhaure du forage, ni à la source du Bouillon.

Lors des trois injections le traceur a été chassé rapidement en utilisant l'eau d'exhaure, ce qui démontre une bonne infiltration dans le fontis. Une vidéo de l'injection du 13/09 est visible à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=QPsEKussOW0.

Pz2bis

10 g de NaCl ont été injectés le 10/09/14. Une vidéo de l'injection du 10/09 est visible à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=VM46ZUpkH1M.

Pz3bis

500 mg de sulforhodamine B ont été injectés le 10/09/14. Une vidéo de l'injection du 10/09 est visible à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=iELmxpQACeg.

Pertes de la Loire à Jargeau

1 kg de naphtionate de sodium a été initialement injecté le 10/09/14 dans une perte active en Loire. L'interruption du forage a nécessité de renouveler cette injection le 12/09. La montée de la Loire entre temps ayant rendu cette première perte inaccessible, la seconde injection (2 kg de naphtionate de sodium) a été réalisée dans une autre perte située à proximité (dans un bras mort remis en activité par la montée des eaux). Les deux injections ont donné des résultats comparables, avec du traceur retrouvé à la fois au forage Pz1 et au piézomètre Pz3bis. Les vidéos des deux injections en Loire sont visibles aux adresses suivantes :
https://www.youtube.com/watch?v=agWoKs69CcE,
https://www.youtube.com/watch?v=PVmm2RRAcQE

6.2.4. Résultats complets et interprétation

Les opérations de traçage ont démontré l'absence de liaison hydraulique entre le fontis et le forage Pz1, aucune des trois injections d'uranine, y compris celle de près de 1 kg de traceur, n'ayant donné de restitution à l'exhaure du forage. Aucune trace d'uranine n'a été détectée non plus aux deux autres ouvrages du site expérimental (Pz2bis et Pz3bis).

Les traçages réalisés à partir de ces deux ouvrages (NaCl au Pz2bis et sulforhodamine B au Pz3bis) n'ont donné lieu à aucune restitution de traceur à l'exhaure du forage, attestant l'absence de liaison hydraulique entre les points considérés (Annexe 4). La décroissance lente des concentrations des traceurs aux deux points d'injection (Illustration 21 & Illustration 22) est cohérente avec la non-connexion de ces points avec le forage, puisqu'elles montrent que les écoulements d'eau ne sont pas ou très peu affectés par le pompage.

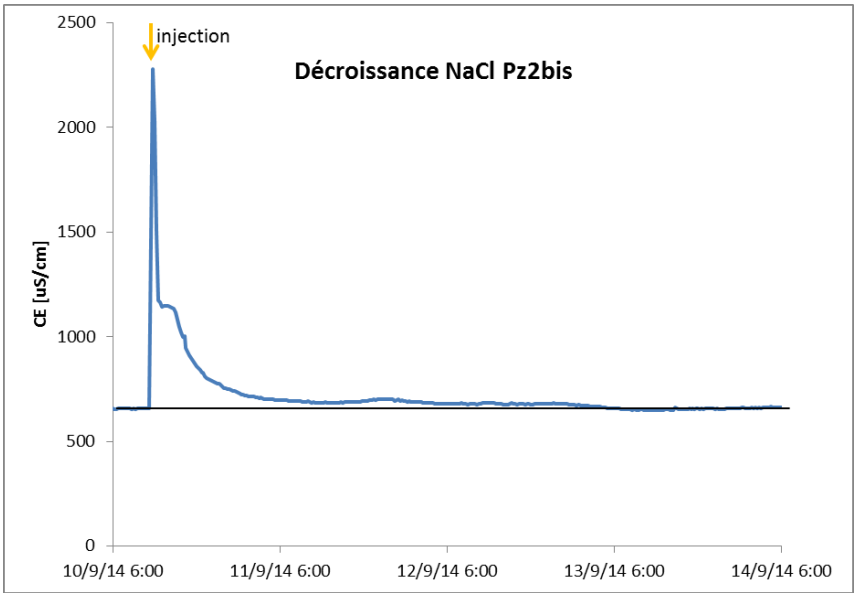


Illustration 21 - Courbe de décroissance des concentrations en chlorures au piézomètre Pz2bis (suivi conductimètre)

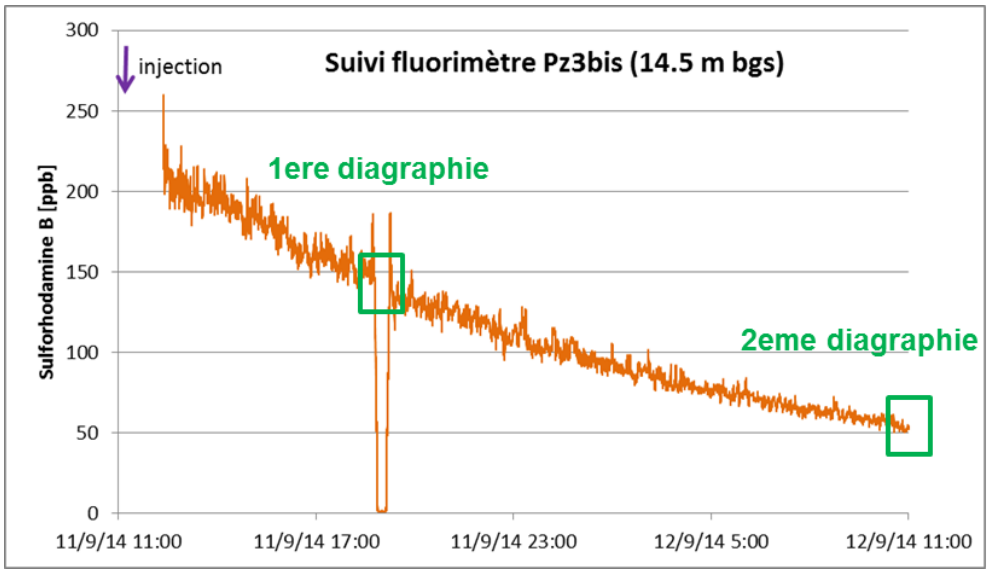


Illustration 22 - Courbe de décroissance des concentrations en sulforhodamine B au piézomètre Pz3bis (suivi fluorimètre de terrain GGUN FL-24)

Le naphtionate de sodium injecté dans les pertes de la Loire à Jargeau a été retrouvé à la fois à l'exhaure du forage et au piézomètre Pz3bis. Le 12/09, lors de la seconde opération de traçage à partir d'une perte (la 1ère n'ayant pas donné de restitution complète en raison de l'arrêt accidentel du pompage), le traceur, injecté à 16h10, est arrivé à l'exhaure entre 19h30 et 20h15 le même jour (Illustration 23), le pic de concentration déterminé par le fluorimètre de terrain se situant à 23h40 ; il est arrivé au niveau du Pz3bis un peu plus tard, entre 20h30 et 21h, le pic de concentration se situant environ à 2h00 le 13/09 (Illustration 23).

