Document à accès différé

Projet de franchissement de la Loire à Jargeau : Synthèse des études géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques et évaluation des risques liés au contexte karstique

Rapport final

BRGM/RP-67127-FR
Septembre 2017

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document à accès différé

Projet de franchissement de la Loire à Jargeau : Synthèse des études géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques et évaluation des risques liés au contexte karstique

Rapport final

BRGM/RP-67127-FR
Septembre 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

D. Salquèbre, J-M. Baltassat, S. Gourdier, J. Perrin
Avec la collaboration de
E. Husson

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : G. Noury	Nom : L. Chery
Fonction : Ingénieur géologue spécialisé en géotechnique	Fonction : Directrice-adjointe à la Direction des Actions Territoriales
Date : 31/07/17	Date : 03/08/17
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

Avertissement

Ce rapport s'inscrit dans le cadre d'une convention de recherche et développements partagés entre le Conseil Départemental du Loiret et le BRGM. Il est prévu une diffusion publique, à accès différé, soit un délai de 3 ans.

Mots-clés : Val d'Orléans, Calcaires de Beauce, Alluvions de la Loire, Karst, Fontis, Géophysique.

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

Salquèbre D., Baltassat JM., Gourdier S., Perrin J. avec la collaboration de **Husson E.** (2017) - Projet de franchissement de la Loire à Jargeau : synthèse des études géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques et évaluation des risques liés au contexte karstique. Rapport final. BRGM/RP- 67127-FR, 120 p., 31 ill., 4 tabl., 7 ann. dont 1 planche hors-texte.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse opérationnelle

Le Conseil départemental du Loiret souhaite réaliser une déviation routière entre Jargeau et Saint-Denis-de-l'Hôtel, avec franchissement de la Loire à l'ouest de Jargeau. Le BRGM intervient dans le cadre de ses missions d'appui aux politiques publiques, via une convention de recherche et développement partagés avec le Conseil départemental du Loiret. La mission se déroule en 3 phases : une synthèse des études géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques et évaluation des risques liés au contexte karstique (1), la participation aux réunions au cours de la procédure de consultation d'un marché de conception-réalisation (2), et des recommandations sur les suivis géophysique et hydrogéologique pendant la phase d'exécution (3).

Ce rapport présente les résultats de cette 1ère phase, soit une synthèse des données de reconnaissances réalisées en 2004, 2006 et 2014, au droit de la zone de franchissement de la Loire, jusqu'au passage de la digue de Loire au sud. Les investigations réalisées sont de nature géologique, géotechnique, hydrogéologique, et géophysique.

Ces investigations, analysées par le BRGM et complétées par des réflexions complémentaires, précisent le contexte local. Sous une couverture alluviale d'environ 5 à 10 mètres d'épaisseur, le substratum géologique calcaire est fortement karstifié, c'est-à-dire affecté entre autres par des cavités parfois organisées en réseau (« boyaux karstiques »). Des écoulements rapides d'eau souterraine s'y produisent, alimentés par les pertes des eaux de la Loire, et orientés vers l'ouest du Val (sources du Loiret, captages d'eau potable).

Les principaux risques d'impact du projet sur la ressource aquifère portent sur les risques de comblement de conduits karstiques, susceptibles de réduire les écoulements d'eaux issus de la Loire vers la nappe, ainsi que sur la qualité des eaux souterraines (captages d'eau potable en aval). Par ailleurs, le contexte karstique se traduit par un risque fort de mouvement de terrain. Sur la durée de vie supposée de l'ouvrage, la survenue d'un effondrement d'origine karstique sur l'emprise du projet est possible, voire probable, en particulier en cas de crue de la Loire. Un tel événement remettrait en cause non seulement la sécurité des biens et des personnes, mais aussi l'usage de l'infrastructure prévue.

Les investigations réalisées en 2004, 2006 et 2014 ont essentiellement suivi les axes pressentis du projet mais n'ont guère abordé sa véritable zone d'influence. Celle-ci dépend non seulement de la configuration géologique et du fonctionnement hydrogéologique du réseau karstique mais aussi de la conception du projet. Les investigations réalisées se sont par ailleurs principalement intéressées à l'aléa mouvement de terrain (bien que de manière incomplète), mais elles n'ont que peu traité l'aléa hydrogéologique et les interactions bilatérales pouvant avoir lieu entre les circulations d'eau et les mouvements de terrain (l'un perturbant l'autre et vice-versa).

Afin de limiter les risques mis en évidence, des recommandations ont été formulées :

- avant la phase de travaux : localisation et caractérisation des principaux conduits karstiques, et actions de sécurisation pour limiter les risques de mouvement de terrain ;
- avant et pendant la phase de travaux : localisation des vides potentiels ou des zones décomprimées (liée à la recommandation précédente sur les conduits karstiques) ;
- pendant la phase de travaux : précautions à prendre pour éviter de combler les conduits karstiques et de dégrader la qualité des eaux des aquifères ;
- avant, pendant et après la phase de travaux : mise en place d'un suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines.

Synthèse technique

Cadre de l'étude

Le Conseil départemental du Loiret souhaite réaliser une déviation de la RD 921 entre Jargeau et Saint-Denis-de-l'Hôtel avec la création d'une nouvelle route à 2 voies entre la RD 13 au sud sur la commune de Marcilly-en-Villette et la RD 960 à l'est de la commune de Saint-Denis-de-l'Hôtel.

Le BRGM intervient dans le cadre de ses missions d'appui aux politiques publiques, via une convention de recherche et développement partagés avec le Conseil départemental du Loiret. La mission se déroule en 3 phases :

1) Synthèse des études géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques et évaluation des risques liés au contexte karstique ;
2) Participation aux réunions au cours de la procédure de consultation d'un marché de conception-réalisation ;
3) Recommandations sur les suivis géophysique et hydrogéologique pendant la phase d'exécution.

Il s'agit dans le cadre de cette 1ère phase de réaliser une synthèse des données de reconnaissance géologique et géotechnique, et des investigations géophysiques, dans le but d'apprécier le risque karstique au droit du passage routier, et de proposer des recommandations, si nécessaire. L'expertise porte sur les risques de mouvement de terrain vis-à-vis du projet d'infrastructure routière d'une part, ainsi que sur les risques d'impact liés à la réalisation du projet, sur les circulations souterraines dans le système aquifère karstique d'autre part.

Contexte géologique, hydrogéologique et risques liés aux cavités

Dans le Val d'Orléans, les calcaires de Beauce constituent le substratum géologique. La Loire a creusé son lit au cours des dernières glaciations dans les calcaires de Pithiviers, qui correspondent à la partie supérieure des calcaires de Beauce. À l'ouest de Jargeau, cette formation carbonatée est recouverte par les alluvions de la Loire, essentiellement sablo-graveleuses, d'une épaisseur d'environ 5 à 10 m.

Du point de vue hydrogéologique, le secteur du Val d'Orléans est caractérisé par un aquifère principal au sein des calcaires de Beauce, fortement karstifié c'est-à-dire constitué par un réseau de conduits (ou « boyaux karstiques »). Les écoulements d'eau souterraine, alimentés par les pertes de la Loire, y sont très rapides (de l'ordre de 100 à 200 m/h). Compte-tenu de ce contexte, la ressource aquifère dépend en grande partie des apports par les eaux de la Loire, notamment dans le secteur de Jargeau.

Cette configuration se traduit par un aléa mouvement de terrain relativement fort sur l'ensemble du Val d'Orléans (3 à 4 fontis signalés par an, avec des diamètres ayant atteint près de 20 m pour des profondeurs maximales d'une dizaine de mètres). Les risques inhérents sont bien sûr à la mesure des événements : lorsque ceux-ci touchent une infrastructure, sa stabilité ou son usage peuvent-être remis en cause, avec éventuellement un risque pour la sécurité des biens et des personnes. Les bords de Loire et les zones de pertes du secteur de Jargeau sont connus pour un nombre important d'événements de ce type.

Principales investigations sur la zone d'étude

La zone d'étude correspond au tracé de franchissement de la Loire, jusqu'au passage de la digue de Loire au sud. Les études réalisées en 2004, 2006 et 2014 se sont implantées quasi-exclusivement sur les tracés prévisionnels. Avec un objectif de reconnaissance géologique, géotechnique ou hydrogéologique, il s'agit de sondages réalisés avec des méthodes différentes : carottage, destructif, pressiométrique, pénétrométrique. Conjointement à ces investigations ponctuelles, des investigations géophysiques ont été réalisées.

Synthèses géologique, géophysique et géotechnique

Les résultats des investigations réalisées et les compléments d'analyse du BRGM indiquent toutes que le substratum géologique carbonaté est fortement karstifié. En témoignent : non seulement les indices de surface (dolines, fontis), mais aussi les profils géophysiques et enfin les observations en sondages (cavités), remplies ou non de matériaux meubles. Conformément à l'état actuel de nos connaissances, les investigations réalisées indiquent que la karstification se traduit de 2 manières, (1) au sommet du calcaire par crypto-karstification, soit une formation résiduelle issue de l'altération des calcaires (niveau « marneux », « mou ») et (2) par des vides au sein du substratum carbonaté (conduits/drains karstiques). Les cavités traversées par les sondages se situent essentiellement entre 82 et 92 m NGF pour la rive sud (cote du terrain naturel comprise entre 100 et 103 m NGF), soit de 10 à 20 m de profondeur par rapport au sol.

Par ailleurs, à l'issue d'un bilan des investigations géophysiques menées sur la zone d'étude (2004, 2006, 2014), et d'une interprétation effectuée en comparaison d'autres données géophysiques dans le Val d'Orléans, l'analyse du BRGM apporte plusieurs éléments d'information : les méthodologies géophysiques utilisées en 2004, 2006 et 2014 sont peu adaptées pour une localisation des cavités et encore moins des conduits karstiques, de plus, la zonation de 2004 n'est pas fiable en termes de risque vis-à-vis de l'aléa géologique.

La synthèse des indices karstiques indique la forte concentration d'indices en rive sud de Loire et plus particulièrement à proximité du bord de Loire, à la fois en amont et en aval du tracé de franchissement. Ce contexte se traduit par un fort aléa de mouvement de terrain, fortement accru en cas de submersion. En cas d'inondation (crue de la Loire), il est plus fortement probable qu'un mouvement de terrain d'origine karstique survienne sur l'emprise du projet.

Synthèse hydrogéologique

Les écoulements souterrains au droit de la zone d'étude sont rapides au sein du réseau karstique (calcaires de Pithiviers) et sont alimentés essentiellement par les pertes des eaux de la Loire, qui se produisent dans le lit du fleuve et à proximité (ex : étang de Mauger). Le sens d'écoulement global est orienté vers l'ouest/sud-ouest ce qui implique que des conduits karstiques actifs sont probablement positionnés au droit du tracé du projet, entre la Loire et la digue. Les investigations, réalisées essentiellement en 2004 et 2006 et présentées dans les documents consultés, n'apportent pas de précisions sur les écoulements souterrains (drains actifs ? débits ?).

Évaluation des risques au regard du contexte karstique

Les principaux risques d'impact du projet sur la ressource aquifère portent sur les risques de comblement de conduits karstiques, susceptibles de réduire les écoulements d'eaux issus de la Loire vers la nappe. Or, il n'est pas possible de quantifier l'impact potentiel d'un éventuel comblement de conduits karstiques, dans la mesure où les quantités infiltrées, et leur évolution dans le temps sont mal connues. Un autre risque d'impact concerne la qualité de la ressource en eau, exploitée notamment pour des captages d'eau potable en aval.

Par ailleurs, le contexte karstique se traduit par un risque fort de mouvement de terrain. Sur la durée de vie supposée de l'ouvrage, la survenue d'un effondrement d'origine karstique sur l'emprise du projet est possible, voire probable, en particulier en cas de crue de la Loire. Les mouvements de terrain ainsi générés peuvent atteindre plusieurs mètres de diamètre et quelques mètres de profondeur. S'ils surviennent en phase de travaux, de tels événements remettraient non seulement en cause la sécurité des biens et des personnes se trouvant à proximité, mais imposeraient aussi très vraisemblablement un arrêt de chantier. S'ils surviennent en phase d'exploitation sur un ouvrage non conçu pour supporter un tel désordre, de tels événements remettraient en cause la stabilité de l'ouvrage et donc son usage, voire la sécurité des biens et des personnes y circulant à ce moment-là.

Synthèse des recommandations

La configuration géologique et le fonctionnement hydrogéologique complexes du secteur nécessitent d'être connus dans l'espace et dans le temps. Les cavités karstiques souterraines s'organisent en effet en un réseau évolutif. Des conduits peu actifs, voire bouchés peuvent se réactiver à la faveur de perturbations (crues de la Loire, effondrement affectant une cavité, comblement anthropique).

Les investigations réalisées ont essentiellement suivi les axes pressentis du projet mais n'ont guère abordé sa véritable zone d'influence. Celle-ci dépend non seulement de la configuration géologique et du fonctionnement hydrogéologique du réseau karstique mais aussi de la conception du projet. Les investigations réalisées se sont par ailleurs principalement intéressées à l'aléa mouvement de terrain (bien que de manière incomplète), mais elles n'ont que peu traité l'aléa hydrogéologique et les interactions bilatérales pouvant avoir lieu entre les circulations d'eau et les mouvements de terrain (l'un perturbant l'autre et vice-versa).

Afin de limiter les risques mis en évidence, des recommandations ont été formulées pour mettre en place les actions suivantes :

- une localisation et une caractérisation des principaux conduits karstiques (objectif n° 1) ;
- des précautions à prendre en phase de travaux, pour éviter de combler les conduits karstiques (objectif n° 2) ;
- un suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines avant, pendant et après la phase de travaux (objectif n° 3) ;
- une localisation des vides potentiels ou des zones décomprimées (objectif n° 4, qui rejoint l'objectif n° 1) ;
- des actions de sécurisation, pour limiter les risques de mouvement de terrain (objectif n° 5).