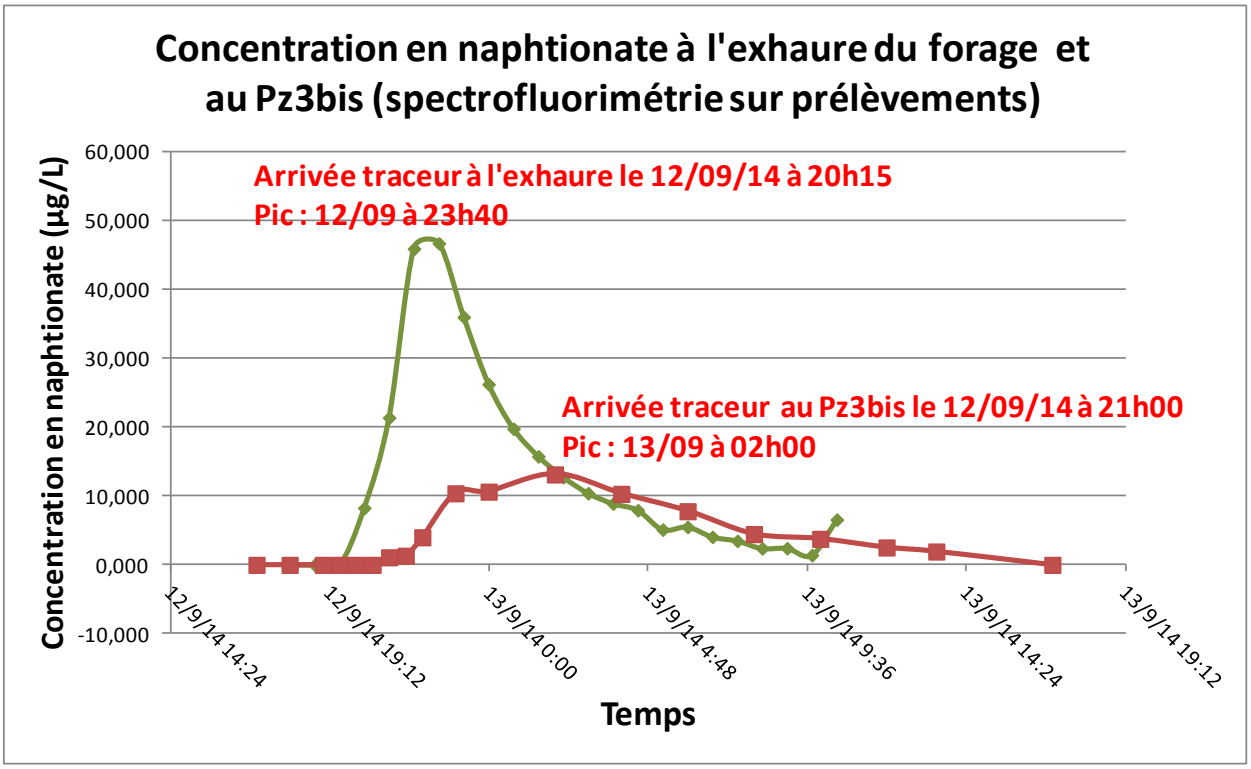


Illustration 23 - Courbes de restitution de naphtionate de sodiumà l'exhaure du Pz1 (courbe verte) et au piézomètre Pz3bis (courbe marron)

Ces résultats montrent que les conduits karstiques recoupés par le forage Pz1 et le piézomètre au calcaire Pz3bis se situent bien sur l'axe principal de drainage pertes-Bouillon. Toutefois, les vitesses de transit et les formes des courbes de restitution, différentes aux deux points (Illustration 23), et l'absence de liaison hydraulique entre ces 2 points démontrée par l'opération de traçage à la sulforhodamine B (voir plus haut), semblent indiquer que le traceur suit des cheminements différents depuis l'injection vers les deux forages.

Les résultats des analyses réalisées sur les prélèvements avant injection ou avant démarrage du suivi aux cinq points étudiés (perte en Loire, exhaure du forage Pz1, Pz2bis, Pz3bis et source du Bouillon) sont cohérents avec les informations tirées des traçages. La composition des eaux à l'exhaure du forage est proche de celles de la Loire et du Bouillon, et souvent intermédiaire entre les deux, notamment pour les paramètres discriminants des masses d'eau dans le Val d'Orléans que sont le calcium, le magnésium et les nitrates dissous, ainsi que les MES, traduisant que ces eaux sont majoritairement des eaux de circulation dans les conduits karstiques, tandis que les valeurs retrouvées aux piézomètres Pz2bis et Pz3bis sont à la fois distinctes des trois premières, et distinctes d'un piézomètre à l'autre, traduisant l'influence dominante des eaux de nappe, alluviale, et des calcaires de Beauce, respectivement (Annexe 3).

Enfin, la quantité de 890 g d'uranine injectée dans le fontis lors de la dernière opération de traçage de septembre 2014, n'a pas été suffisante pour démontrer la connexion du fontis avec la source du Bouillon, et donc sa communication avec un conduit karstique relié à l'axe principal de drainage pertes-Bouillon. Au moins une autre opération de traçage à partir du fontis devra donc être menée au cours de la 2ème année du projet, en prévoyant des quantités plus importantes de traceur, et une surveillance de piézomètres aux alluvions et au calcaire de Beauce situés en aval immédiat, en plus de la source du Bouillon.

6.3. DIAGRAPHIES SUR PZ1 ET PZ3BIS

En parallèle des essais de traçage, des diagraphies de température, turbidité et traceurs fluorescents (uranine, sulforhodamine B, naphtionate) ont été réalisées avec un fluorimètre de terrain (modèle GGUN-FL24, Albillia Sarl). Les résultats sur Pz1 montrent une anomalie thermique chaude en face du conduit karstique accompagnée d'une augmentation substantielle de la turbidité (Illustration 24).

Sur Pz3bis on observe également une anomalie thermique chaude en face du conduit et on voit que le traceur injecté 33 heures auparavant en sommet de nappe (sulforhodamine B) est resté essentiellement piégé dans la colonne d'eau au-dessus du conduit (Illustration 25). Cela illustre bien l'absence d'influence du pompage sur le piézomètre Pz3bis. Si le piézomètre avait été influencé, la masse du traceur aurait été dirigée rapidement vers le forage en pompage (Pz1).

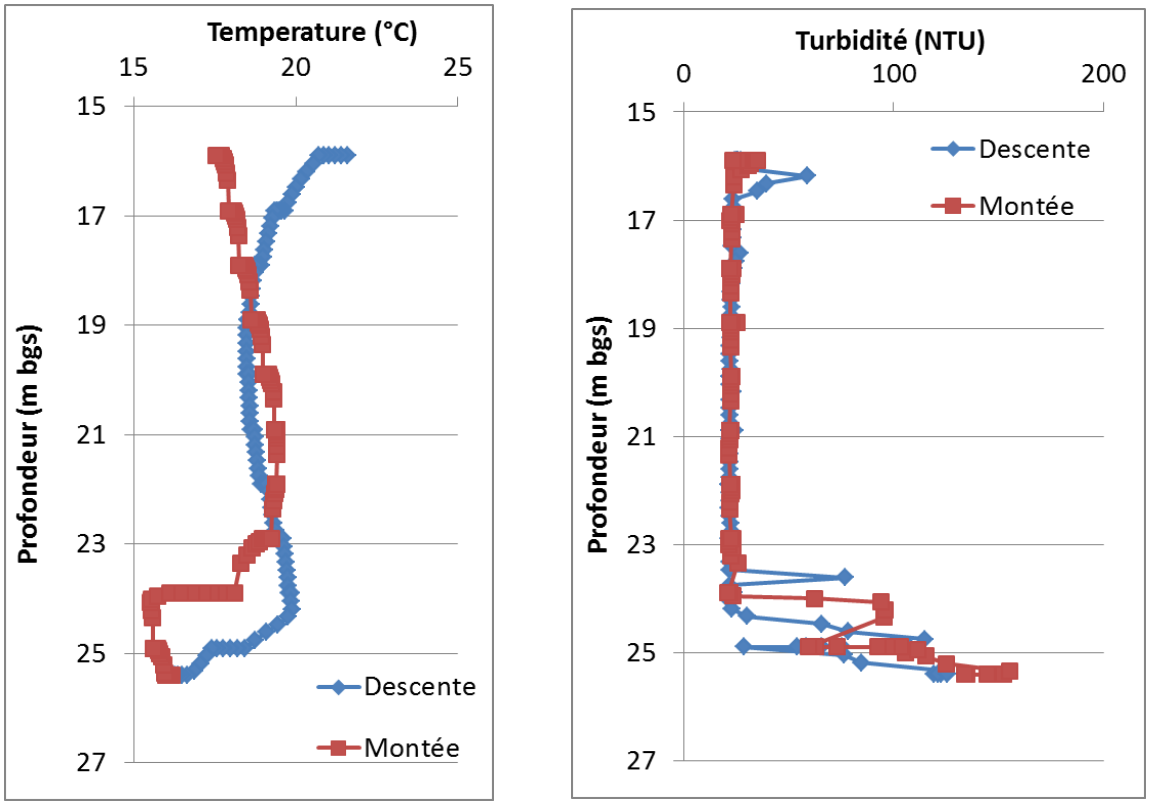


Illustration 24 - Diagraphies de température et de turbidité sur la partie trou nu de Pz1 (réalisées le 13/09/2014 16h00-16h40)

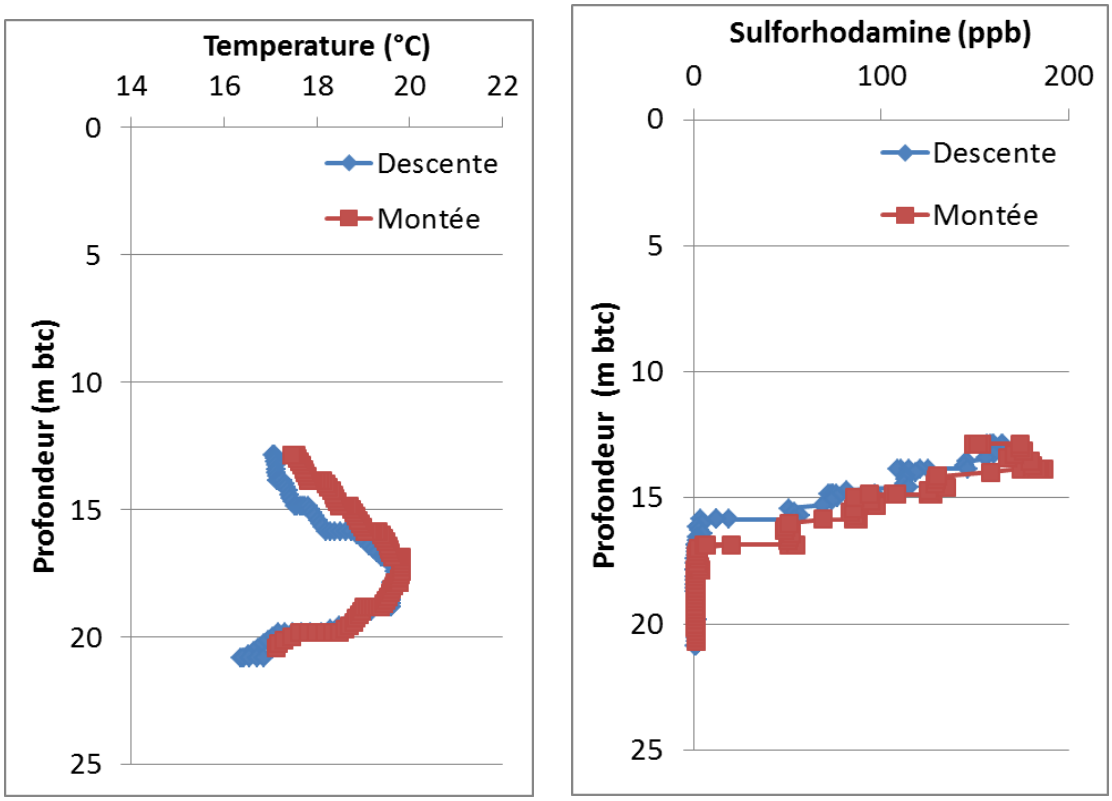


Illustration 25 – Diagraphies de température et de sulforhodamine sur la partie trou nu de Pz3bis (réalisées le 11/09/2014 18h45-19h15)

7. Perspectives et Conclusions

Après une année de projet, un site expérimental réunissant les critères de sélection requis (récurrence de fontis, drains karstiques recoupés par forages, contexte géologique et hydrogéologique représentatif du Val d'Orléans, accessibilité et sécurité) a été instrumenté grâce à la réalisation de trois piézomètres et l'installation de jalons en surface pour les suivis de déformation.

Dès le début de l'année 2, des capteurs de déformation seront installés en surface et le suivi du site sera donc complétement opérationnel. En parallèle, le suivi de terrain (piézométrie, nivellement) sera poursuivi et des expériences spécifiques seront réalisées (essai de traçage, campagnes d'échantillonnage des eaux pour analyses chimiques et de matière en suspension).

Au terme du projet, il est envisagé d'intégrer le suivi du site dans le cadre de l'observatoire hydrologique du Val d'Orléans (observatoire de 1er cercle du SNO karst, Service National d'Observation du KARST de l'INSU, http://www.sokarst.org/index.asp). En effet, les mouvements de terrain liés au soutirage par le karst étant aléatoires dans leur fréquence, poursuivre le suivi au-delà de la durée du projet ne pourra que renforcer les interprétations possibles sur la base des données hydrologiques et des données de déformations des terrains.

Ce projet permet aux Instituts de recherche (BRGM, CETRAHE, ISTO) de progresser dans la compréhension des processus déclencheurs de fontis et de développer leur expertise sur ce risque géologique. Pour l'Entreprise partenaire (DSA Technologies), le projet permet de développer des produits et services dans le domaine de la surveillance des mouvements de terrain et en particulier une technologie de capteurs pour le suivi des déformations de surface.

A terme, une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis s'appuyant sur les résultats du projet pourra être développée et procurer aux Instituts et à l'Entreprise une avance technologique sur le sujet avec des perspectives de valorisation.

Au terme du projet, des communications sur les résultats sont envisagées à la fois dans le cadre de congrès scientifiques (par exemple session karst de l'EGU-European Geosciences Union), de revues professionnelles (Géologues ou autres) et de communications pour un plus large public (Loiret Mag, conférence, etc.) ; les supports correspondants (présentations, posters, résumés, etc.) pourront être mis à disposition des collectivités, administrations et du grand public sur le site Internet de CETRAHE(http://www.univ-orleans.fr/cetrahe) dans le cadre de sa mission de diffusion scientifique et technologique. En outre le rapport final du projet constituera un document public.

8. Bibliographie

Amitrano, D., Grasso, J.R. and Senfaute, G., 2005. Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical-point phenomena. Geophys. Res. Let., Vol. 32, No 8, L08314, doi:10.1029/2004GL022270

Binet S., Spadini L., Bertrand C., Mudry J., Guglielmi Y., Scavia C. 2009. Variability of the groundwater sulfate concentration in fractured rock slopes: a short term tool to identify active unstable areas. Hydrology and Earth System Sciences 13 : 2315-2327.

Binet S., Guglielmi Y., Bertrand C., Mudry J. 2007. Unstable rock slope hydrogeology: insights from the large-scale study of the western Argentera-Mercantour slopes. Bulletin de la Société Géologique de France 178 : 155-168.

Charlier J.-B., Bertrand C., Binet S., Mudry J., Bouillier N. 2010. Use of continuous measurements of natural fluorescence of dissolved organic matter in groundwater to characterize fast infiltration through an unstable fractured hillslope. Hydrogeology Journal 18 : 1963-1969

Del Prete S, Iovine G, Parise M, Santo A, 2010. Origin and distribution of different types of sinkholes in the plain areas of Southern Italy. Geodinamica Acta 23(1-3): 113-127.

Doctor DH, Weary DJ, Orndorff RC, Harlow GE, Kozar MD, Nelms DL, 2008. Bedrock Structural Controls on the Occurrence of Sinkholes and Springs in the Northern Great Valley Karst, Virginia and West Virginia. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst 2008, Proceedings of the 11th Multidisciplinary Conference, Geotechnical Special Publication 183: 12-22.

Donsimoni M, Berthier H, Martin JC, 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, 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.

Gutierrez A. 2014. Compte-rendu de travaux de forages : piézomètres à Jargeau et Darvoy (45). Rapport BRGM/RP- 63868 -FR. 45 p., 11 ill., 3 ann.

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.

Hyatt JA, Jacobs PM, 1996. Distribution and morphology of sinkholes triggered by flooding following Tropical Storm Alberto at Albany, Georgia, USA. Geomorphology 17 I 996 : 305-316.