Sommaire

1. Cadre de l'étude 13

1.1. PROJET DE FRANCHISSEMENT DE LA LOIRE 13

1.2. MISSION DU BRGM 14

2. Contexte géologique, hydrogéologique, et risques liés aux cavités 15

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL 15
2.1.1. Les alluvions de la Loire 16
2.1.2. Les calcaires de Beauce 16

2.2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE GÉNÉRAL 17
2.2.1. Nappe alluviale de la Loire 17
2.2.2. Nappe des calcaires de Beauce 17
2.2.3. Piézométrie et interactions entre les deux nappes 18

2.3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU KARST 21
2.3.1. Processus de karstification 21
2.3.2. Mécanismes à l'origine de mouvements de terrain 22

2.4. LES RISQUES GÉOTECHNIQUES LIÉS AUX CAVITÉS DANS L'ORLÉANAIS 23
2.4.1. Généralités 23
2.4.2. Exemples de mouvements de terrain affectant des infrastructures, dans le Val d'Orléans 23
2.4.3. Exemples de mouvements de terrain affectant des infrastructures, dans d'autres régions karstiques 25
2.4.4. Exemples de difficultés de confortement des zones karstiques instables, dans le Val d'Orléans 25

3. Principales investigations sur la zone d'étude 27

3.1. LISTE DES ÉTUDES ET DES INVESTIGATIONS RÉALISÉES 27

3.2. CONTEXTE DES ÉTUDES RÉALISÉES, AU REGARD DE LA NORME EN MATIÈRE D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES 30

3.3. INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES 31

3.4. INVESTIGATIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES : TYPE DE SONDAGES ET PROFONDEUR ATTEINTE 33

3.5. INVESTIGATIONS HYDROGÉOLOGIQUES RÉALISÉES 34

3.6. AVIS SUR LA LOCALISATION DES INVESTIGATIONS 35

4. Synthèses géologique, géophysique et géotechnique 37

4.1. ANALYSE DU CONTEXTE GÉOLOGIQUE, CARACTÉRISTIQUES DE LA KARSTIFICATION 37

4.2. SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOPHYSIQUES 39
4.2.1. Analyse des investigations géophysiques de 2004 et 2006 (EDG) 39
4.2.2. Analyse des investigations géophysiques de 2014 (IMG) 40
4.2.3. Analyse des données géophysiques, intégrant les résultats d'autres études BRGM 42
4.2.4. Conclusion de la synthèse géophysique 46

4.3. SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES 48
4.3.1. Indices karstiques de surface, observations 48
4.3.2. Indices karstiques de surface, analyse statistique 50
4.3.3. Indices karstiques en profondeur : données issues des forages 53
4.3.4. Analyse des investigations géotechniques menées dans la « couverture » 54

5. Synthèse hydrogéologique 57

5.1. ANALYSE DES MESURES HYDROGÉOLOGIQUES RÉALISÉES 57

5.2. COMPLÉMENTS DU BRGM : PERTES DE LOIRE ET ÉTANG DE MAUGER 58

5.3. SYNTHÈSE DES DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES 60

6. Évaluation des risques au regard du contexte karstique 63

6.1. ÉVALUATION DES RISQUES D'IMPACT SUR LES CIRCULATIONS AU SEIN DE L'AQUIFÈRE KARSTIQUE 64

6.2. ÉVALUATION DES RISQUES DE MOUVEMENT DE TERRAIN 65

6.3. AUTRES RISQUES GÉOTECHNIQUES 66

7. Synthèse des recommandations et propositions complémentaires 67

7.1. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES 67

7.2. RECOMMANDATIONS VISANT À LIMITER L'IMPACT DU PROJET SUR L'AQUIFÈRE KARSTIQUE 68

7.3. RECOMMANDATIONS VISANT À LIMITER L'IMPACT D'UN MOUVEMENT DE TERRAIN SUR LE PROJET 68

7.4. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS 69

7.5. PROPOSITIONS COMPLÉMENTAIRES 70

8. Conclusion 71

9. Bibliographie 73

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation, tracé du projet 13
Illustration 2 : Localisation de la zone d'étude, fond cartographique à 1/25 000 (source : IGN) 14
Illustration 3 : Extrait de carte géologique du Val d'Orléans et coupe géologique entre les sources du Loiret et Mardié (Caudron, 1965) 15
Illustration 4 : Extrait de la carte géologique à 1/1000 000 (BRGM) 17
Illustration 5 : Coupe hydrogéologique du site d'étude i-Fontis (Perrin *et al.,* 2016) 18
Illustration 6 : Carte des circulations karstiques du Val d'Orléans (Jozja *et al.,* 2010) 20
Illustration 7 : Photo du remplissage d'une cavité karstique par des alluvions anciennes, à Olivet (Charles et Graviou, 2016) 21
Illustration 8 : Schéma illustrant l'apparition d'un fontis 22
Illustration 9 : Schéma illustrant l'apparition d'un affaissement par soutirage dans un sol non cohésif (source : Waltham *et al.,* 2005) 22
Illustration 10 : Exemples de mouvements de terrain dans le Val d'Orléans 24
Illustration 11 : Coupe schématique du karst sous couverture à Malataverne (26) 25
Illustration 12 : Localisation des fuseaux « ouest » et « grand ouest » étudiés dans le cadre des investigations menées en 2004, ainsi que le tracé final retenu 28
Illustration 13 : Localisation des investigations, en rive droite et au droit du lit mineur de la Loire 28
Illustration 14 : Localisation des investigations, en rive gauche de la Loire 29
Illustration 15 : Localisation des investigations en rive gauche de la Loire, zoom sur le secteur de la digue 29
Illustration 16 : Localisation des investigations géophysiques du secteur ouest de Jargeau, sur fond de carte topographique IGN à 1/25 000 et du MNT à 1 m. 32
Illustration 17 : Localisation des piézomètres et des sondages ayant fait l'objet de mesure 34
Illustration 18 : Coupe schématique simplifiée des calcaires de Beauce sous couverture alluviale, au droit de la zone d'étude en rive sud, résultant de l'analyse du contexte géologique 39
Illustration 19 : Comparaison des résultats (extraits) de tomographie électrique d'IMG (à gauche) et d'EDG (à droite) au niveau de la digue. 41
Illustration 20 : Synthèse des observations géophysiques de 2004 et 2006 le long du tracé du projet (ex - « faisceau Grand Ouest »). 44
Illustration 21 : Étalonnage de l'interprétation géophysique le long du tracé de franchissement de la Loire (ex-faisceau « Grand Ouest ») dans le contexte local. 47
Illustration 22 : Carte synthétisant les indices karstiques et fontis, localisés dans le cadre de différentes études, et les dépressions fermées issues du traitement d'une donnée MNT Lidar 49
Illustration 23 : Extrait cartographique de la zone d'étude, fond carto MNT lidar, et localisation de la zone de dépression topographique sur le tracé du projet 50
Illustration 24 : Extrait cartographique avec localisation des indices karstiques à l'ouest de Jargeau, et zone choisie pour l'évaluation statistique 51
Illustration 25 : Zone située autour du projet, dimensions des mouvements de terrain connues 52
Illustration 26 : Extrait du log de forage SC42, entre 4 et 10,5 m de profondeur 54
Illustration 27 : Données piézométriques non synchrones, acquises en sept.-oct. 2004 par le CETE 57
Illustration 28 : Sens d'écoulement de la nappe des calcaires, d'après la carte piézométrique de 1966 (Deprez, 1967), fond IGN à 1/25 000 59

Illustration 29 : Courbe de restitution d'Uranine à la source du Bouillon (injection à l'étang de Mauger)....60
Illustration 30 : Tracé du projet dans la zone de franchissement de la Loire....63
Illustration 31 : Schéma de coupe d'une pile en Loire sur fondation profonde en zone karstique - projet (source : Conseil départemental du Loiret)....64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Profondeur moyenne atteinte par les sondages, au droit de la zone d'étude (2004, 2006, 2014)....33
Tableau 2 : Données géotechniques sur les couches des alluvions et du calcaire altéré, en rive droite....55
Tableau 3 : Données géotechniques sur les couches des alluvions et du calcaire altéré, en rive gauche....55
Tableau 4 : Synthèse des recommandations....69

Liste des annexes

Annexe 1 : Données utilisées pour la synthèse géophysique, avec leurs caractéristiques....75
Annexe 2 : Liste des sondages réalisés dans la zone d'étude....79
Annexe 3 : Coupe géologique au droit de la zone d'étude (Planche hors-texte)....81
Annexe 4 : Pseudo-section de résistivité apparente des tomographies électriques....83
Annexe 5 : Illustrations photographiques....93
Annexe 6 : Données issues des sondages - Profondeur du toit du calcaire et profondeur des vides traversés....95
Annexe 7 : Rapport du traçage hydrogéologique réalisé en 2009, à partir des pertes de la Loire et de l'étang de Mauger (EDREE)....97

1. Cadre de l'étude

1.1. PROJET DE FRANCHISSEMENT DE LA LOIRE

Le Conseil départemental du Loiret souhaite réaliser une déviation de la RD 921 entre Jargeau et Saint-Denis-de-l'Hôtel avec la création d'une nouvelle route à 2 voies entre la RD 13 au sud sur la commune de Marcilly-en-Villette et la RD 960 à l'est de la commune de Saint-Denis-de-l'Hôtel.

D'un linéaire de 14,7 kilomètres, le tracé de la future voirie retenu suite à l'enquête publique franchit différents cours d'eau, dont la Loire, mais aussi la digue de protection du Val d'Orléans (Illustration 1).

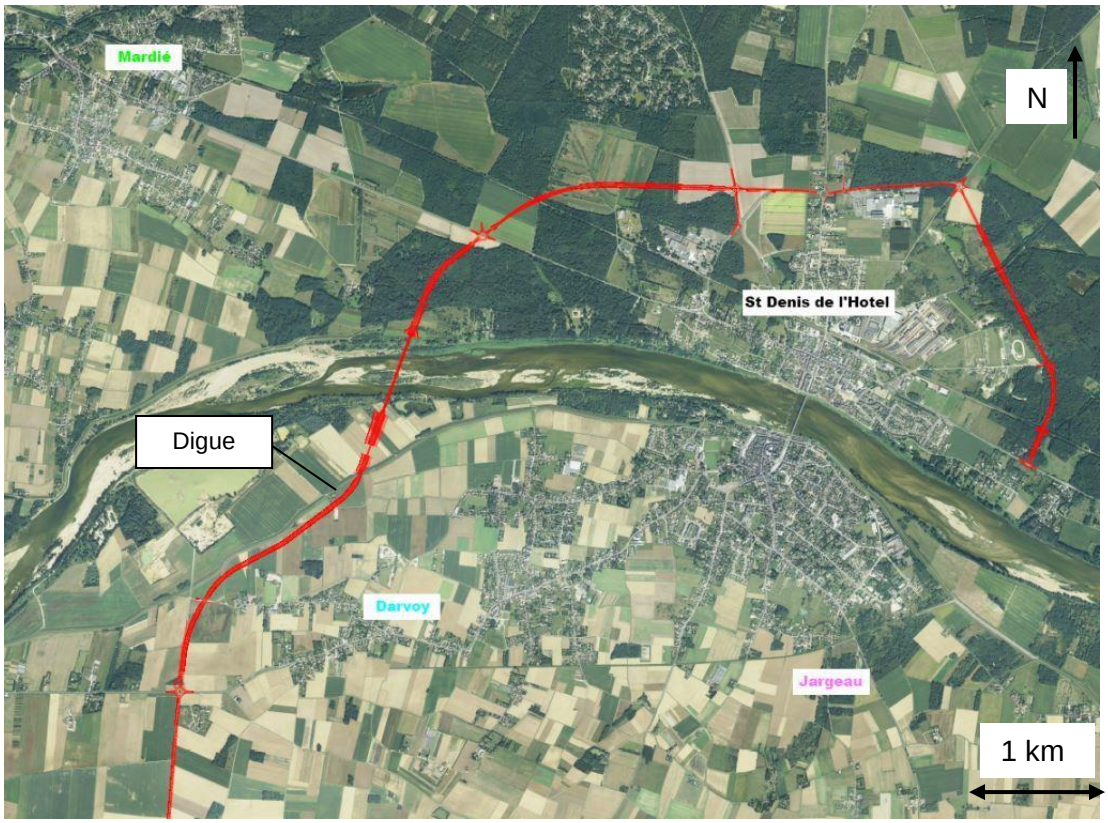


Illustration 1 : Localisation, tracé du projet.

Le projet comprend un nouveau pont sur la Loire, d'une longueur de 570 m et constitué de 6 travées, qui reposera sur 5 piles de pont. De plus, un ouvrage de décharge de 75 m de longueur (3 travées de 25 m) est prévu entre la Loire et la digue, afin de permettre l'évacuation des eaux lorsque le champ majeur du lit endigué de la Loire est submergé (à partir d'une crue cinquantennale).

Le franchissement de la digue est prévu à niveau sur la levée, en y insérant une série de d'inclusions rigides sous l'emprise de la future route, et en y associant un rideau de palplanches.

1.2. MISSION DU BRGM

Le BRGM intervient dans le cadre de ses missions d'appui aux politiques publiques, via une convention de recherche et développement partagés avec le Conseil départemental du Loiret.

La mission se déroule en 3 phases :

1) Synthèse des études géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques et évaluation des risques liés au contexte karstique ;
2) Participation aux réunions au cours de la procédure de consultation d'un marché de conception-réalisation ;
3) Recommandations sur le suivi géophysique et hydrogéologique pendant la phase d'exécution.

NB : un appui technique du Cerema au Conseil départemental du Loiret est également prévu, à partir de la phase 2. Leur mission d'expertise géotechnique sur le risque karstique porte sur la dimension « ouvrage », tandis que celle du BRGM est orientée vers l'appréciation du « milieu ».

Il s'agit dans le cadre de cette 1ère phase de réaliser une synthèse des données de reconnaissances géologique et géotechnique, et des investigations géophysiques, **dans le but d'apprécier le risque karstique** au droit du passage routier, et de proposer des recommandations, si nécessaire. L'expertise porte sur les risques de mouvement de terrain vis-à-vis du projet d'infrastructure routière d'une part, ainsi que sur les risques d'impact liés à la réalisation du projet sur les circulations souterraines dans le système aquifère karstique d'autre part.

Le périmètre de l'étude (Illustration 2) concerne la zone du projet correspondant au franchissement de la Loire, incluant le viaduc et le territoire situé au sud (lieu-dit « les Boires ») entre la Loire et la digue (incluse).

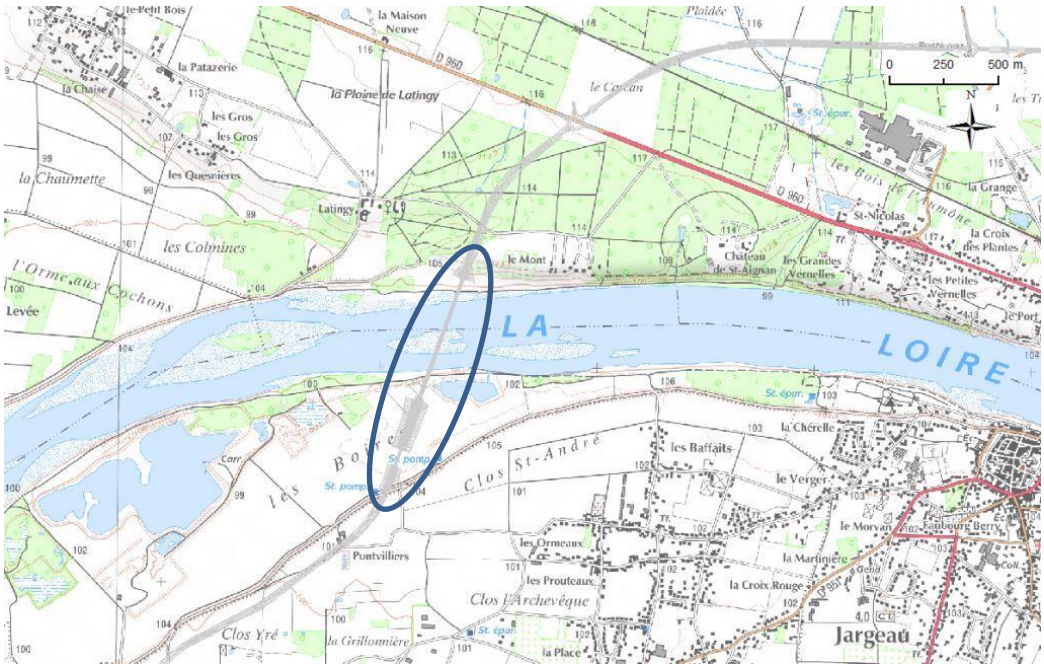


Illustration 2 : Localisation de la zone d'étude, fond cartographique à 1/25 000 (source : IGN).

Ce rapport présente les résultats de la 1ère phase de la mission.