Jiang, Xiao-Zhen; Lei, Ming-Tang; Chen, Yuan; Ge, Jie. 2006. An experiment study of monitoring sinkhole collapse by using BOTDR optical fiber sensing technique. Hydrogeology and Engineering Geology 33. 6 : 75-79. [En mandarin]

Joodi A., Sizaret S., Binet S., Bruand A., Alberic P. 2009. Development of a Darcy- Brinkman model to simulate water flow and tracer transport in a heterogeneous karstic aquifer (Val d'Orléans, France) Hydrogeology journal 18 : 295-309.

Kaufmann O, Quinif Y, 2002. Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium. Engineering Geology 65 : 117–124.

Lanticq V., Bourgeois E., Magnien P., Dieleman L., Vinceslas G., Sang A., Delepine-Lesoille S. 2009. Soil-embedded optical fiber sensing cable interrogated by Brillouin optical time-domain reflectometry (B-OTDR) and optical frequency-domain reflectometry (OFDR) for embedded cavity detection and sinkhole warning system. Measurement science & technology 20(3). DOI: 10.1088/0957-0233/20/3/034018

Maurin J, 2012. Etude de dangers de la levée de classe A d'Orléans. DREAL, déc. 2012.

Nachbaur A, Rohmer J, 2011. Managing expert-information uncertainties for assessing collapse susceptibility of abandoned underground structures. Engineering Geology 123: 166–178.

Patton TH, Klein JG, 1989. Sinkhole formation and its effect on Peace River hydrology. Proceedings 3rd Multidisciplinary conference on sinkholes, Florida (USA): 25-31.

Waltham, A.C. 2008. Sinkhole hazard case histories in karst terrains. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 41: 291-300.

Wust-Bloch G.H., Joswig M. 2006. Pre-collapse identification of sinkholes in unconsolidated media at Dead Sea area by 'nanoseismic monitoring' (graphical jackknife location of weak sources by few, low-SNR records. Geophys. J. Int. (2006) 167 : 1220–1232.

Zhang, G., Jiang, F., Yu, C., & Ge, F. 2009. Monitoring sinkhole collapse by using optical fiber sensing technique of longgang central town, shenzhen city. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation/Dizhi Zaihai Yu Huanjing Baohu, 20(4), 117-121. *[En mandarin]*

Annexe 1

Levés géophysiques (tomographie électrique) sur le site expérimental de Jargeau/Darvoy

Investigations géophysiques sur les karsts du Loiret en aval de Jargeau

Panneaux électriques

1. Travaux réalisés

- 3 panneaux électriques de 315 m avec un espacement entre électrodes de 5 m ;
- Acquisition en dispositif dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger ;
- Acquisitions des mesures le 17/02/2014 B. François et A. Bonjour ;
- Traitement des données et interprétation F. Mathieu.

2. Inversions des données avec Res2Dinv

Chaque panneau électrique a été inversé avec 3 jeux de paramètres pour répondre à des objectifs différents :

- DD + WS inversion robuste horizontalisée. Pour une localisation précise des interfaces géologiques et une bonne caractérisation des horizons géo-électriques ;
- DD + WS inversion standard. Pour la localisation des discontinuités verticales et la caractérisation des décrochements (rejets verticaux) ;
- DD inversion standard. Pour la caractérisation des fontis et des zones karstiques.

3. Interprétation

***Schéma* géologique**

Il n'existe pas de forage dument renseigné sur la zone d'étude mais les contrastes de résistivité sont suffisants pour bien appréhender la coupe géologique type dans ce secteur :

- Un premier terrain conducteur C0 en position subaffleurante qui n'est présent qu'au Sud de la digue. Son épaisseur maximale est de 7 m et sa résistivité est comprise entre 50 et 150 ohm.m. Il correspondrait à des alluvions argilo-sableuses (+ limons ?).

- Un deuxième terrain résistant de résistivité supérieure à 200 ohm.m qui est attribué à des alluvions sablo-graveleuses propres et ennoyées. Son épaisseur est de 7 à 8m quand il est en position subaffleurante entre la digue et la Loire. Au Sud de la digue, son épaisseur est moindre (5 à 6 m au maximum) quand il est sous-jacent à l'horizon conducteur C0.

- Un troisième terrain conducteur C1 qui correspondrait à la frange d'altération des calcaires de Pithiviers. Sa résistivité est de l'ordre de 50 à 150 ohm.m et son épaisseur de 5 à 10 m.

- Un quatrième terrain résistant R1 dont la résistivité est supérieure à 200 ohm.m. Son épaisseur est comprise entre 10 et 15 m. Les baisses de résistivité observées au sein de cet horizon pourrait être en relation avec de la fracturation et/ou de la karstification. Il correspond aux calcaires sains de Pithivier.

- Un substratum géophysique représenté par un horizon conducteur C2. Celui-ci est relativement mal caractérisé (profondeur d'investigation insuffisante et faible résolution à cette profondeur).Sa résistivité serait comprise entre 75 et 125 ohm.m. Il est attribué à un faciès marneux qui pourrait être les Molasse du Gatinais.

On notera un léger pendage des couches vers le Sud (1.5°S). Le jeu des failles contribue certainement à ce pendage.

Structurale

- Mise en évidence de 4 discontinuités sub-verticales pouvant correspondre à des failles. Ces discontinuités sont marquées par des décrochements des horizons géo-électriques et par des baisses de résistivité essentiellement au niveau de l'horizon résistant R1.

- Les rejets verticaux de ces failles sont faibles (2 à 3 m). Le compartiment sud est successivement affaissé ce qui donne une impression de pendage des couches vers le Sud.

- La faille D1 ne présente pas de rejet significatif.

- La faille D4 serait pentée vers le Nord (faille inverse ?).

- La spatialisation des interprétations met en évidence une direction globalement E-W pour les 4 failles.

Réseau karstique

- La seule signature géoélectrique évidente de la présence d'un karst est localisée sur le profil DA2 approximativement à l'aplomb du fontis (abscisse 145 m). Il s'agit d'une anomalie conductrice sub-verticale qui remonte jusqu'en surface.

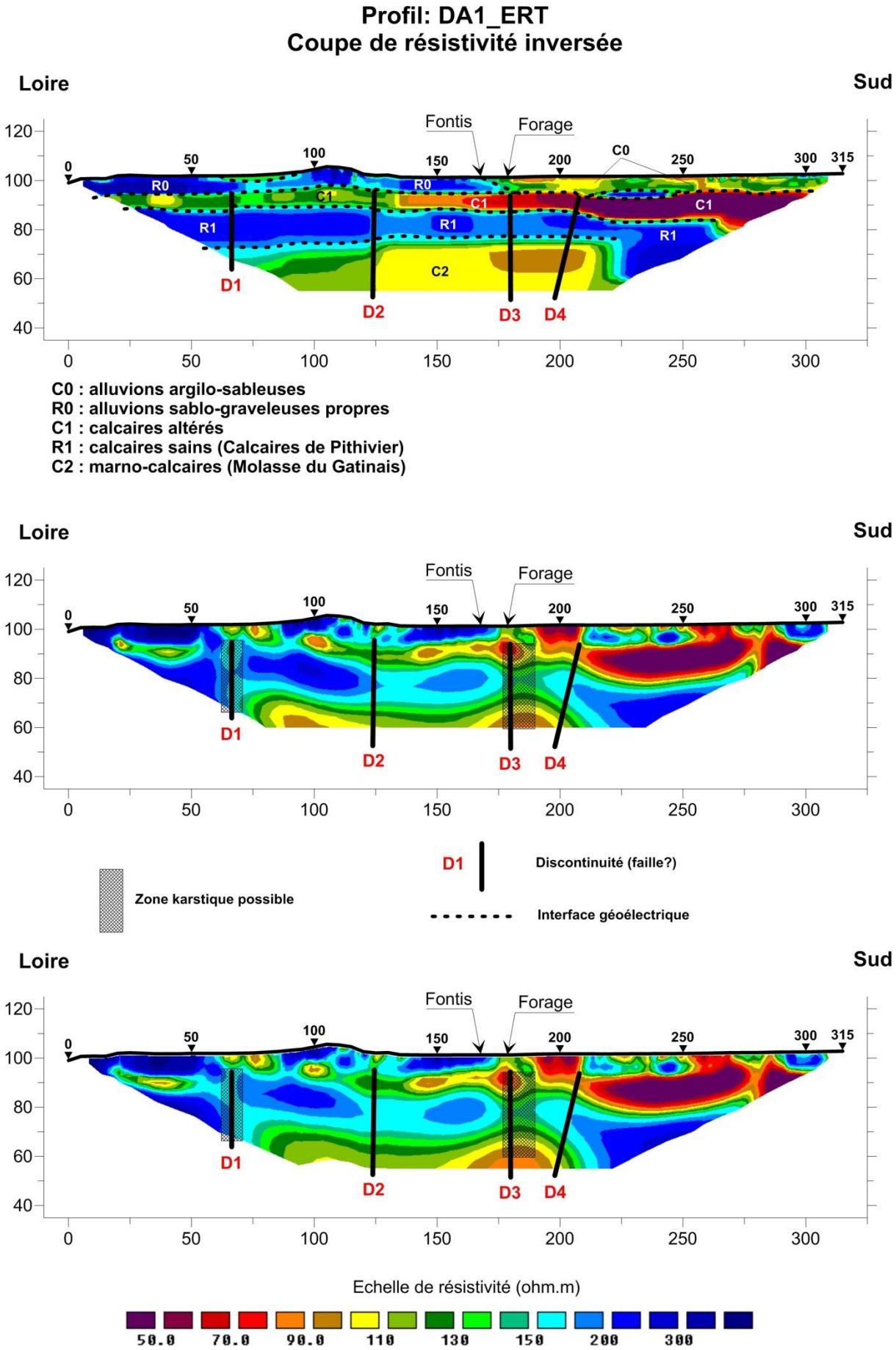
- Sur le profil DA3, aucune anomalie conductrice corrélée au fontis (abscisse 90 m) n'a été mise en évidence.

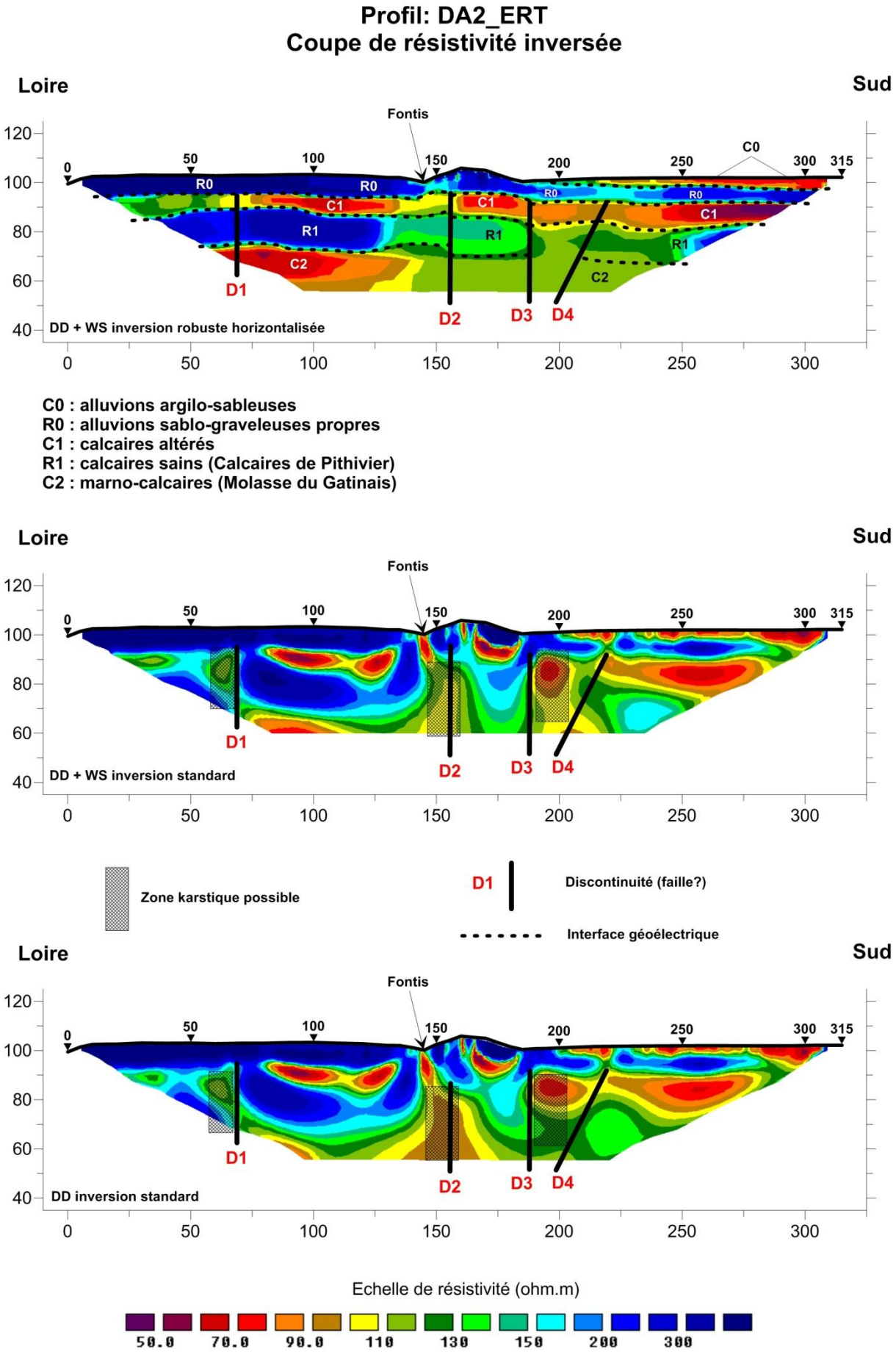
- Sur le profil DA1, pas d'anomalie en relation avec le fontis par contre on aurait une anomalie conductrice sub-verticale centrée sur la faille D3 et sur le forage.

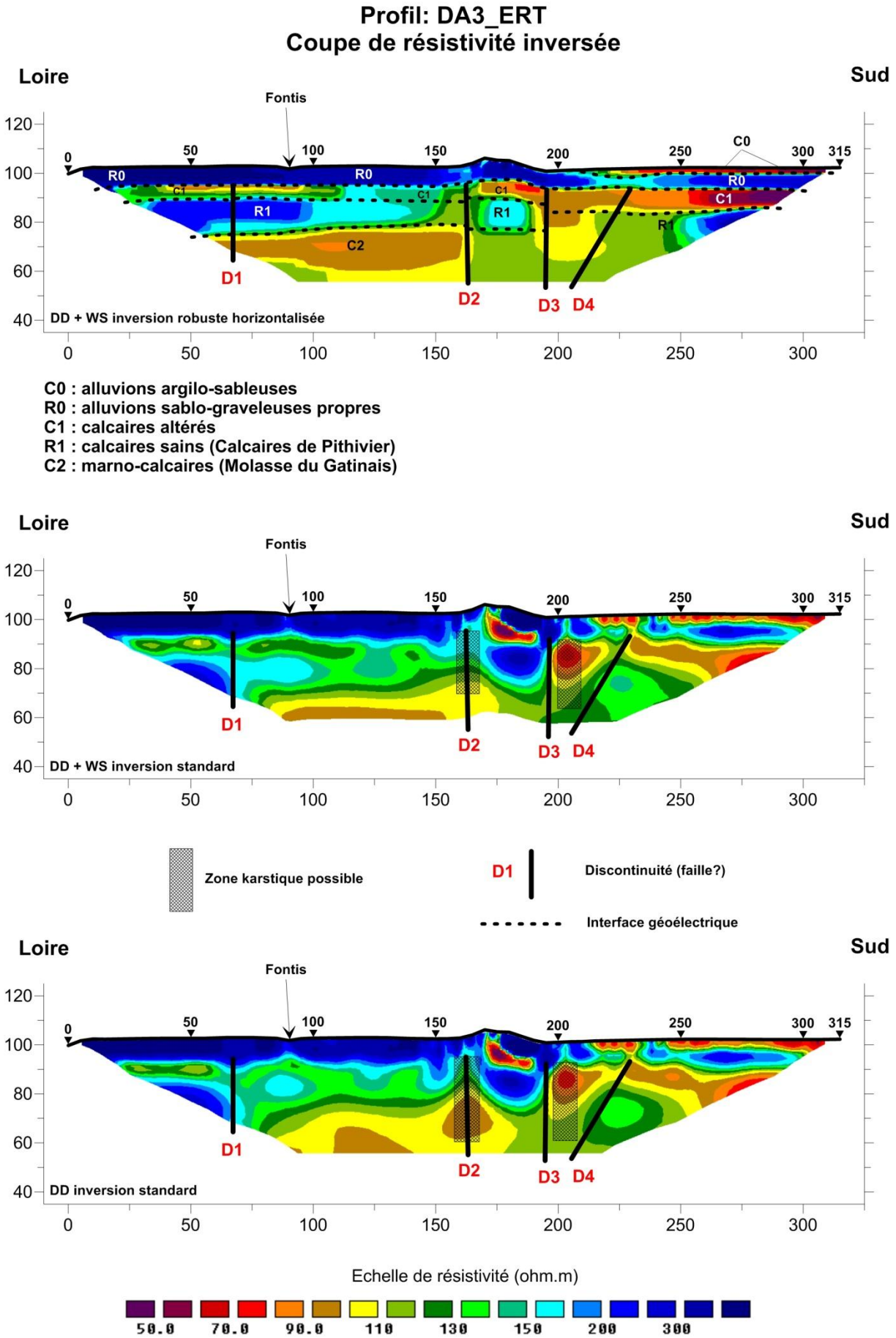
- En conclusion, une anomalie conductrice sub-verticale associée à une discontinuité (faille) pourrait être en relation avec une éventuelle présence de karst.