2. Contexte géologique, hydrogéologique, et risques liés aux cavités

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

Le Val d'Orléans correspond à un élargissement sensible du lit majeur de la Loire, qui se marque par des divagations du lit mineur au cours de la dernière glaciation (Würm). Ces divagations ont eu lieu dans la traversée de la zone d'épandage des formations détritiques argilo-sableuses peu perméables du Burdigalien (époque du Miocène), lesquelles recouvrent encore actuellement les calcaires de Beauce en Sologne et en forêt d'Orléans (Illustration 3).

L'élargissement du lit majeur de la Loire s'opère à partir d'Ouzouer-sur-Loire. À l'aval de Châteauneuf-sur-Loire, le Val entaille le substratum carbonaté constitué par les calcaires de Pithiviers. Il est alors encaissé d'une vingtaine de mètres entre le coteau de Beauce au nord et le coteau solognot au sud, escarpements créés par l'enfoncement du lit majeur du fleuve dans l'entablement carbonaté façonné pendant la glaciation précédente du Riss (Lepiller, 2006).

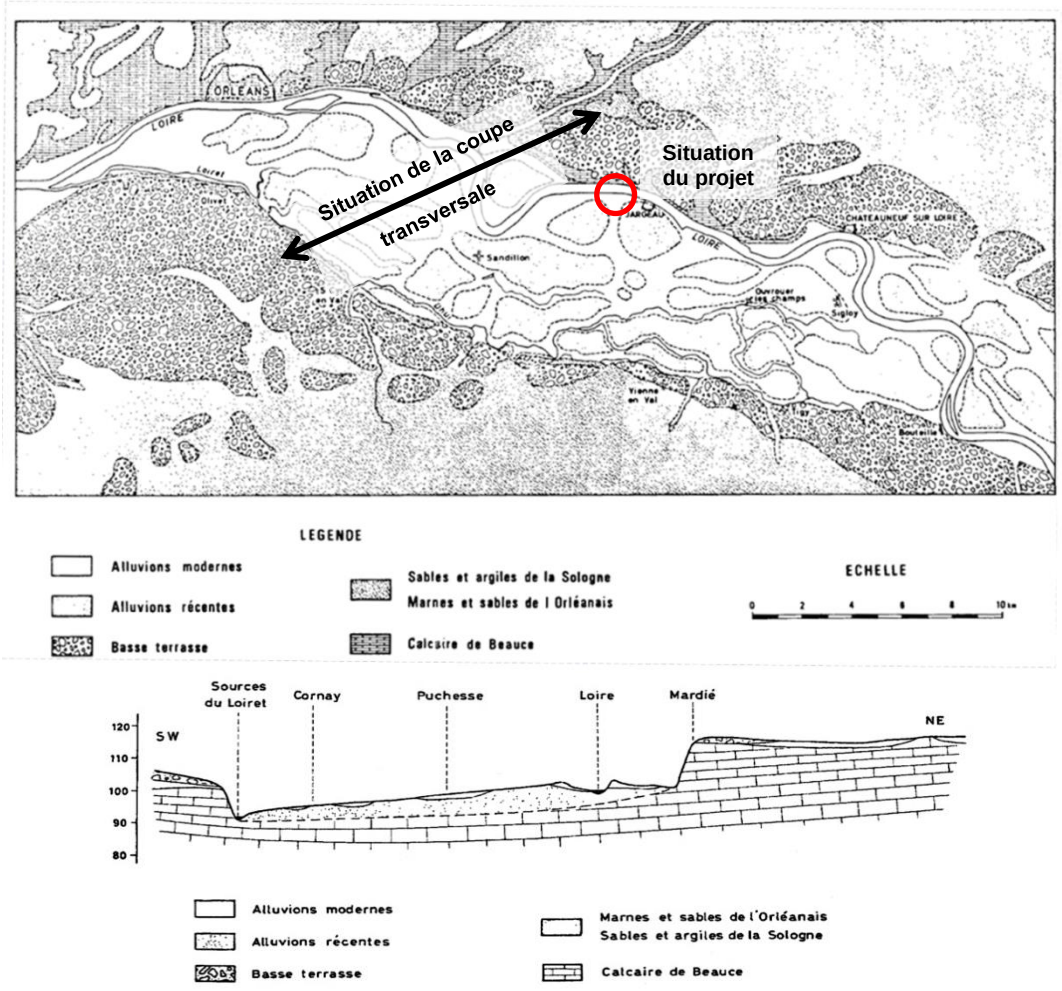


Illustration 3 : Extrait de carte géologique du Val d'Orléans et coupe géologique entre les sources du Loiret et Mardié (Caudron, 1965).

2.1.1. Les alluvions de la Loire

Entre Châteauneuf-sur-Loire et Blois, le lit de la Loire entame les calcaires et ceux-ci sont essentiellement recouverts par une couche d'alluvions d'épaisseur variable, de l'ordre de 5 à 10 m (Illustration 3). Ces alluvions sont constituées majoritairement par des graviers à la base, puis des sables plus ou moins grossiers et enfin des limons de débordement.

À partir du maximum du Würm qui a marqué la fin de la période de creusement du lit majeur, la Loire dépose successivement des galets pluri-décimétriques, puis sur quelques mètres, des graviers et sables, et enfin des limons plus ou moins argileux vers le haut (Lepiller, 2006). À l'Holocène, les alluvions sont sableuses et graveleuses. Un réseau hydrographique superficiel assez dense, notamment dans la partie sud du Val, a décapé ces alluvions sableuses qui ne subsistent qu'en buttes allongées appelées « montilles » pour s'établir sur le toit peu perméable des horizons supérieurs de la séquence alluviale inférieure (würmienne).

2.1.2. Les calcaires de Beauce

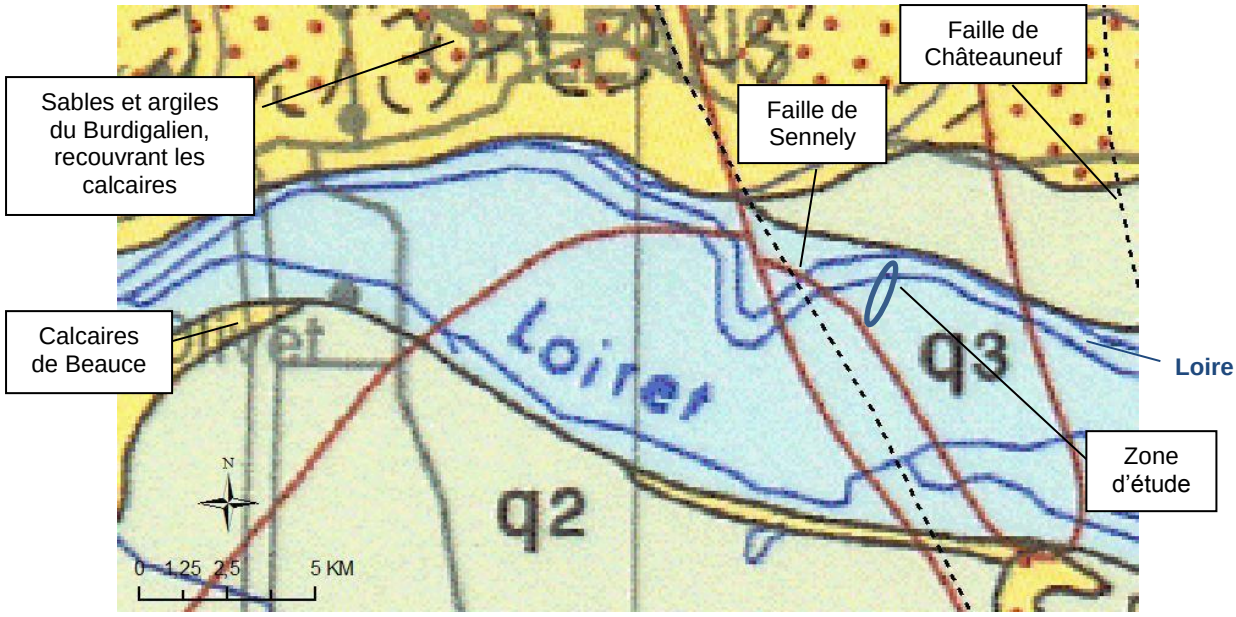
D'une épaisseur de l'ordre de 50 à 80 m, les calcaires de Beauce constituent le substratum géologique principal de la région orléanaise. Ils présentent un pendage léger vers le sud, où ils passent sous couverture des sables et argiles du Burdigalien, et d'anciennes terrasses alluviales, en Sologne.

La formation des calcaires de Beauce (calcaire de Pithiviers et calcaire d'Étampes) correspond à l'extension d'un (ou plusieurs) lac(s) qui s'est (se sont) formé(s) entre 43 et 25 millions d'années (Éocène à Aquitanien) dans la Beauce et aussi sur la majeure partie de la Sologne.

Les calcaires de Beauce offrent une grande variété de faciès lithologiques : à l'exception de calcaires micritiques plus massifs, ils comportent presque tous de très nombreux vides de tailles diverses leur conférant une porosité primaire élevée. L'interconnexion de ces vides contribue à la perméabilité du calcaire qui est encore augmentée par la fracturation et la karstification.

De manière générale, la fissuration du calcaire est un phénomène mal connu. Certaines études menées localement mettent en évidence des directions principales de fissurations qui peuvent être reliées aux déformations régionales des séries lacustres nord-est/sud-ouest mais également des directions secondaires difficilement explicables, sinon liées à des phénomènes tectoniques locaux (Lorrain 1972 ; Trautman 1974).

Le calcaire de Pithiviers est séparé du calcaire d'Étampes par la molasse du Gâtinais dont l'épaisseur passe de quelques mètres au maximum sous le Val d'Orléans, à l'ouest de la faille de Sennely (en aval de Châteauneuf, Illustration 4), à plusieurs dizaines de mètres vers l'est et le sud-est (Lepiller, 2006). Les bancs marneux (marnes de Blamont) de la partie sommitale des calcaires de Beauce sont peu épais à l'ouest de la faille de Sennely.



q3 : quaternaire récent (alluvions récentes/modernes), q2 : quaternaire ancien (terrasses anciennes)

Illustration 4 : Extrait de la carte géologique à 1/1 000 000 (BRGM).

En résumé de la partie 2.1, les calcaires de Beauce constituent le substratum géologique de la région orléanaise. Dans le Val d'Orléans, la Loire a creusé son lit au cours des dernières glaciations dans les calcaires de Pithiviers, qui correspondent à la partie supérieure des calcaires de Beauce. À l'ouest de Jargeau, cette formation carbonatée est recouverte par les alluvions de la Loire, essentiellement sablo-graveleuses, d'une épaisseur d'environ 5 à 10 m.

2.2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

2.2.1. Nappe alluviale de la Loire

Les alluvions étant essentiellement constituées de sables et de graviers, elles présentent une perméabilité d'interstices et constituent donc une formation aquifère. Elles constituent la nappe la plus proche de la surface, captée par de nombreux puits et forages dans le Val d'Orléans.

Toutefois, l'épaisseur saturée est généralement faible et sa perméabilité bien moindre que celle de l'aquifère des calcaires sous-jacents. De ce fait, les forages d'eau réalisés au cours des dernières décennies dans le Val dépassent les alluvions pour atteindre la nappe sous-jacente des calcaires de Beauce.

2.2.2. Nappe des calcaires de Beauce

Les calcaires de Beauce constituent une formation perméable, intrinsèquement (calcaires de Pithiviers vacuolaires), du fait de leur fissuration et de leur forte karstification qui se caractérise par des conduits d'écoulement localisés pouvant atteindre une taille métrique à plurimétrique.

Dans le Val d'Orléans, du fait d'une intense karstification, ils constituent un aquifère très productif, au sein duquel les écoulements sont très rapides, de l'ordre de 100 à 200 m/h entre Jargeau et les sources du Loiret, d'après les données de traçages hydrogéologiques (données accessibles sur le site web du SIGES[1] Centre-Val de Loire – http://sigescen.brgm.fr).

[1] SIGES : Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines.

Dans le Val d'Orléans, la nappe des calcaires de Beauce est alimentée par les pertes de Loire : les premières pertes se situent au niveau de Châteauneuf-sur-Loire, à l'aval du talus formé par la surface piézométrique de l'aquifère alluvial (Lepiller, 2006). D'autres, très nombreuses, se situent en rive sud, en amont et en aval de Jargeau (Illustration 6). Ces pertes massives, pouvant atteindre une quinzaine de m^3/s, sont la caractéristique principale du système et sont à l'origine du développement du réseau karstique (Chatelain *et al.,* 1981 ; Chery, 1983). Si la partie amont est caractérisée par la présence des pertes sur une vingtaine de kilomètres, la partie aval correspond à une zone d'exhaure, les résurgences du Loiret, dont la source dite du « Bouillon », dans le Parc floral, est la plus en amont et la plus connue (Illustration 6).

NB : Dans le secteur du projet, de nombreuses pertes sont référencées, au niveau de l'étang de Mauger (cf. partie 5.2).

2.2.3. Piézométrie et interactions entre les deux nappes

Des cartes piézométriques ont été réalisées en 1966 (Desprez, 1967) avec une distinction des deux nappes, l'une libre dans les alluvions, l'autre dans les calcaires de Beauce dont la captivité est provoquée, à l'est du méridien de Châteauneuf-sur-Loire, par la présence continue de formations peu perméables du Burdigalien (marnes de l'Orléanais), sous les alluvions (Martin, Noyer, 2003). À l'ouest en revanche, les niveaux des deux nappes semblent s'équilibrer du fait de la disparition de ce niveau imperméable. C'est le cas dans la zone d'étude à l'ouest de Jargeau.

Les interactions entre les deux nappes ont été précisées dans le cadre d'un projet de recherche nommé i-Fontis (Perrin *et al.,* 2016), qui a permis d'équiper des piézomètres voisins atteignant distinctement le niveau aquifère des alluvions et celui des calcaires (Illustration 5). Le site i-Fontis se trouve à 1,5 km à l'est de la zone d'étude, dans un contexte similaire. Lorsque les alluvions reposent sur les calcaires, sans niveau peu perméable intercalé, les surfaces piézométriques des deux nappes sont quasiment confondues en régime faiblement varié. En régime varié, les impulsions de charge se propagent avec un retard de quelques heures dans les alluvions.

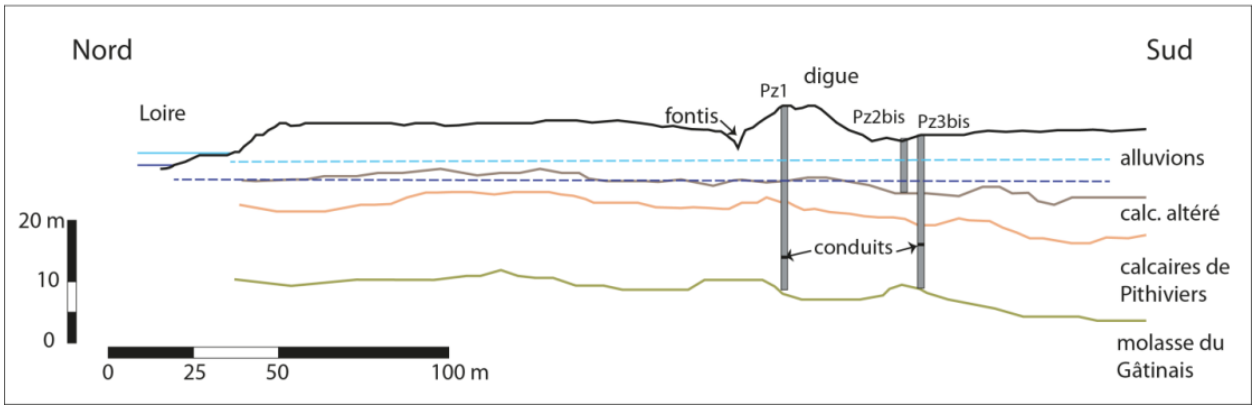


Illustration 5 : Coupe hydrogéologique du site d'étude i-Fontis (Perrin et al, *2016).*

Dans la nappe des calcaires, les directions d'écoulement mettent en évidence des axes de drainage préférentiels de direction globale est-ouest qui paraissent en liaison avec les anciens lits de la Loire et qui correspondent probablement à d'anciennes pertes (ou poljés), comme le suggère la forme brusquement interrompue de certains de ces chenaux (Lepiller, 2006). La morphologie des dépressions, aujourd'hui fossilisées par les alluvions du lit majeur ou noyées sous les eaux du lit mineur, bien que de plus grandes dimensions, présente beaucoup d'analogies avec certaines pertes présentes en forêt d'Orléans qui absorbent des cours d'eau nés sur la formation de Sologne.