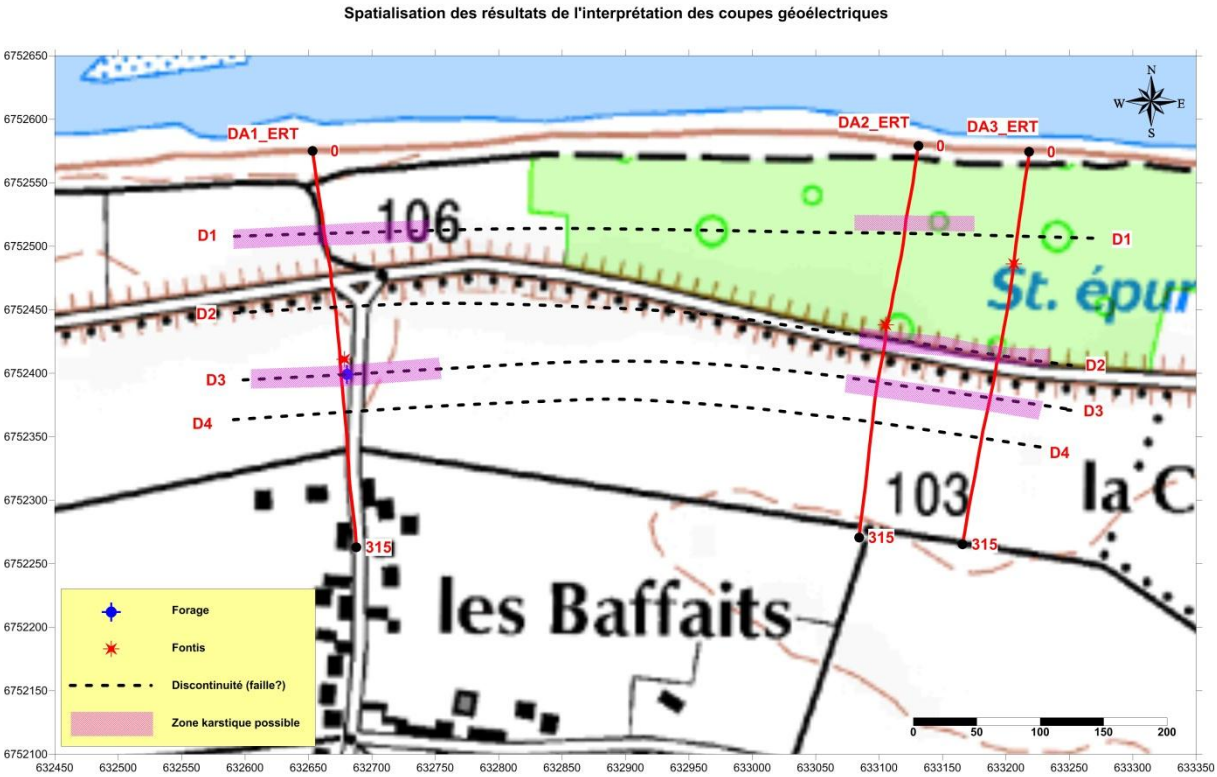
- Inventaire des cibles :

  - DA1 abscisse 67m centrée sur la faille D1
  - DA1 abscisse 185 m centrée sur la faille D3 et sur le forage mais décalée vers le Sud par rapport au fontis
  - DA2 abscisse 65 m accolée à D1 côté nord
  - DA2 abscisse 153 m centrée sur la faille D2, légèrement décalée vers le Sud par rapport au fontis et pratiquement sous la digue
  - DA2 abscisse 197 m située entre les failles D3 et D4
  - DA3 abscisse 162 m centré sur la faille D2
  - DA3 abscisse 202 située entre les failles D3 et D4.


Profil: DA1_ERT
Coupe de résistivité inversée
Loire
Sud
Fontis
Forage
C0
R0
C1
R1
C2
D1
D2
D3
D4
C0 : alluvions argilo-sableuses
R0 : alluvions sablo-graveleuses propres
C1 : calcaires altérés
R1 : calcaires sains (Calcaires de Pithivier)
C2 : marno-calcaires (Molasse du Gatinais)
Zone karstique possible
Discontinuité (faille?)
Interface géoélectrique
Echelle de résistivité (ohm.m)
50.0
70.0
90.0
110
130
150
200
300

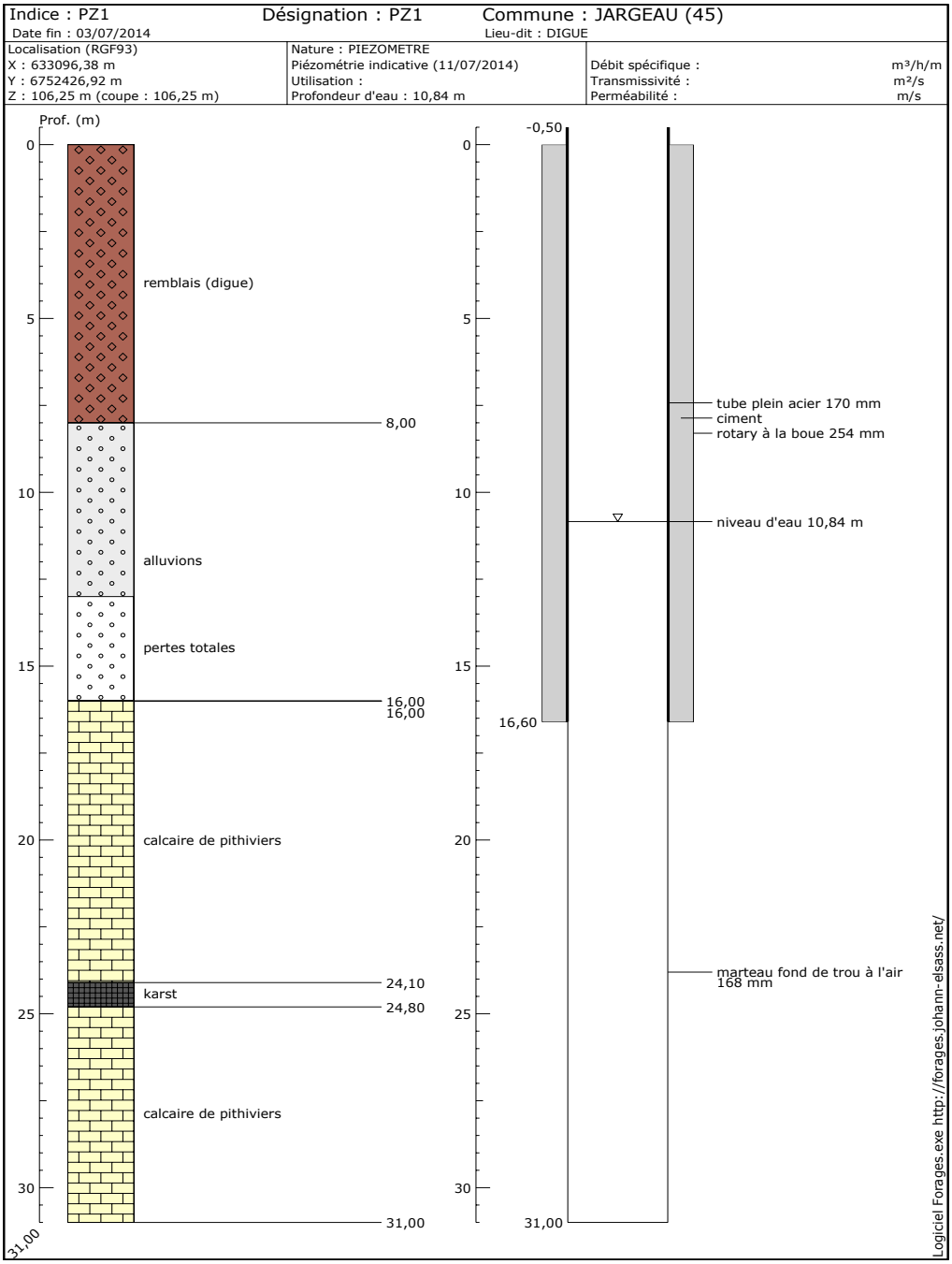

Profil: DA2_ERT
Coupe de résistivité inversée
Loire
Sud
Fontis
C0
R0
C1
R1
C2
D1
D2
D3
D4
DD + WS inversion robuste horizontalisée
C0 : alluvions argilo-sableuses
R0 : alluvions sablo-graveleuses propres
C1 : calcaires altérés
R1 : calcaires sains (Calcaires de Pithivier)
C2 : marno-calcaires (Molasse du Gatinais)
DD + WS inversion standard
Zone karstique possible
Discontinuité (faille?)
Interface géoélectrique
DD inversion standard
Echelle de résistivité (ohm.m)
50.0
70.0
90.0
110
130
150
200
300


Profil: DA3_ERT
Coupe de résistivité inversée
Loire
Sud
Fontis
C0
R0
C1
R1
C2
D1
D2
D3
D4
DD + WS inversion robuste horizontalisée
C0 : alluvions argilo-sableuses
R0 : alluvions sablo-graveleuses propres
C1 : calcaires altérés
R1 : calcaires sains (Calcaires de Pithivier)
C2 : marno-calcaires (Molasse du Gatinais)
DD + WS inversion standard
Zone karstique possible
Discontinuité (faille?)
Interface géoélectrique
DD inversion standard
Echelle de résistivité (ohm.m)
50.0
70.0
90.0
110
130
150
200
300

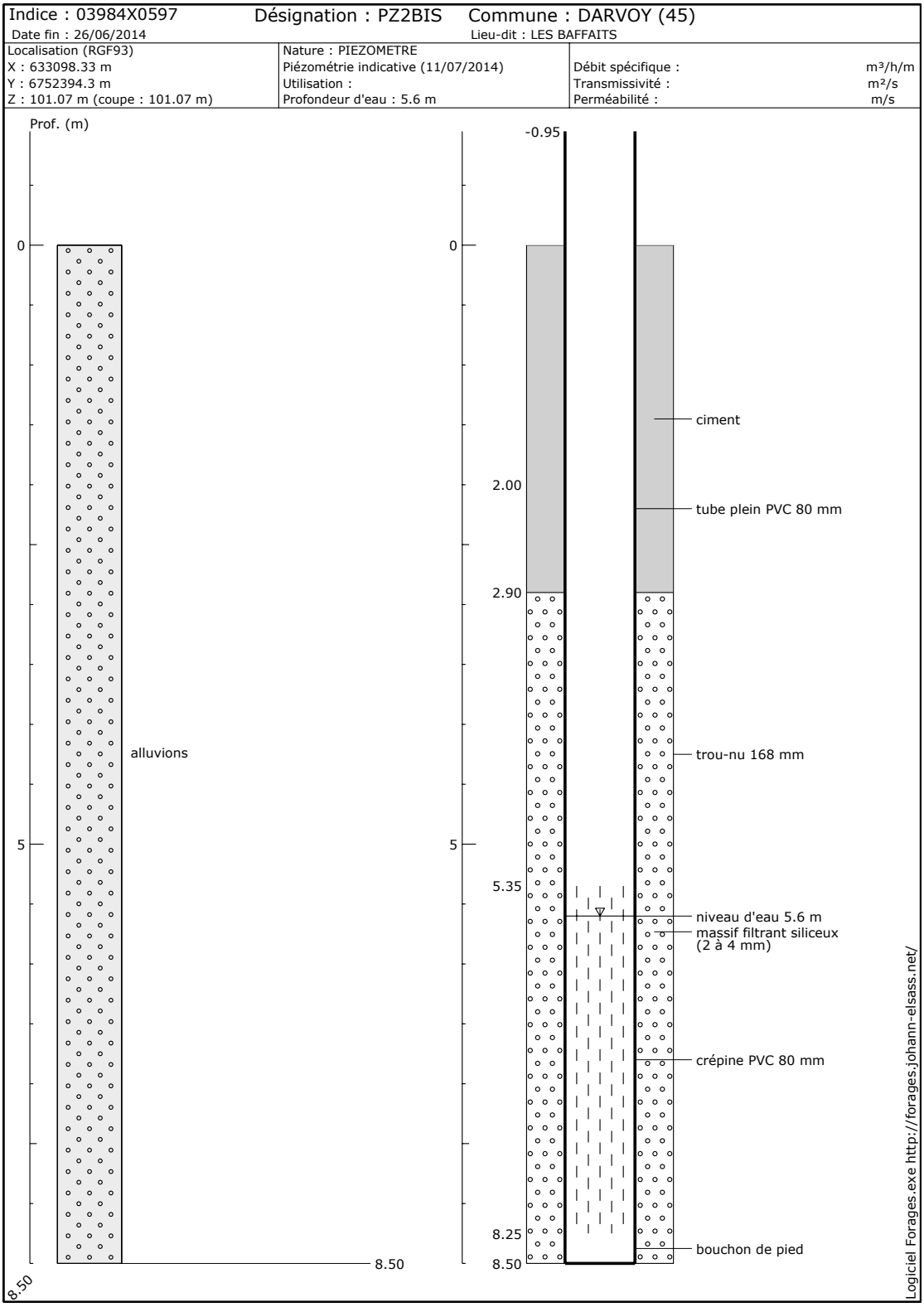

Spatialisation des résultats de l'interprétation des coupes géoélectriques
DA1_ERT
DA2_ERT
DA3_ERT
0
315
D1
D2
D3
D4
106
103
St. épur
la C
les Baffaits
Forage
Fontis
Discontinuité (faille?)
Zone karstique possible
0
50
100
150
200
N
S
W
E
6752650
6752600
6752550
6752500
6752450
6752400
6752350
6752300
6752250
6752200
6752150
6752100
632450
632500
632550
632600
632650
632700
632750
632800
632850
632900
632950
633000
633050
633100
633150
633200
633250
633300
633350