La Ville d'Orléans exploite trois captages (le Gouffre, le Theuriet et le Bouchet) situés dans le Val. Ces ouvrages, peu profonds (17 à 26 m), captent l'eau dans l'aquifère des calcaires de Pithiviers, fortement karstifiés dans le secteur proche des sources du Loiret. Un captage d'eau potable est par ailleurs à signaler à Sandillon : il s'agit d'un forage plus profond (environ 80 m) qui atteint les calcaires d'Étampes.

Plusieurs traçages réalisés à partir des pertes situées dans le lit mineur ou d'un point d'injection qui se trouve sur l'axe de drainage karstique permettent d'illustrer les circulations karstiques au sein du Val d'Orléans (Illustration 6). Les résultats montrent des vitesses de circulation apparentes peu variables, entre 100 et 200 m/h et peu dépendantes du débit de la Loire.

En résumé de la partie 2.2, le secteur du Val d'Orléans est caractérisé par un aquifère principal au sein des calcaires de Beauce, fortement karstifiés c'est-à-dire marqués par un réseau de conduits (ou « boyaux karstiques »). Les écoulements d'eau souterraine, alimentés par les pertes de la Loire, y sont très rapides (de l'ordre de 100 à 200 m/h). Compte-tenu de ce contexte, la ressource aquifère dépend en grande partie des apports par les eaux de la Loire, qui s'infiltrent dans ces calcaires notamment dans le secteur de Jargeau, y compris dans la zone du projet de pont (Illustration 6).

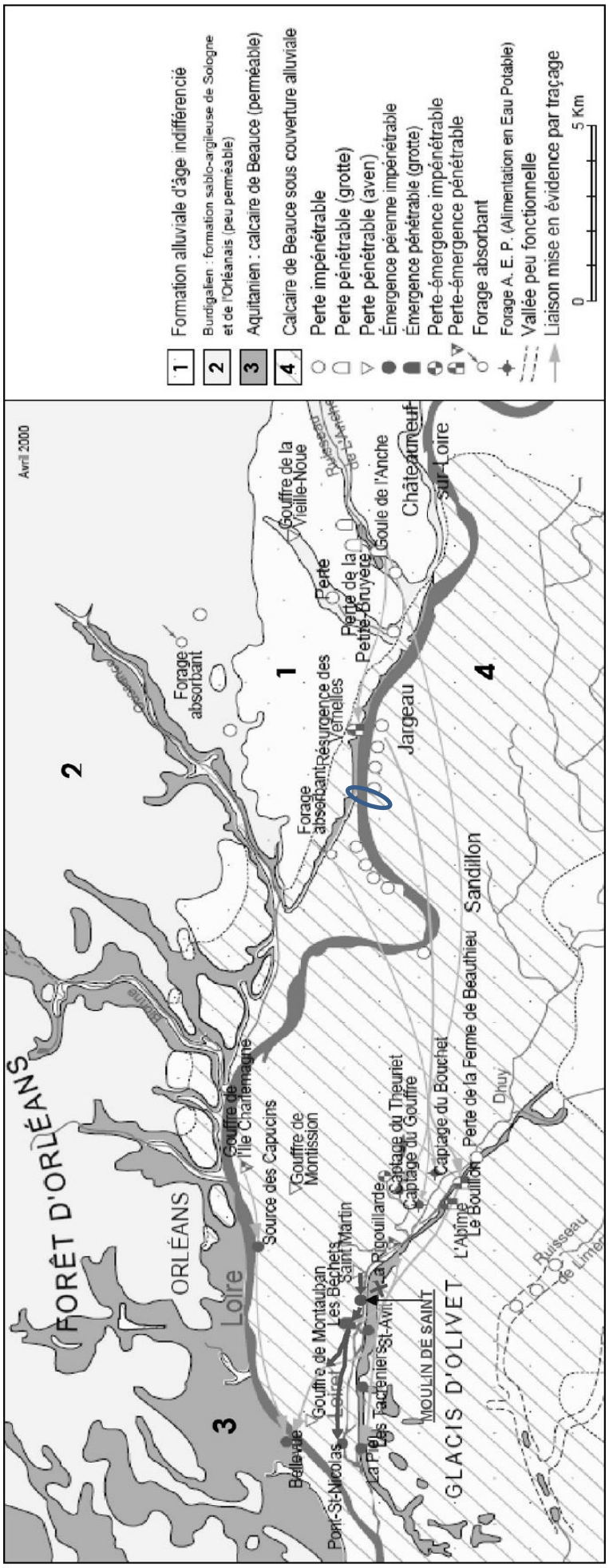


Illustration 6 : Carte des circulations karstiques du Val d'Orléans (Jozja et al., *2010).*

2.3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU KARST

2.3.1. Processus de karstification

La karstification se fait par dissolution des roches carbonatées ou sulfatées au contact de l'eau chargée en acide carbonique (H_2CO_3). L'eau, chargée en gaz carbonique, dissout ainsi le carbonate de calcium de la roche pour former un sel de bicarbonate de calcium qu'elle transporte et évacue vers les cours d'eau. Elle élargit progressivement les vides initiaux dans lesquels elle circule, en façonne les parois et les agrandit jusqu'à créer de véritables chenaux qui facilitent l'infiltration et accentuent le processus amorcé.

D'après Gilli (2011), la définition stricte du karst est un « modelé superficiel et souterrain issu de la dissolution par l'eau des roches carbonatées (calcaires et dolomies) ». La définition élargie fait intervenir « toute roche soluble (telle que gypse, sel) au sein de laquelle l'eau peut s'infiltrer, poursuivre son action de dissolution en profondeur et dégager des vides durables. Ceci impose d'une part que la roche possède une résistance mécanique suffisante pour éviter l'effondrement immédiat des vides, et d'autre part que les produits de la dissolution puissent être entraînés en dehors du système ».

Les dimensions des vides présentent une très grande variabilité, depuis les fissures micrométriques à millimétriques jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. Il en résulte des vitesses d'écoulement à l'intérieur de l'aquifère très variables, allant de moins de quelques centimètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure. Ces circulations souterraines très rapides sont l'une des principales caractéristiques hydrogéologiques des aquifères karstiques.

Dans le contexte du Val d'Orléans, il est vraisemblable que la karstification des calcaires de Beauce se soit essentiellement déroulée en contexte saturé et sous couverture alluviale. Dans ce contexte, on parle de crypto-karstification avec comme résultante une importante altération du toit calcaire (Illustration 7), avec un rôle de « compresse humide » jouée par la couverture saturée qui entretient et prolonge les processus de karstification dans le temps.

Illustration 7 : Photo du remplissage d'une cavité karstique par des alluvions anciennes à Olivet (Charles et Graviou, 2016).

2.3.2. Mécanismes à l'origine de mouvements de terrain

Le contexte de calcaire karstifié sous couverture alluviale caractéristique du Val d'Orléans est favorable à des mouvements de terrain de type effondrement (fontis, appelés « bîmes » localement). Deux types de processus (Illustrations 8 et 9) peuvent être ici à l'origine de l'apparition de fontis (Perrin *et al.,* 2016) :

- la rupture du toit calcaire d'un conduit naturel et l'effondrement des terrains meubles sus-jacents. Ce mécanisme peut générer des fontis de grande taille (diamètre en surface supérieur à 10 m) ;
- le soutirage/suffosion 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. Ce mécanisme est à l'origine de fontis de diamètre généralement plus modeste (1 à 5 m).

Le deuxième processus est beaucoup plus fréquent que le premier ; cependant celui-ci est potentiellement beaucoup plus impactant.

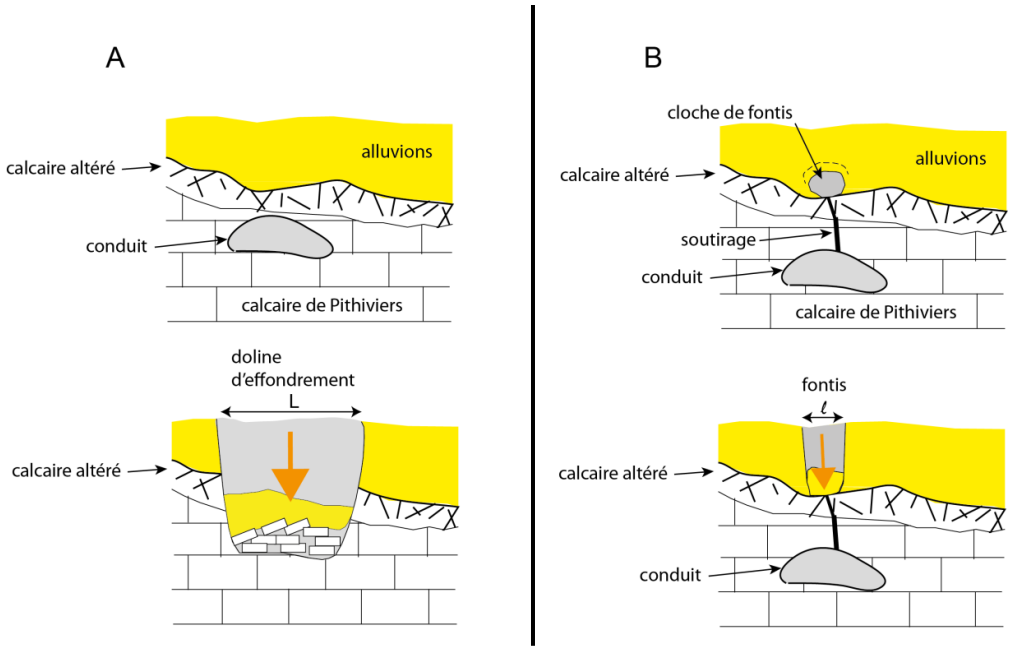


Illustration 8 : Schéma illustrant l'apparition d'un fontis.

(A) par effondrement soudain du toit calcaire d'un conduit karstique ou (B) par soutirage de matériaux de la couverture alluviale vers l'aquifère karstique.

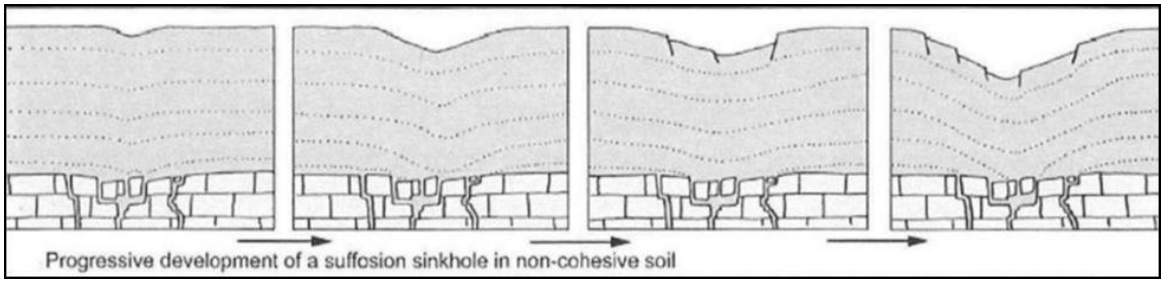


Illustration 9 : Schéma illustrant l'apparition d'un affaissement par soutirage dans un sol non cohésif (source : Waltham et al., *2005).*

2.4. LES RISQUES GÉOTECHNIQUES LIÉS AUX CAVITÉS DANS L'ORLÉANAIS

2.4.1. Généralités

Plusieurs types de cavités souterraines coexistent dans l'Orléanais : des cavités anthropiques (caves, souterrains, carrières, etc.) et des cavités naturelles (cavités karstiques). Dans le secteur du projet de pont à l'ouest de Jargeau, seules les cavités karstiques sont présentes. Elles y sont présentes en grand nombre, ceci étant lié à leur situation, une des zones principales d'entrée dans le réseau karstique marquant tout le Val d'Orléans.

La présence de ces cavités karstiques peut perturber les aménagements en surface, voire même remettre en cause leur pérennité ou leur usage. Ces perturbations peuvent se faire à deux moments :

- au moment de la construction de l'ouvrage, des mouvements de terrain et/ou des difficultés à conforter les zones karstiques instables peuvent se manifester (en particulier pour ce qui concerne des travaux d'injection dans des zones de circulations actives) ;
- plus tard, au cours de la vie de l'ouvrage, des mouvements de terrain peuvent se produire dans les zones non correctement confortées au cours de la construction ou dans des zones évoluant de manière imprévue.

Les conséquences potentielles de ces perturbations sont les suivantes :

- les mouvements de terrain, s'ils se produisent sous ou à proximité de l'ouvrage, ont bien sûr une conséquence sur sa stabilité. Ils peuvent :
  - remettre en cause de manière immédiate la sécurité des biens et des personnes se trouvant dans son emprise (effondrement sous une fondation par exemple),
  - mettre l'ouvrage hors d'usage (affaissement affectant une voirie par exemple) ;
- les difficultés de confortement des zones karstiques instables ont des conséquences non seulement sur le coût et l'avancement d'un chantier, mais elles peuvent aussi avoir des conséquences sur l'environnement et sur la ressource en eau. D'importantes pertes d'injection dans des cavités karstiques peuvent ainsi venir boucher des cavités et donc perturber l'écoulement naturel des eaux. De manière générale, ces conséquences sur l'environnement et sur la ressource en eau sont actuellement mal connues.

2.4.2. Exemples de mouvements de terrain affectant des infrastructures, dans le Val d'Orléans

De nombreux exemples de mouvements de terrain d'origine karstique affectant des infrastructures, anciens ou récents, peuvent être signalés (Illustration 10) :

- en juillet 1846, le journal du Loiret relate l'apparition d'un gouffre apparu sous le chemin de fer d'Orléans à Vierzon, à Saint-Jean-le-Blanc : « *la terre s'est affaissée sur quinze mètres de longueur, entraînant avec elle traverses et rails ; tout a disparu dans un gouffre instantané* […] *on peut évaluer à mille mètres cubes la quantité de terre engloutie dans ce gouffre qui se terminait en entonnoir* » ;
- d'après la DREAL (Maurin, 2012) et l'INERIS (Gombert, 2014), certaines ruptures de digues survenues lors des crues de la Loire en 1846, 1856, et 1866 (et ayant donc participé à l'inondation du Val) seraient imputables à des effondrements liés au karst ;
- en mai 2010, un effondrement à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin entraîne la ruine totale et quasi-immédiate d'un pavillon (diamètre : 16 m, profondeur jusqu'à la nappe : 8 m) ;

- en novembre 2012, une cavité est découverte sous la chaussée de l'A71 à hauteur de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin (diamètre : 8 m, profondeur : 5 m) ;
- en juin 2013, un fontis de 1,5 m de diamètre et 2 m de profondeur est apparu sous la station d'épuration de Sandillon ;
- lors de l'inondation du secteur de la rue des Plantes à Chécy en mai-juin 2016, une dizaine de mouvements de terrain ont affecté jardins et voiries et menacé des habitations, ce qui a conduit à des procédures d'expropriation ;
- en mars 2017, un effondrement se produit sur les voiries de la station d'épuration de La Chapelle-Saint-Mesmin (diamètre : 2,70 m, profondeur : 1,5 m). Cet événement aurait pu bloquer le fonctionnement de la station d'épuration.

Mai 2010, Saint-Pryvé-St-Mesmin

Novembre 2012, A71 - Saint-Pryvé-St-Mesmin

Mai-juin 2016, Chécy

Mars 2017, La Chapelle-Saint-Mesmin

Illustration 10 : Exemples de mouvements de terrain dans le Val d'Orléans.

Les conséquences financières de ces événements ne sont pas précisément connues. On peut les estimer comme variant, selon la taille des mouvements de terrain et les enjeux touchés, de quelques milliers d'euros (2017, station épuration La Chapelle-Saint-Mesmin) à plusieurs dizaines de milliers d'euros (2010, Saint-Pryvé-Saint-Mesmin ; 2014, Saint-Pryvé-Saint-Mesmin ; 2016 - Chécy), et même quelques centaines de milliers voire quelques millions d'euros (1997, Malataverne, exemple en dehors du Val d'Orléans - § 2.4.3 - Illustration 11).

2.4.3. Exemples de mouvements de terrain affectant des infrastructures, dans d'autres régions karstiques

Pour le contexte particulier du karst sous couverture alluviale, les exemples de mouvements de terrain sont innombrables, en particulier en Floride (États-Unis) ou en Chine.

En France, on peut citer l'effondrement ayant affecté, lors de sa construction, un ouvrage annexe à la LGV Méditerranée, en 1997 à Malataverne (26), commune située près de Montélimar (Camus, 2010, Illustration 11). Le contexte géologique de cet ouvrage est similaire à celui du Val d'Orléans (couverture alluviale épaisse de 5 à 15 m).

Cet événement a imposé de nombreuses études complémentaires, l'aménagement d'un ouvragé d'art non prévu permettant « d'enjamber » la zone à risque et une surveillance continue de la zone depuis lors.

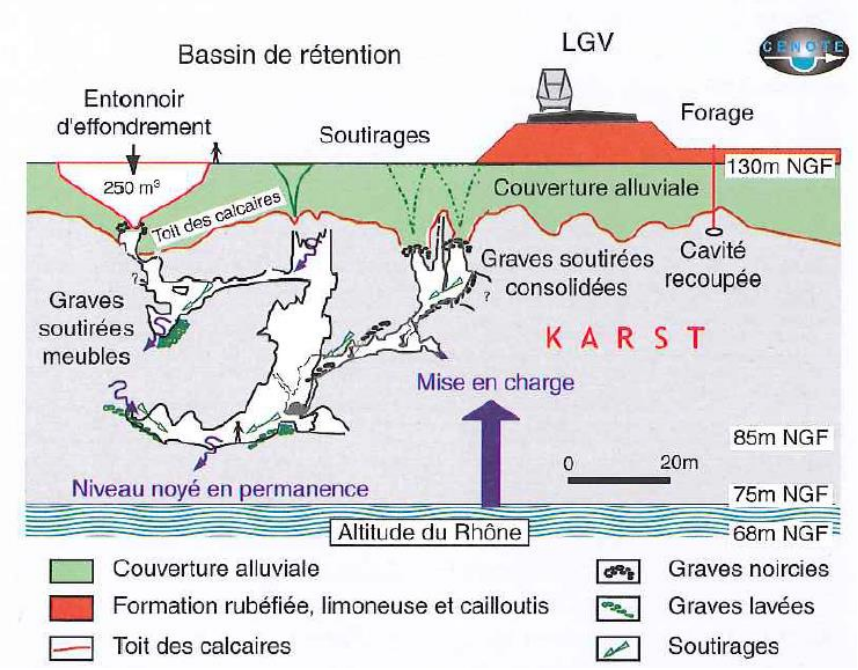


Illustration 11 : Coupe schématique du karst sous couverture à Malataverne (26).

2.4.4. Exemples de difficultés de confortement des zones karstiques instables, dans le Val d'Orléans

Aucun retour d'expérience précis n'est malheureusement disponible sur les conséquences des difficultés rencontrées lors du confortement des zones karstiques instables. Il faudrait pour cela réaliser un important travail d'enquête : interrogations des acteurs ou recherche documentaire (en particulier pour les ouvrages anciens pour lesquels la mémoire a disparu).

Les projets suivants réalisés dans le secteur d'Orléans, dans un contexte géologique similaire à celui du pont de Jargeau, ont à notre connaissance tous rencontré d'importantes surconsommations de coulis d'injection, ou alors une adaptation conséquente des solutions de fondation :

- l'élargissement du pont de l'A71 sur le Loiret ;
- le pont de l'Europe ;
- la station d'épuration de l'île d'Arrault ;
- la station d'épuration de la Source.

Ces situations, mal prévues, voire non prévues par les études, génèrent systématiquement des dépassements de budget et éventuellement des retards sur le calendrier du chantier, voire des actions de recours des entreprises au tribunal.

En résumé de la partie 2.4, le secteur du Val d'Orléans est marqué par un risque élevé de mouvements de terrain, en raison du sous-sol calcaire karstique. Comme cela a été illustré à de nombreuses reprises dans le secteur, les cavités karstiques peuvent non seulement perturber les aménagements en surface (complexifier leur construction, remettre en cause leur pérennité ou leur usage), mais aussi remettre en cause la sécurité des personnes, ce qui génère dans tous les cas des conséquences financières significatives.

3. Principales investigations sur la zone d'étude

De nombreuses investigations ont été réalisées dans le cadre des études préliminaires de la déviation de Jargeau, à la demande du Conseil départemental du Loiret.

3.1. LISTE DES ÉTUDES ET DES INVESTIGATIONS RÉALISÉES

Les documents, qui présentent les résultats des investigations sur la zone d'étude, consultés dans le cadre de la mission du BRGM, sont :

- étude géologique en amont et en aval de Jargeau (CETE[2], janv. 2004) : contexte géologique et hydrogéologique, risques géotechniques, et propositions d'investigations ;
- projet de franchissement de la Loire à Jargeau : reconnaissance géotechnique et géophysique des fuseaux (Illustration 12) ouest et Grand-ouest (CETE, nov. 2004), dont les principales investigations sont (Illustrations 13 et 14) :
  - sondages de reconnaissance réalisés en rive droite et en rive gauche de la Loire, notés SC (carottés), SD (destructifs), SP (pressiométriques), et PZ (piézomètres), et numérotés de 11 à 48, soit un total de 53 sondages, dont 27 sont situés dans le fuseau Grand ouest, qui a été retenu pour le tracé du franchissement de la Loire,
  - mesures géophysiques par des campagnes électriques et sismique réfraction, en sept. 2004 par la société EDG ;
- projet de franchissement de la Loire à Jargeau : fuseau Grand-ouest - reconnaissance géotechnique au droit du tracé (CETE, sept. 2006), les principales investigations sont (Illustrations 13 et 14) ;
  - sondages de reconnaissance réalisés en rive droite, dans le lit mineur de la Loire, et en rive gauche, notés SC (carottés), SD (destructifs), SP (pressiométriques), et SPd (pénétrométriques dynamiques), et numérotés de 201 à 211, soit un total de 24 sondages au droit de la zone d'étude,
  - mesures géophysiques par des campagnes électriques et sismique réfraction, en juill. 2005 et fév. 2006 par la société EDG ;
- Déviation RD921 - Franchissement de la digue - Darvoy (45) : rapport d'étude géotechnique, mission G5 (Hydrogeotechnique, 2014) :
  - sondages de reconnaissance réalisés au droit de la digue, notés SC1 et SC2 (carottés), SP1 et SP2 (destructifs), et PS1 et PS2 (pénétrométriques statiques), soit un total de 6 sondages (Illustration 15),
  - mesures géophysiques par des campagnes électriques en avril 2014 (2 profils), réalisées par la société IMG[3].

    NB : En complément, 4 sondages ont été réalisés en 2015 en pied de digue. Notés SD1/SC1 et SD2/SC2, les sondages destructifs (SD) et carottés (SC) semblent avoir été implantés respectivement au même emplacement (à proximité directe).

[2] CETE : Centre d'Études techniques de l'Équipement, désormais nommé CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

[3] IMG : Ingénierie et Mesures Géophysiques, société du groupe Hydrogéotechnique.

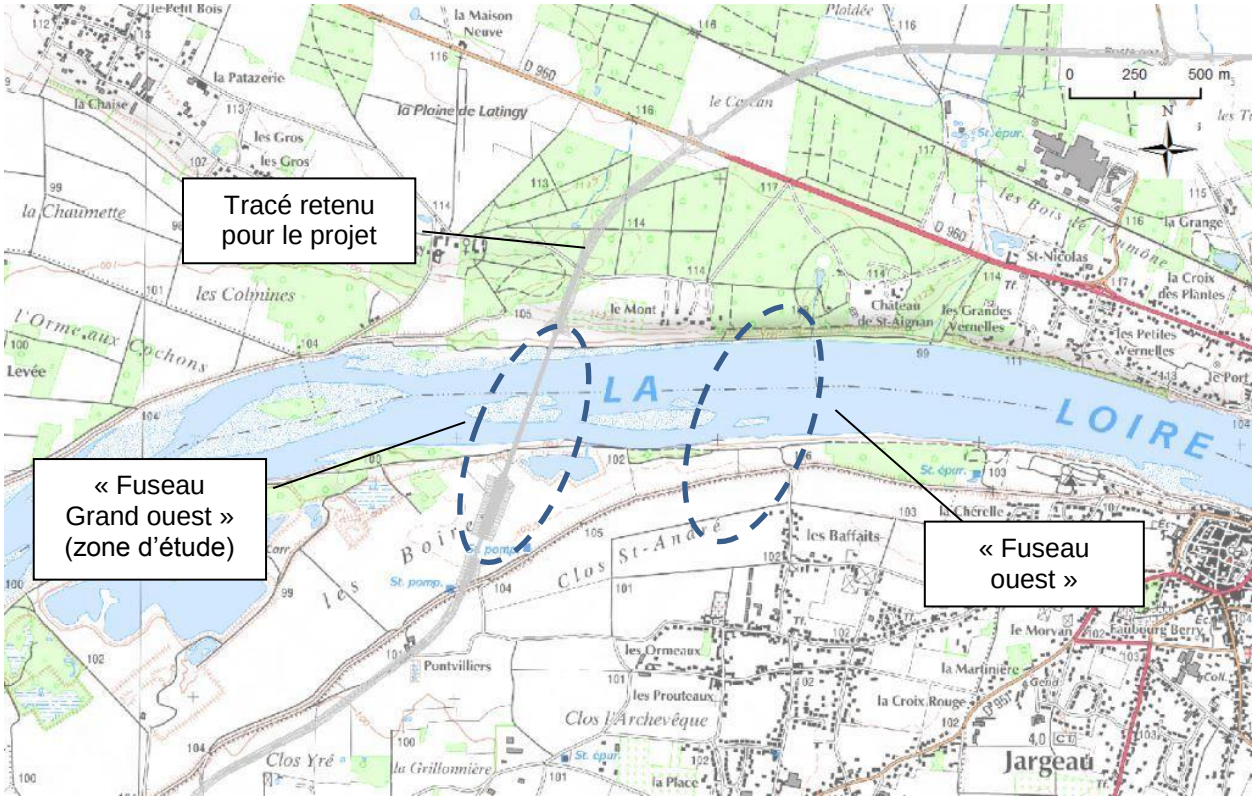


Illustration 12 : Localisation des fuseaux « ouest » et « grand ouest » étudiés dans le cadre des investigations menées en 2004, ainsi que le tracé final retenu.

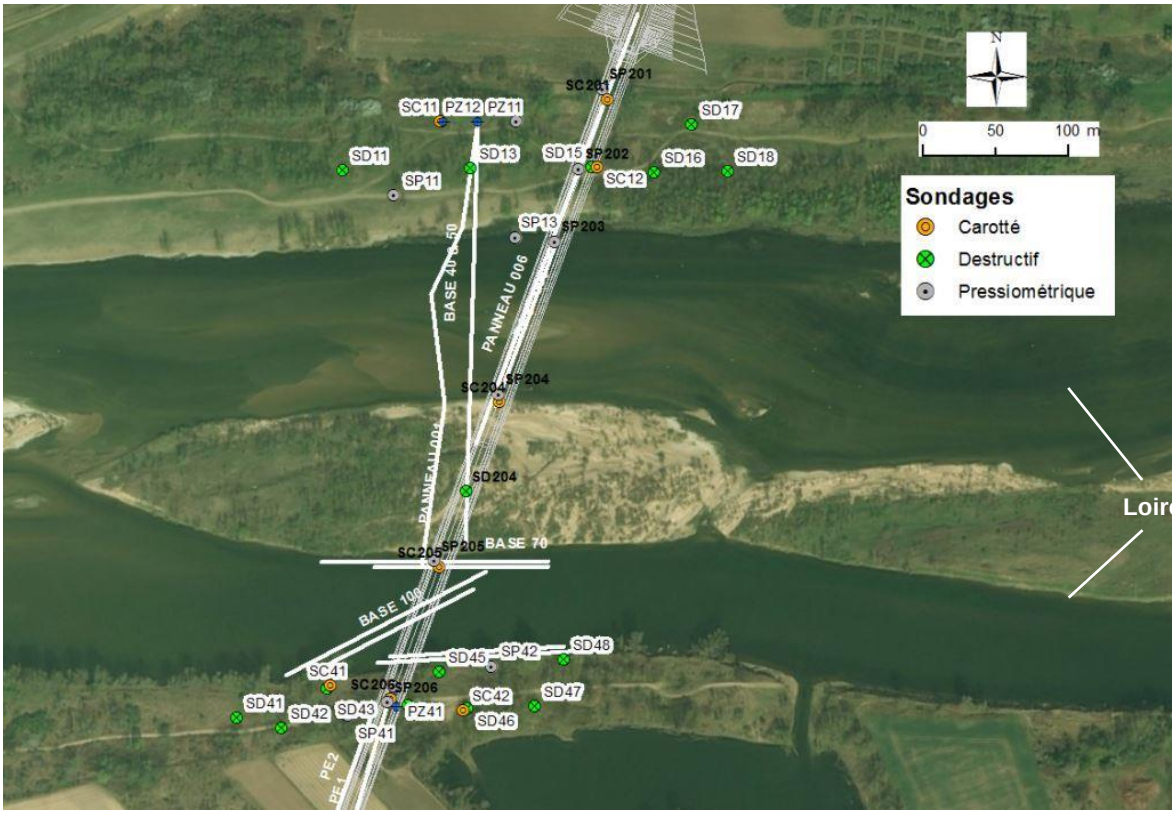
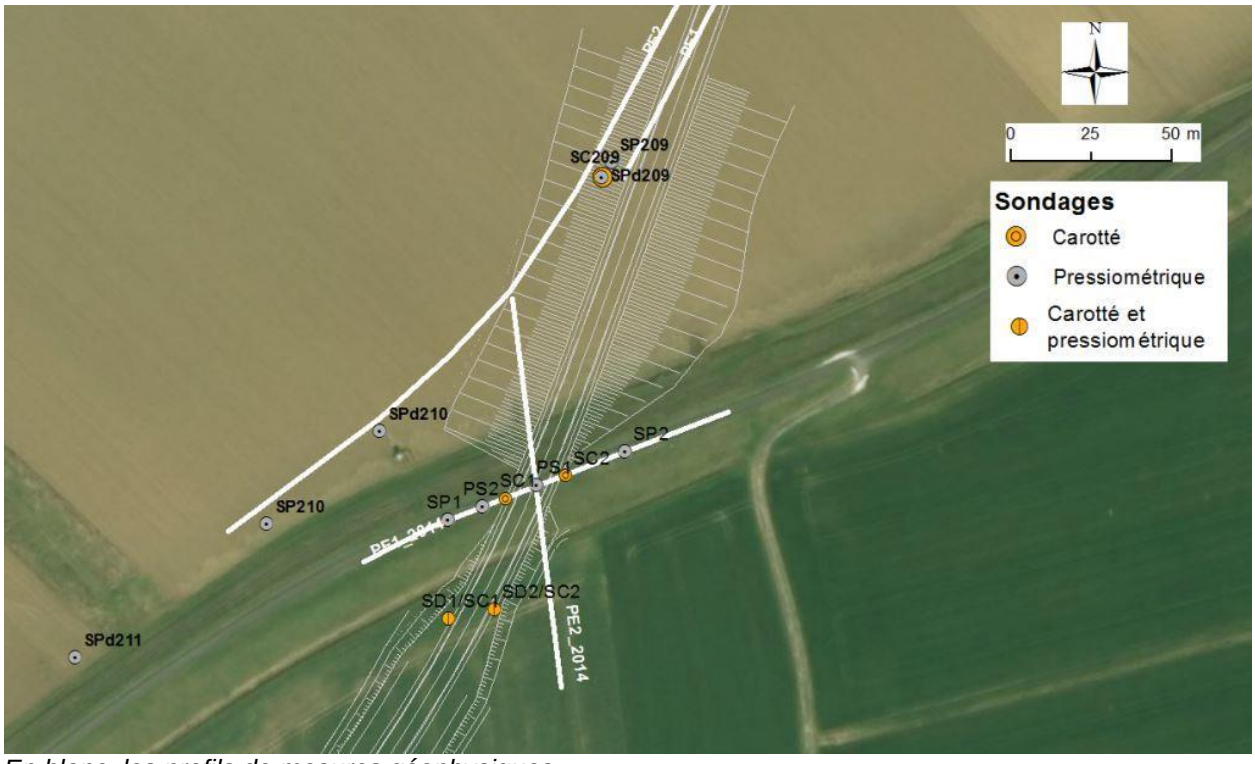


Illustration 13 : Localisation des investigations, en rive droite et au droit du lit mineur de la Loire.

En blanc, les profils de mesures géophysiques

Illustration 14 : Localisation des investigations, en rive gauche de la Loire.



En blanc, les profils de mesures géophysiques

Illustration 15 : Localisation des investigations en rive gauche de la Loire, zoom sur le secteur de la digue.

3.2. CONTEXTE DES ÉTUDES RÉALISÉES, AU REGARD DE LA NORME EN MATIÈRE D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES

En 2004 et 2006, le CETE a réalisé des études de reconnaissances géologiques, géotechniques et géophysiques pour le projet de franchissement de la Loire.

En 2006, Hydrogéotechnique a réalisé l'enchaînement des missions géotechniques G0 et G12, au titre de la norme NF P 94-500 dans la version qui a précédé les révisions de décembre 2006 et novembre 2013. Ces études géotechniques se sont intéressées à l'ensemble du tracé de la déviation, sans traiter le projet de franchissement de la Loire.

En 2014, Hydrogéotechnique a réalisé une étude géotechnique de type G5, au titre de la norme NF P 94-500 révisée en novembre 2013, s'intéressant spécifiquement au franchissement de la digue sud.

Il est à noter que ces études ne s'inscrivent pas formellement dans l'enchaînement des missions géotechniques au titre de la norme NF P 94-500, dont la dernière version est postérieure à leur réalisation (2013).

L'enchaînement des missions géotechniques défini dans la norme a été conçu pour maîtriser au mieux les incertitudes et les risques géotechniques. Il s'agit donc d'identifier les risques, les évaluer, les hiérarchiser puis les traiter. La norme distingue :

- les risques majeurs, qui peuvent remettre en cause le projet ;
- les risques importants, qui peuvent nécessiter des mesures appropriées en phase conception ainsi qu'un suivi spécifique en phase réalisation ;
- les risques mineurs, qui peuvent justifier une optimisation en phase de conception ou lors de l'exécution.

Selon la norme, l'étude géotechnique préalable G1 est constituée de deux phases :

- la phase Étude de Site (ES) permet de définir un modèle géologique préliminaire du site avec ses principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs. Elle énonce certaines recommandations, notamment concernant les risques d'instabilité de versants et les risques naturels ;
- la phase Principes Généraux de Construction (PGC) contribue à la mise au point de l'étude préliminaire de l'ouvrage pour la part des ouvrages géotechniques. Elle synthétise les données géotechniques à prendre en compte à ce stade et propose certains principes généraux de construction envisageables pour les ouvrages géotechniques. Elle permet de mieux sérier, en fonction de l'ouvrage qui sera projeté, les risques géotechniques et de réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs en cas de survenance. Elle ne comprend pas d'ébauche dimensionnelle.

L'étude préalable G1 est nécessaire pour initier un projet à construire sur ou dans le sol, mais elle n'est pas suffisante pour définir et dimensionner les ouvrages géotechniques du projet. Pour cela, la mission suivante d'Étude géotechnique de conception G2 doit être réalisée.

Dans le cadre de la présente étude, il s'agit de réaliser une synthèse des études géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques réalisées précédemment. Cette synthèse ne s'inscrit pas dans l'enchaînement des missions géotechniques telles qu'elles sont définies dans la norme NF P 94-500 de novembre 2013. Toutefois, **il s'agit d'une étude particulière qui contribue à répondre à certains points particuliers abordés lors des missions géotechniques G1 Étude de Site (ES) et G1 Principes Généraux de Construction (PGC).**

3.3. INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES

Les données utilisées pour cette synthèse sont rassemblées avec leurs caractéristiques essentielles dans les tableaux présentés en annexe 1.

Des confusions sont à noter dans la nomenclature des cylindres électriques (entre noms de faisceau et situation relative à l'ouest ou à l'est). La nomenclature retenue est celle des présentations les plus récentes, c'est-à-dire dans le rapport CETE de 2006 et il est recommandé d'identifier ces cylindres électriques par le n° de forage dans lequel ils ont été réalisés.

L'inventaire de ces données a été l'occasion de corriger des erreurs de présentations. Il convient ainsi de noter que :

- la position des profils PE1 et PE2 de EDG de mars 2006 était erronée dans le rapport EDG et sur les profils géotechniques du rapport du CETE. Elle a été corrigée ;
- l'implantation des sondages de 2006 apparaissait mal placée sur les profils géotechniques du rapport du CETE de septembre 2006. Ils ont été replacés à partir des localisations d'origine (cf. partie 3.6) ;
- l'échelle verticale sur les profils géotechniques du rapport CETE de 2006 est affectée d'une erreur atteignant environ 5,0 % sur certaines parties des informations présentées. Cet écart a été compensé sur les coupes présentées dans le présent rapport ;
- la localisation des profils géophysiques de 2004 sur les plans EDG montrent une incertitude de localisation de 5-10 m (cf. partie 3.6). En conséquence et en l'état des informations portées à notre connaissance, on considérera une incertitude de positionnement de 5-10 m sur les documents utilisés pour la synthèse géophysique.

L'ensemble des données géophysiques listées dans les tableaux en annexe 1, soit essentiellement des données sismiques et électriques, ont pu être analysées et valorisées dans le cadre de la présente synthèse géophysique.

Les données brutes géophysiques des rapports EDG (aujourd'hui Sixense-Soldata) et IMG (groupe Hydrogéotechnique) ont été récupérées à l'exception des données du rapport EDG de juillet-septembre 2005, c'est-à-dire les profils électriques n° 060 et 070 ainsi que les bases sismiques n° 90 et 100. Les données de tomographies électriques se présentent sous la forme de fichiers de données brutes au format de l'équipement utilisé (ABEM) ainsi que de fichiers au format d'entrée et sortie du logiciel d'inversion RES2DINV. Les données sismiques réfraction ont été récupérées sous la forme de fichiers de mesures (enregistrements temporels) et de pointés des premières arrivées.

En outre, les données BRGM du projet i-Fontis (Perrin *et al.,* 2016) et les résultats provisoires du projet INCA (en cours) sur le campus CNRS à Orléans-la-Source ont été utilisés afin d'étalonner et de comparer les résultats géophysiques du projet dans le contexte géophysique et géologique local. L'implantation des différentes investigations utilisées dans la région de Darvoy sont figurées sur l'Illustration 16.

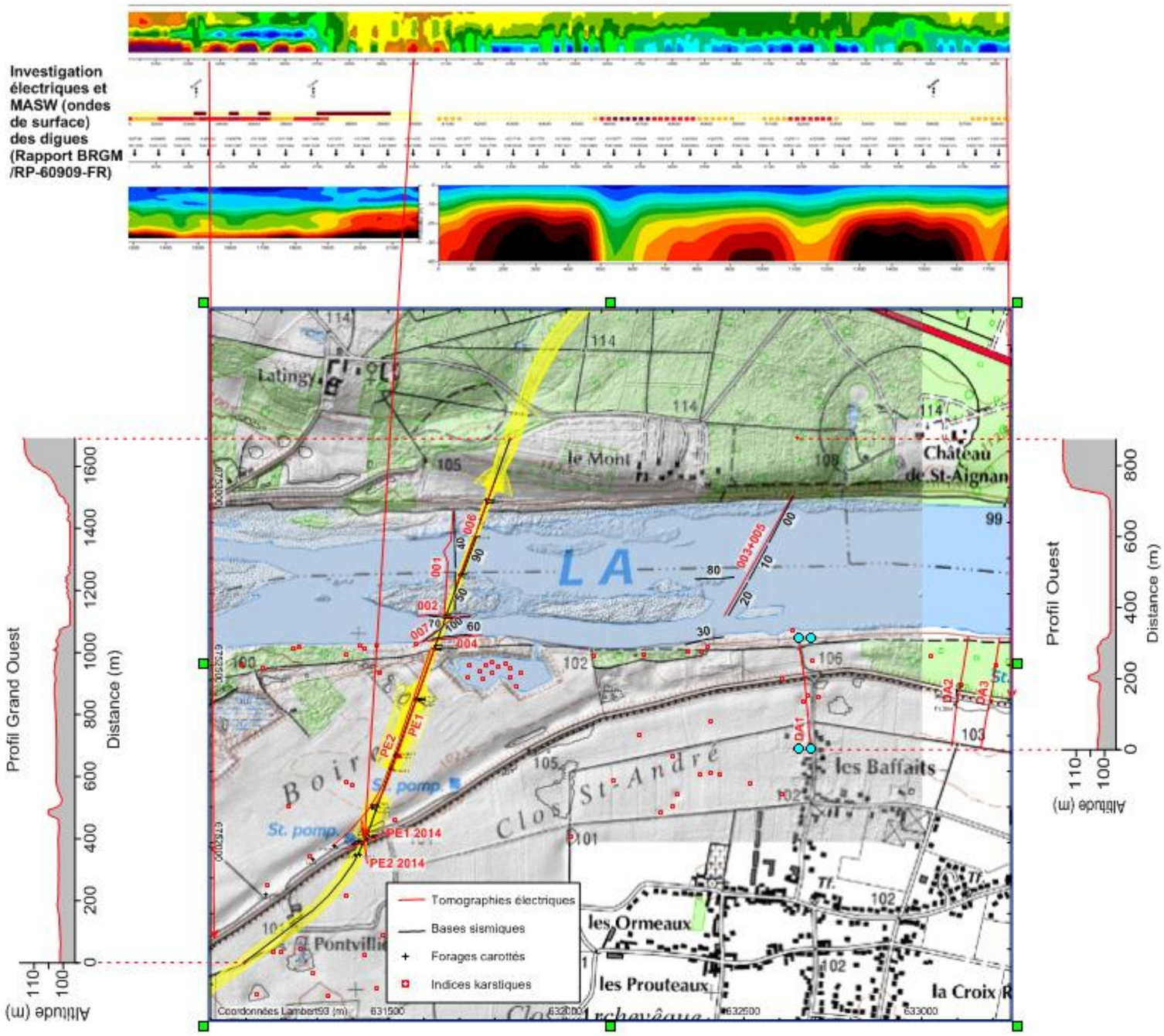


Illustration 16 : Localisation des investigations géophysiques du secteur ouest de Jargeau, sur fond de carte topographique IGN à 1/25 000 et du MNT à 1 m.

Les étiquettes rouges identifient les panneaux électriques EDG 001 à 007, PE1 et PE2, BRGM DA1 à DA3, les étiquettes noires les bases sismiques EDG 010 à 100. PE, DA correspondent aux noms des profils de tomographie électrique réalisés au droit de la digue en 2014 (PE) et pour le projet i-Fontis (DA). Les deux profils ouest et Grand ouest sur lesquels sont synthétisés les résultats géophysiques sont présentés par leur profil topographique (de part et d'autre de la carte) et leurs limites d'extension (croix rouges). Les résultats des investigations géophysiques le long de la digue de Loire (Samyn et al*, 2012) sont présentés au-dessus de la carte.*

3.4. INVESTIGATIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES : TYPE DE SONDAGES ET PROFONDEUR ATTEINTE

D'après les études consultées, une soixantaine de sondages ont été réalisés dans la zone d'étude, la majorité en 2004 et 2006. Les informations obtenues sont variables selon le type de sondage :

- sondage carotté : il permet une reconnaissance des faciès lithologiques, car l'outil de forage (carottier) permet de conserver une carotte du terrain traversé ;
- sondage destructif : il permet une reconnaissance succincte des faciès lithologiques, grâce à l'observation des cuttings, c'est-à-dire des déblais de forage évacués en surface. Ces sondages ont permis également un enregistrement de paramètres tels que la vitesse d'avancement du forage et la pression de rotation qui donnent une indication notamment sur la traversée de cavités ;

  NB : d'une manière générale, il est difficile de comparer les paramètres enregistrés d'une campagne de sondages à l'autre, dans la mesure où la foreuse, l'opérateur et les réglages sont variables. Dans le cas présent, pour les études 2004-2006, les forages ont été réalisés par le CETE Normandie-Centre, et les opérateurs semblent être les mêmes.
- sondage pressiométrique : il permet d'effectuer des mesures sur les caractéristiques géotechniques des terrains, notamment sur l'aptitude du sol à supporter une charge, la limite entre comportement élastique ou plastique, etc. ;
- sondage pénétrométrique : il permet d'effectuer des mesures sur les caractéristiques géotechniques des terrains, notamment de déterminer les résistances de pointe des horizons géologiques traversés.

La liste des sondages est présentée en annexe 2. Il est à noter que ces ouvrages ne disposent pas de code BSS (banque de données du Sous-Sol, gérée par le BRGM), c'est-à-dire de l'identifiant national qui doit être attribué pour tout forage supérieur à 10 m, dont la déclaration est nécessaire au titre du Code minier. La saisie des données de ces ouvrages en BSS est à prévoir.

Les sondages carottés, destructifs, et pressiométriques réalisés atteignent une profondeur généralement comprise entre 18 et 25 m par rapport au sol, soit des cotes altimétriques supérieures à 75 m NGF. Seuls 2 sondages pressiométriques, implantés en rive gauche de la Loire, atteignent une profondeur plus importante, soit 32,7 et 34,6 m. Les cotes altimétriques correspondantes sont de 70,1 et 66,6 m NGF.

Type	Carotté	Destructif	Pressiométrique	Pénétrométrique	Piézomètre
Nombre de sondages	14	18	17	9	3
Profondeur moyenne	19,7	19,65	19,1	13	18,5

Tableau 1 : Profondeur moyenne atteinte par les sondages, au droit de la zone d'étude, (2004, 2006, 2014).

3.5. INVESTIGATIONS HYDROGÉOLOGIQUES RÉALISÉES

Le rapport d'investigations de 2004 (CETE, 2004b), qui porte sur les faisceaux ouest et Grand ouest, décrit cinq piézomètres (Pz11 à Pz41) pour lesquels un niveau piézométrique a été mesuré suite à leur réalisation, soit entre le 16 et le 21 Septembre 2004. Aucune autre mesure n'a été possible suite à la dégradation des ouvrages. Le rapport CETE (2006) indique que le sondage SP201 avait été équipé en piézomètre, cependant, un acte de vandalisme n'a pas permis de faire de relevés.

Lors de la campagne de 2004, les niveaux d'eau ont été relevés dans la plupart des sondages au moment de leur réalisation (Illustration 17), soit sur une période de deux mois (septembre-octobre).

Les ouvrages qui ont fait l'objet d'un équipement (piézomètres) ont désormais disparu. Cela a été confirmé lors d'une visite sur site en avril 2017, pour le piézomètre n° 41 (PZ41), non retrouvé.

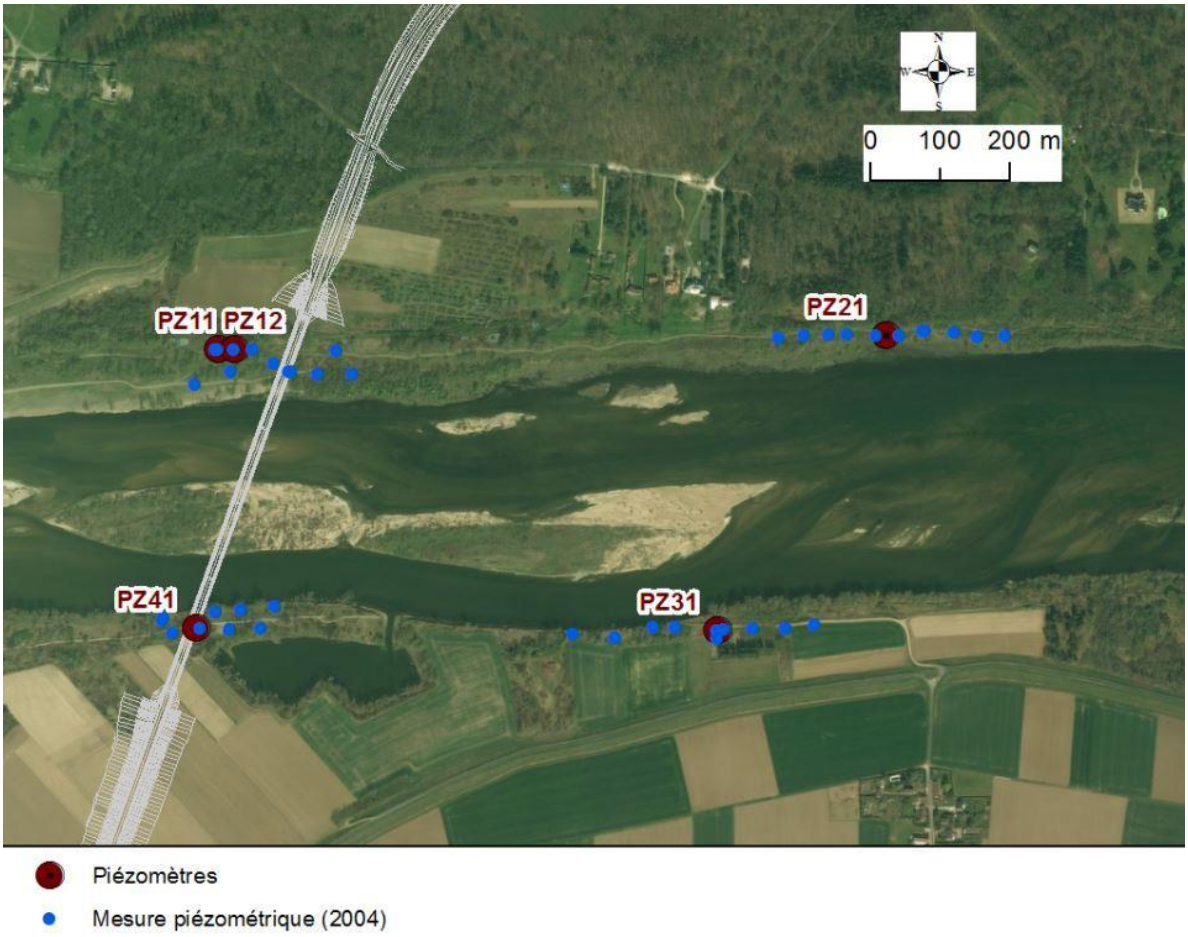


Illustration 17 : Localisation des piézomètres et des sondages ayant fait l'objet de mesure.

3.6. AVIS SUR LA LOCALISATION DES INVESTIGATIONS

Des incohérences ou des incertitudes sur l'implantation des sondages sont notées :

- pour les sondages réalisés en 2006, des différences de position ont été identifiées parmi les plans consultés. Après contrôle des informations, il est apparu que la position de plusieurs sondages présentait un décalage de l'ordre de 30 à 40 m, en particulier les sondages SP203, SP/SC205, SP/SPd 208, SP209 ;

  Les points correspondant à ces investigations ont été repositionnés à partir des coordonnées géographiques issues des compte-rendus de travaux de forage. Ces positions coïncident avec le plan d'ensemble fourni en annexe B du rapport d'étude (CETE, 2006).

  Il serait utile de confirmer ce repositionnement par l'entreprise qui a exécuté les travaux (CETE, désormais Cerema) ;

- la localisation des profils géophysiques de 2004 sur les plans EDG montrent une incertitude de localisation de 5-10 m prenant comme référence la localisation des forages de 2004 sur ces documents et sur le SIG[4] fourni par le Conseil départemental du Loiret. Il n'est pas possible de distinguer si les écarts observés sont dus à l'imprécision de localisation des forages ou des profils géophysiques. La relocalisation des profils géophysiques EDG de 2004 du fuseau ouest a été réalisée en calant le PZ21 des plans EDG sur le PZ21 du SIG et le PZ31 des plans EDG sur le PZ31 du SIG. La relocalisation des profils géophysiques EDG de 2004 du fuseau ouest a été réalisée en calant le SC12 des plans EDG sur le SC12 du SIG du CD45 et le SC42 des plans EDG sur le SC42 du SIG du CD45. Ce repositionnement fait apparaître des écarts entre les différentes sources d'informations de 5 à 10 m. En conséquence et en l'état des informations portées à notre connaissance, on considérera une incertitude de positionnement de 5-10 m sur les documents utilisés pour la synthèse géophysique.

En résumé de la partie 3, les études réalisées antérieurement ont donné lieu à un total de 61 sondages sur la zone d'étude, en 2004, 2006 et 2014. Avec un objectif de reconnaissance géologique, géotechnique ou hydrogéologique, il s'agit de sondages réalisés avec des méthodes différentes : carottage, destructif, pressiométrique, pénétrométrique. Conjointement à ces investigations ponctuelles, des investigations géophysiques ont été réalisées.

[4] SIG : Système d'Information Géographique

4. Synthèses géologique, géophysique et géotechnique

Pour mémoire, l'altitude du sol (terrain naturel) dans la zone d'étude est comprise entre 100 et 103 m NGF[5] en rive gauche (ou sud) de la Loire, et entre 98 et 100 m NGF en rive droite.

4.1. ANALYSE DU CONTEXTE GÉOLOGIQUE, CARACTÉRISTIQUES DE LA KARSTIFICATION

D'un point de vue géologique, le tracé de franchissement de la Loire se caractérise par le secteur sud Loire constitué par un calcaire de Beauce karstifié à très karstifié (Illustration 18) recouvert d'une dizaine de mètres d'alluvions modernes (Fy) à récentes (Fz) alors que le secteur nord Loire correspond à un calcaire de Beauce moins karstifié, affleurant sur le coteau nord puis progressivement recouvert d'alluvions récentes à proximité du lit mineur direction sud.

Cela rejoint le rapport d'étude du CETE (2004b) qui conclut « *que le réseau karstique est principalement développé sur la rive gauche de la Loire et touche indifféremment les fuseaux ouest et Grand ouest* ».

Au regard du contexte géologique et des données de sondages, nous pouvons compléter cette analyse en distinguant **deux niveaux de karstification** : une altération au toit du calcaire (crypto-karstification) et la formation de vides au sein du calcaire (conduits/drains karstiques).

Cryptokarst : partie supérieure altérée des calcaires de Beauce

Concernant le cryptokarst, c'est-à-dire la frange altérée au toit des calcaires, il est décrit selon les auteurs comme : de « l'argile marron », une « marne », des « niveaux marneux », un « calcaire marneux » ou un « calcaire mou ».

On note une forte variabilité de l'épaisseur de cette frange altérée, (cf. annexe 3) : celle-ci est généralement inférieure à 2,5 m en rive nord et peut dépasser 4 m en rive sud. Il est à noter que cette épaisseur peut être beaucoup plus importante localement puisqu'au droit de la digue (Hydrogéotechnique, 2014), la base du cryptokarst n'est atteinte que pour le sondage SC1 à 19,25 m de profondeur, soit une épaisseur du cryptokarst de l'ordre de 10 m.

Si on se réfère aux cotes altimétriques, la base du cryptokarst est comprise entre 87 et 99 m NGF. Ces fortes variations de la topographie du toit, d'amplitude comprise entre 3 et 5 m correspondent à une configuration caractéristique d'un cryptokarst (Illustration 7). On note également un approfondissement progressif du toit en direction du sud/sud-ouest, passant d'une épaisseur de recouvrement alluvial quasi-nulle en rive nord, à plus de 10 m dans le secteur rive sud.

La distinction entre la partie altérée correspondant au cryptokarst et les calcaires « peu altérés » sous-jacents est parfois difficile, notamment lorsque des cavités remplies de matériaux argilo-sableux sont rencontrées en sondage, à proximité de l'interface entre ces deux niveaux géologiques.

[5] NGF : Nivellement Général de la France

Cavités et conduits karstiques

Les cavités traversées par les sondages sont rencontrées parfois directement à partir de la base des alluvions (à une profondeur de 10 à 20 m environ en rive gauche de la Loire, et de 5 à 10 m au droit du lit mineur, soit à des cotes altimétriques généralement comprises entre 82 et 92 m NGF). Cela correspond aux conduits karstiques développés dans les calcaires de Pithiviers, soit la partie supérieure des calcaires de Beauce.

Cela est conforme avec une partie des données de sondages accessibles en BSS[6] :

- en effet, la profondeur maximale de karstification reconnue en exploration spéléologique est comparable avec celle repérée en sondages, à savoir entre 20 et 30 m (Gombert et al, 2015) ;
- la consultation des données de sondages en BSS a toutefois montré l'existence de cavités plus en profondeur, au sein des calcaires d'Étampes. En effet, on peut noter dans les documents scannés (compte-rendus de forage) les mentions « circulations souterraines » et « caverne » au droit des forages situés à Sandillon (n° BSS001CCGY) et à Darvoy (BSS001CDES), respectivement vers 78 m et 65 m de profondeur ;
- de plus, dans la partie du Val située vers les sources du Loiret, à environ 10 à 15 km à l'ouest, les reconnaissances spéléologiques indiquent l'existence de conduits karstiques jusque 70 m de profondeur (vidéo accessible sur le site web du SIGES Centre-VdL). La situation vers les sources du Loiret n'est sans doute pas comparable à celle de la zone d'étude située beaucoup plus en amont, à proximité des zones de pertes de la Loire, toutefois, on peut noter les incertitudes relatives à une possible karstification au-delà de 20-30 m de profondeur.

Remarques complémentaires :

- *la présence de marnes et sables de l'Orléanais (âge burdigalien) est parfois notable dans la région d'Orléans, intercalées entre les alluvions et les calcaires de Pithiviers. Cette formation est constituée d' « argiles vertes, compactes, parfois graveleuses au pied, et généralement accompagnées de marnes blanches ». Toutefois, elles n'ont pas été identifiées au droit de la zone d'étude par les études réalisées en 2004-2006 et en 2014, ce qui est cohérent avec une étude du BRGM (Martin, Noyer, 2003) qui indique que cette formation n'est pas présente dans ce secteur du Val. D'après le BRGM, le niveau mou/pulvérulent situé à la base des alluvions est issu de l'altération des calcaires de Pithiviers sous-jacents ;*
- *un niveau de marne verte est parfois identifié en bibliographie à l'interface des calcaires de Pithiviers et des calcaires d'Étampes, et nommé « molasse du Gâtinais ». Ce niveau peu épais (quelques mètres) n'a pas été identifié par les sondages réalisés au droit de la zone d'étude, peut-être parce qu'il n'a pas été atteint. D'après la bibliographie et des données de sondage, notamment à Darvoy (n° BSS001CDES), la molasse du Gâtinais est supposée présente, à une cote altimétrique d'environ 75 m NGF.*

[6] BSS : Banque de données du Sous-Sol du BRGM

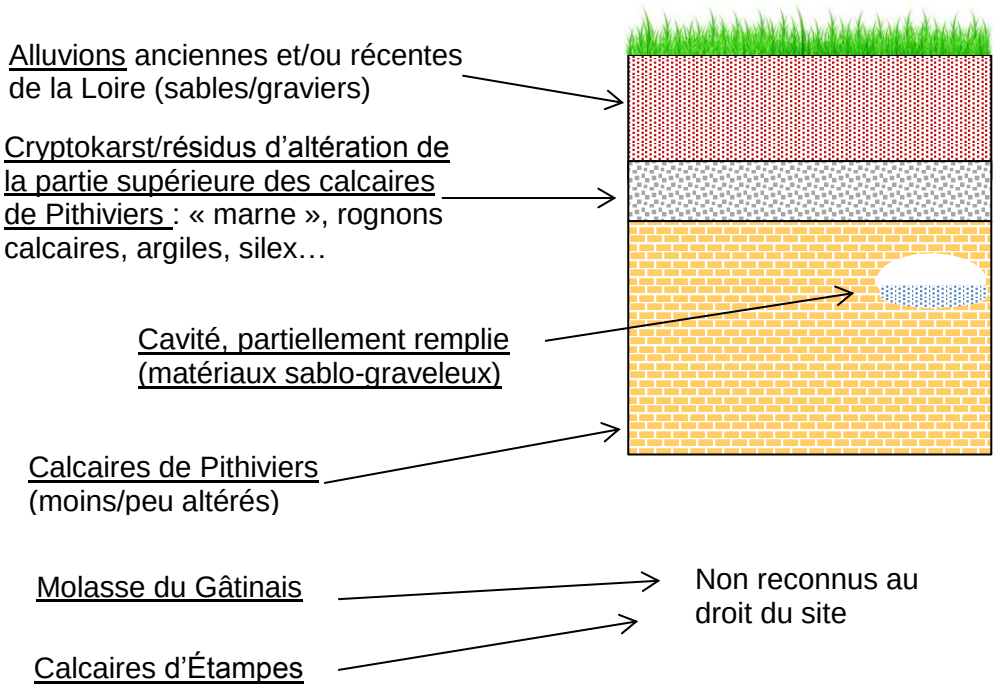


Illustration 18 : Coupe schématique simplifiée des calcaires de Beauce sous couverture alluviale, au droit de la zone d'étude en rive sud, résultant de l'analyse du contexte géologique.

4.2. SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOPHYSIQUES

4.2.1. Analyse des investigations géophysiques de 2004 et 2006 (EDG)

Données de tomographies électrique

Les pseudo-sections de résistivité apparente des tomographies électriques EDG présentent une bonne cohérence globale (cf. annexe 4) et ne présentent pas d'artefacts de mesure caractérisés. Les résultats d'inversion présentent de bons coefficients d'ajustement[7] et des résistivités globalement cohérentes avec les gammes de résistivité connues par ailleurs localement pour les formations investiguées. Elles sont donc considérées globalement comme de bonne qualité et se prêtent à une analyse fiable.

Données de sismique réfraction

Les enregistrements temporels de sismique réfraction se présentent sous un format non standard qui n'a pas pu être relu, en l'état des informations recueillies. Les données de pointé se présentent sous la forme de fichier au format texte et montre 4 à 5 tirs par base avec des tirs offset qui correspondent aux standards d'acquisition recommandés par le Code de Bonne Pratique en Géophysique Appliquée édité par L'AGAP[8]. Les résultats des bases sismiques montrent des cohérences globales avec les tomographies électriques, avec la géologie locale, et les vitesses sismiques obtenues sont en cohérence avec les données connues par ailleurs pour les formations investiguées. Les résultats sismiques sont donc considérés comme fiables.

[7] Paramètre mesurant la qualité du résultat d'inversion en comparant la réponse du modèle inversé avec les mesures, généralement sous la forme d'une erreur moyenne quadratique (RMS).
[8] AGAP : Association française pour la qualité en géophysique appliquée.

Données géophysiques en forage EDG

Les données électriques (cylindres électriques) et sismiques (profils sismiques) en forages sont en accord et confirment les investigations géophysiques en surface.

Appréciation générale

Les données géophysiques EDG sont de qualité satisfaisante et sont adaptées pour appréhender les conditions géologiques et géotechniques du site du projet de pont de Jargeau sauf les réserves exprimées ci-dessous sur les profondeurs d'investigation.

Elles présentent néanmoins des caractéristiques en-deçà des recommandations actuelles du BRGM pour étudier les environnements karstiques complexes du Val de Loire. Nous recommandons actuellement de coupler les configurations dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger avec une haute densité de points de mesures afin de produire une résolution optimale. En outre, une profondeur d'investigation de l'ordre de 60 m est recommandée afin d'atteindre et investiguer le toit du calcaire peu ou pas altéré.

À titre de comparaison, les tomographies électriques réalisées sur le site i-fontis en 2015 (Perrin *et al,* 2016) ont, pour une même longueur, 5 à 10 fois plus de points que les tomographies EDG réalisées en 2004-2006. Les bases sismiques réfraction réalisées en 2017 sur le site CNRS d'Orléans, comprennent un tir toutes les deux traces (soit 1 tir tous les 10 m pour un inter-trace de 5 m) alors que les bases EDG ont 4 à 5 tirs par base de 120-160 m.

Les profondeurs d'investigations des bases sismiques sont inférieures à 15-20 m (profondeur du réfracteur) et celles des tomographies électriques inférieures à 15-30 m. Ces profondeurs paraissent *a priori* insuffisantes pour étudier correctement la partie altérée des calcaires.

4.2.2. Analyse des investigations géophysiques de 2014 (IMG)

Les données IMG (Hydrogéotechnique) sont en configuration pôle-pôle (PP), laquelle n'est pas bien adaptée à une investigation détaillée car elle souffre d'une mauvaise résolution comparativement aux configurations dipôle-dipôle (DD) et Wenner-Schlumberger (WS). Par ailleurs, la position des pôles éloignés n'est pas indiquée dans le rapport[9].

Les résultats obtenus avec ces tomographies sont en contradiction avec les résultats des tomographies EDG (configuration WS) qui sont calées de proche en proche avec les interprétations du projet i-Fontis (configuration WS+DD) et avec les logs de forage (Illustration 19) : les terrains qui se manifestent habituellement par des résistivités élevées (les alluvions anciennes) apparaissent comme faibles sur les profils IMG et inversement pour les terrains se manifestant par des résistivités faibles (calcaires altérés).

[9] Dans la configuration pôle-pôle, il y a 1 pôle d'injection de courant et 1 pôle de mesure sur le profil étudié. Les deux autres pôles (respectivement de retour du courant et de mesure) sont implantés à distance du profil et l'un de l'autre de manière à ce que leur influence sur la mesure soit négligeable.

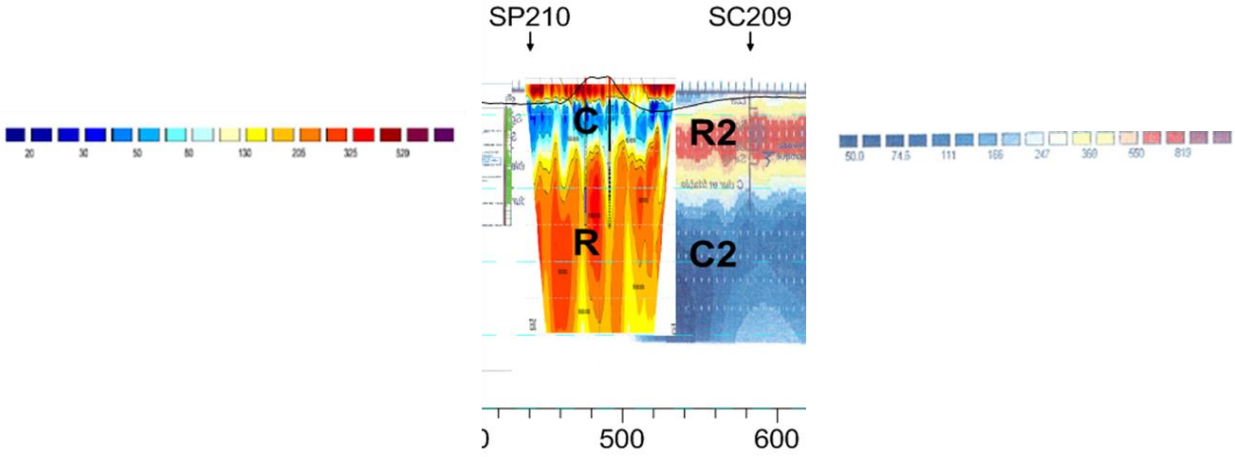


Illustration 19 : Comparaison des résultats (extraits) de tomographie électrique d'IMG (à gauche) et d'EDG (à droite) au niveau de la digue.

L'axe vertical représente les profondeurs (croissantes vers le bas) ; les lettres C et R indiquent des compartiments respectivement conducteur et résistant. L'échelle de résistivité de chaque tomographie est présentée latéralement.

Cette situation surprenante, alors que les données apparaissent de bonne qualité (cf. annexe 4) et présentent des coefficients d'ajustement très satisfaisants, peut s'expliquer par une configuration de mesure incomplètement définie.

La configuration PP suppose que les pôles éloignés n'ont pas d'influence sur les mesures, le long du profil. Dans le cas où les pôles « éloignés » sont trop proches du profil de mesure la profondeur d'investigation est nettement altérée et si la position exacte des pôles « éloignés » n'est pas prise en compte dans l'inversion, cela peut conduire à des résultats aberrants.

En l'état des connaissances, il n'est pas recommandé d'aller plus loin dans l'analyse de ces données qui sont écartées du jeu de données géophysiques du projet.

Les données de tomographie électrique EDG ont été lues sous la forme de fichiers au format d'entrée de RES2DINV (format *«.dat »*) et ont été analysées sous la forme de pseudo-sections de résistivité apparente, telles que présentées en annexe 4. Il n'a pas été jugé utile d'appliquer un filtrage sur ces données qui présentent une bonne cohérence globale.

Toutes les tomographies ont été ré-inversées avec les mêmes paramètres, testées et validées sur les sites i-Fontis (Perrin *et al.,* 2016) et INCA (en cours). Ces paramètres comprennent l'option « Robust » (ou « blocky ») du logiciel d'inversion RES2DINV qui permet de mieux résoudre les forts contrastes de résistivité en s'accommodant de niveaux de bruit élevé, et produit la meilleure définition géométrique des interfaces.

Toutes les tomographies ré-inversées dans le cadre du projet utilisent la même échelle de résistivité et de couleur afin de faciliter la comparaison des résultats. Sur une large gamme de 50 à 450 Ohm.m, elles couvrent la majeure partie de la gamme des résistivités calculées sur la zone d'étude. Cette gamme est en outre similaire à celle utilisée par EDG pour présenter les résultats de 2005. Il nous a ainsi été possible de présenter les résultats de l'ensemble des tomographies (celles ré-inversées et les tomographies de 2005, dont les données brutes ne sont pas disponibles) sur le même profil. Mais il faut prendre garde au fait que, bien que les gammes soient similaires, les couleurs sont différentes dans la partie centrale de la gamme, entre 94 et 295 Ohm.m (la gradation de vert au jaune est différente).

4.2.3. Analyse des données géophysiques, intégrant les résultats d'autres études BRGM

Les principales informations géophysiques sont reportées sur le profil de la zone d'étude, soit le fuseau « Grand Ouest », (Illustration 20) en comparaison des informations de la coupe géotechnique du CETE (2006).

Tomographies électriques

Les résultats d'inversion des tomographies électriques montrent généralement la succession suivante de bas en haut :

- le conducteur C1, peu représenté sur cette coupe « Grand Ouest ». En rive droite de la Loire, il apparaît en base de section avec des résistivités inférieures à 150 Ohm.m ;
- le résistant R1, qui se développe surtout au nord, à proximité du lit mineur de la Loire avec des résistivités comprises entre 150 et 300 Ohm.m ;
- le conducteur C2, qui est présent de part et d'autre du lit mineur, entre les abscisses 0 et 900 m en rive sud, et entre 1300 et 1500 m en rive nord. Il est caractérisé par des résistivités comprises entre 50 et 150 Ohm.m. Rive nord, il apparaît moins épais (7-10 m) et plus conducteur (50-100 Ohm.m) alors qu'au sud, soit sa base est mal définie (du fait d'une définition et profondeur d'investigation insuffisante), soit il est plus épais (10-20 m) et plus résistant (70-150 Ohm.m) ;
- le résistant R3 (220-600 Ohm.m), présent sur toute la rive sud avec une épaisseur de 8 à 10 m ;
- le conducteur C3, qui représente l'eau de la Loire, et dont la résistivité est fixée à 22 Ohm.m sous l'altitude 96.2 m NGF, pour la modélisation de la tomographie 001.

Bases sismiques réfraction

Les profils sismique réfraction présentent globalement dans la zone du lit mineur des vitesses sismiques intermédiaires (1 800-2 400 m/s) jusqu'en surface, rive gauche, et au centre (nord immédiat de l'île) ou proche de la surface sous 2 à 4 m de couverture. Ces vitesses intermédiaires (par rapport aux calcaires sains ou peu altérés attendus vers 3 500-4 500 m/s et la couverture à moins de 1 500 m/s) indiquent des calcaires altérés et/ou karstifiés. Leur correspondance avec le résistant R1 indique une altération/karstification peu argileuse.

En revanche, plus au nord dans la dernière partie du lit mineur (abscisse >1 350 m) où des vitesses à 800-1 400 m/s correspondent au conducteur C2, on retrouverait une altération/karstification argileuse associée à des faciès plus marneux.

Interprétation

Sur la base de ces résultats électriques et sismiques, on peut différencier 4 secteurs d'ouest en est, où les caractéristiques de la zone altérée apparaissent différentes :

- la zone sud, entre les abscisses 0 et 900 m, où la couche conductrice, C1 est épaisse ou mal définie en base et se développe sous une couverture résistante R2 attribuée aux alluvions sablo-graveleuses, en accord avec la base de cette couche définie par le CETE entre 0 et 2 m en dessous. La couche C1 est interprétée comme les calcaires de Pithiviers altérés et marneux (crypto-karst), non lessivés avec une matrice argileuse et un remplissage sablo-graveleux ;

- une zone de transition entre les zones précédentes et suivantes (abscisses 900-990 m) où la couche R2 présente plusieurs discontinuités et approfondissements localisés qui peuvent être interprétés comme des indices de fontis. Cette zone peut être interprétée comme une zone d'altération/karstification particulière associée à un passage latéral de faciès ou à une structure tectonique. Elle contient la discontinuité mécanique définie par le CETE sur son profil géotechnique ;
- la zone centrale (abscisses 990-1 350 m) où le résistant R1 et les vitesses sismiques relativement élevées (1 800-2 400 m/s) correspondent aux niveaux affleurants ou peu profonds. Cette zone est interprétée comme une zone altérée/karstifiée en surface mais lessivée (les particules fines, argileuses ont été enlevées). Peuvent y être associés un changement latéral de faciès (plus calcaire, moins marneux) mais également un compartiment tectonique surélevé. Les forages montrent que le remplissage est sablo-graveleux ;
- au-delà de l'abscisse 1 350 m, on trouve une succession C1-R1-C2-R2, la plus complète avec, sous la couverture sablo-graveleuse alluvionnaire (R2), une couche d'altération marno-argileuse en tête (C2) qui repose sur un faciès calcaire plus résistant (R1).

Sauf exception, les investigations géophysiques de 2004 et 2006 ne mettent pas directement en évidence les cavités ou zones décomprimées, soit parce que ces dernières ne présentent pas toujours des contrastes de paramètres physiques suffisants par rapport à leur environnement, soit parce que la profondeur d'investigation est insuffisante (la sismique réfraction n'a pas atteint le calcaire « sain » ou peu altéré).

Les exceptions correspondent aux perturbations de la couche sablo-graveleuse de la couverture qui peuvent être[10] des indices directs de fontis.

On définit néanmoins différents faciès d'altération/karstification qui impactent potentiellement le projet. Les résultats de forages semblent montrer que la zone centrale où le calcaire altéré résistant remonte en surface, montre une plus grande densité d'indices karstiques, à plus grande profondeur (hachuré rouge, Illustration 20). Mais peut-être est-ce un effet d'échantillonnage, car les forages sont plus profonds et plus densément implantés dans cette zone.

Les investigations géophysiques réalisées montrent que l'ensemble du tracé étudié présente des indices de karstification importants avec potentiellement des indices renforcés 100 m au sud de la rive sud et dans le lit mineur de la Loire où la pression hydraulique a conduit au lessivage des particules fines.

La distinction de différentes zones plus ou moins affectées dans le lit mineur tel que proposé par EDG en 2004, sur la base d'informations moins complètes qu'aujourd'hui (par exemple les forages carottés SC1 à SC209 n'existaient pas), ne nous semble pas rester pertinente.

NB : Les résultats des investigations géophysiques qui investiguent la digue et son substrat (Samyn et al, 2012), en produisant un indice de susceptibilité d'aléas mouvement de terrain, confirment que la zone est soumise à une karstification importante.

[10] Tous les fontis ou karst souterrains ne se manifestent pas par des perturbations de la couche R2 et toutes les perturbations de la couche ne sont pas dues à un fontis ou à un karst.