Annexe 2

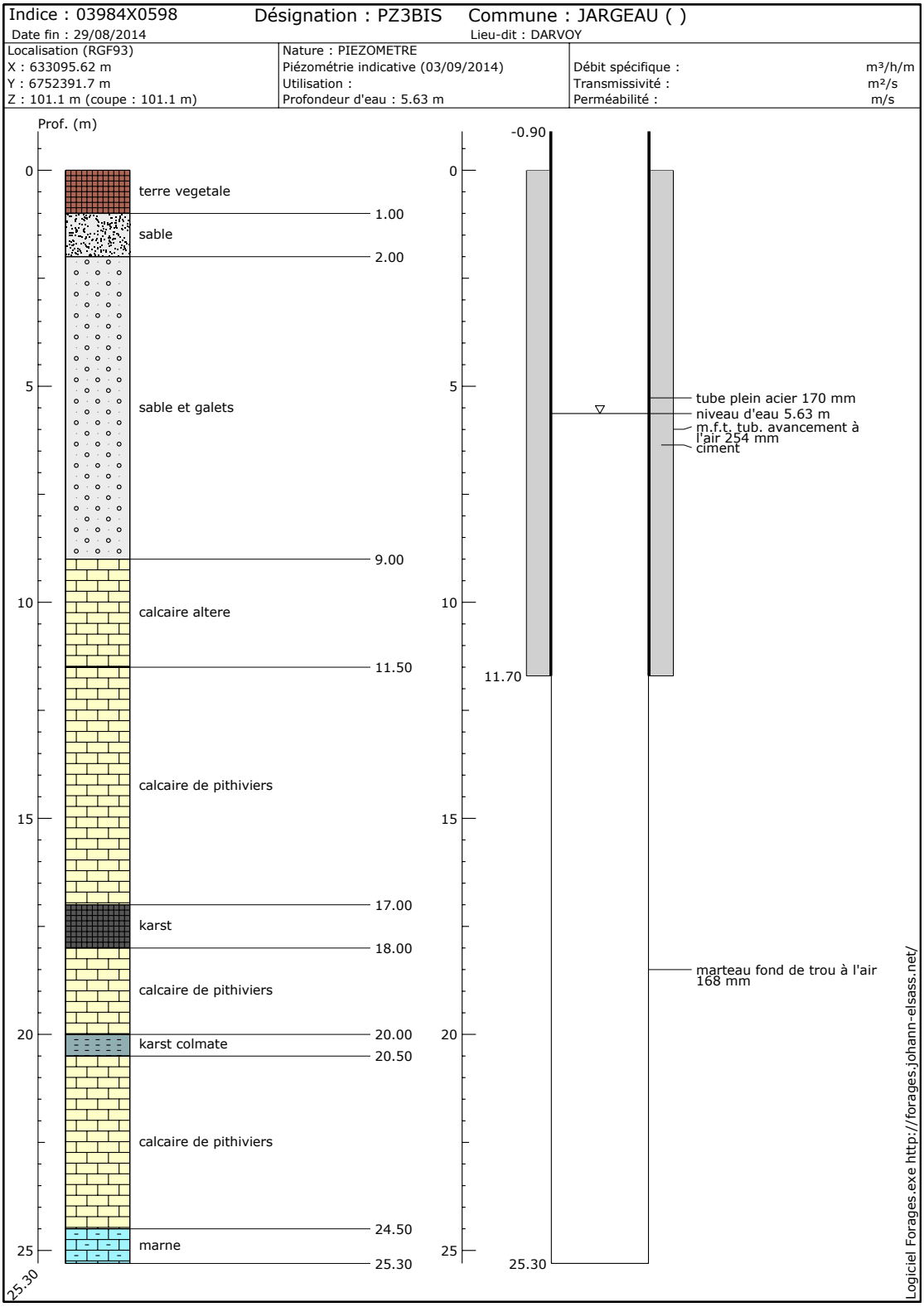
Logs géologique et technique des forages



Logs géologique et technique du forage Pz1



Logs géologique et technique du forage Pz2bis



Logs géologique et technique du forage Pz3bis

Annexe 3

Descriptif complet des opérations de traçage et résultats des analyses des eaux aux points d'injection et de suivi avant ces opérations

Descriptif des opérations de traçage de septembre 2014

Première opération de traçage (10/09/2014)				
Point d'injection	**Heure d'injection**	**Traceur**	**Quantité**	**Points de suivi**
Fontis	11h10	Uranine	10 g	Exhaure Pz1
				Pz2bis
				Pz3bis
Pz2bis (alluvions)	11h20	NaCl	20 g	Pz2bis
				Exhaure Pz1
Pz3bis (calcaire)	11h30	Sulforhodamine B	500 mg	Pz3bis
				Exhaure Pz1
Perte 1 en Loire (Position GPS : N 47.87037° E 2.11518°)	12h45	Naphtionate de sodium	1 kg	Exhaure Pz1
				Pz2bis
				Pz3bis
				Bouillon
Deuxième opération de traçage (11/09/2014)				
Point d'injection	**Heure d'injection**	**Traceur**	**Quantité**	**Points de suivi**
Fontis	12h45	Uranine	99 g	Exhaure Pz1
				Pz2bis
				Pz3bis
Troisième opération de traçage (12/09/2014)				
Point d'injection	**Heure d'injection**	**Traceur**	**Quantité**	**Points de suivi**
Perte 2 en Loire (Position GPS : N 47.87023° E 2.11477°)	16h10	Naphtionate de sodium	2 kg	Exhaure Pz1
				Pz2bis
				Pz3bis
				Bouillon
Quatrième opération de traçage (13/09/2014)				
Point d'injection	**Heure d'injection**	**Traceur**	**Quantité**	**Points de suivi**
Fontis	10h10	Uranine	891 g	Exhaure Pz1
				Pz2bis
				Pz3bis
				Bouillon

Composition des eaux aux points d'injection et de suivi avant les opérations de traçage

Lieu de prélèvement	Date	Heure	MES (mg/L)
Loire à Jargeau	08/09/2014	11h45	1,5
Exhaure Pz1	10/09/2014	10h55	4,8
Pz2bis (alluvions)	10/09/2014	10h20	315,4
Pz3bis (calcaire)	10/09/2014	10h25	11,0
Bouillon	12/09/2014	11h30	6,7

	Cations (mg/L)				
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	NH_4^{+}
Loire	37,654	4,700	14,761	3,696	< 0,010
Exhaure Pz1	49,330	4,340	13,630	3,800	< 0,010
Pz2bis	66,204	6,722	11,955	3,913	0,444
Pz3bis	116,130	11,520	8,559	< 0,010	< 0,010
Bouillon	48,310	4,710	13,230	3,550	0,020
	Anions (mg/L)				
	Cl^{-}	SO_4^{-}	NO_3^{-}	PO_4^{3-}	NO_2^{-}
Loire	17,022	13,993	4,198	0,019	< 0,010
Exhaure Pz1	18,240	15,050	8,380	0,160	< 0,010
Pz2bis	22,001	14,920	34,115	0,032	0,014
Pz3bis	22,773	27,956	78,732	0,548	1,672
Bouillon	17,910	15,220	11,720	0,180	< 0,010

Annexe 4

Analyse des ions chlorures à l'exhaure

L'analyse des ions chlorures des prélèvements à l'exhaure (pompage de Pz1) ne met pas en évidence une liaison entre le piézomètre aux alluvions (Pz2bis) et le forage Pz1 : teneurs < 22,6 mg/L et pas d'évolution cohérente :

Relève 1-1 10/09 11h17	18,857
Relève 1-3 10/09 11h30	18,406
Relève 1-5 10/09 11h45	18,428
Relève 1-7 10/09 12h15	18,687
Relève 1-9 10/09 12h45	18,540
Relève 1-11 10/09 13h15	18,491
Relève 1-13 10/09 14h30	18,534
Relève 1-15 10/09 15h30	19,279
Relève 1-17 10/09 16h30	18,572
Relève 1-19 10/09 17h30	18,624
Relève 2-1 10/09 18h00	18,288
Relève 2-3 10/09 19h30	18,539
Relève 2-6 10/09 21h45	18,545
Relève 2-9 11/09 00h00	22,599
Relève 2-12 11/09 02h15	21,898
Relève 2-15 11/09 4h30	20,224
Relève 2-18 11/09 6h45	18,849
Relève 2-21 11/09 9h00	18,658
Relève 2-24 11/09 11h15	20,136

Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement, Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr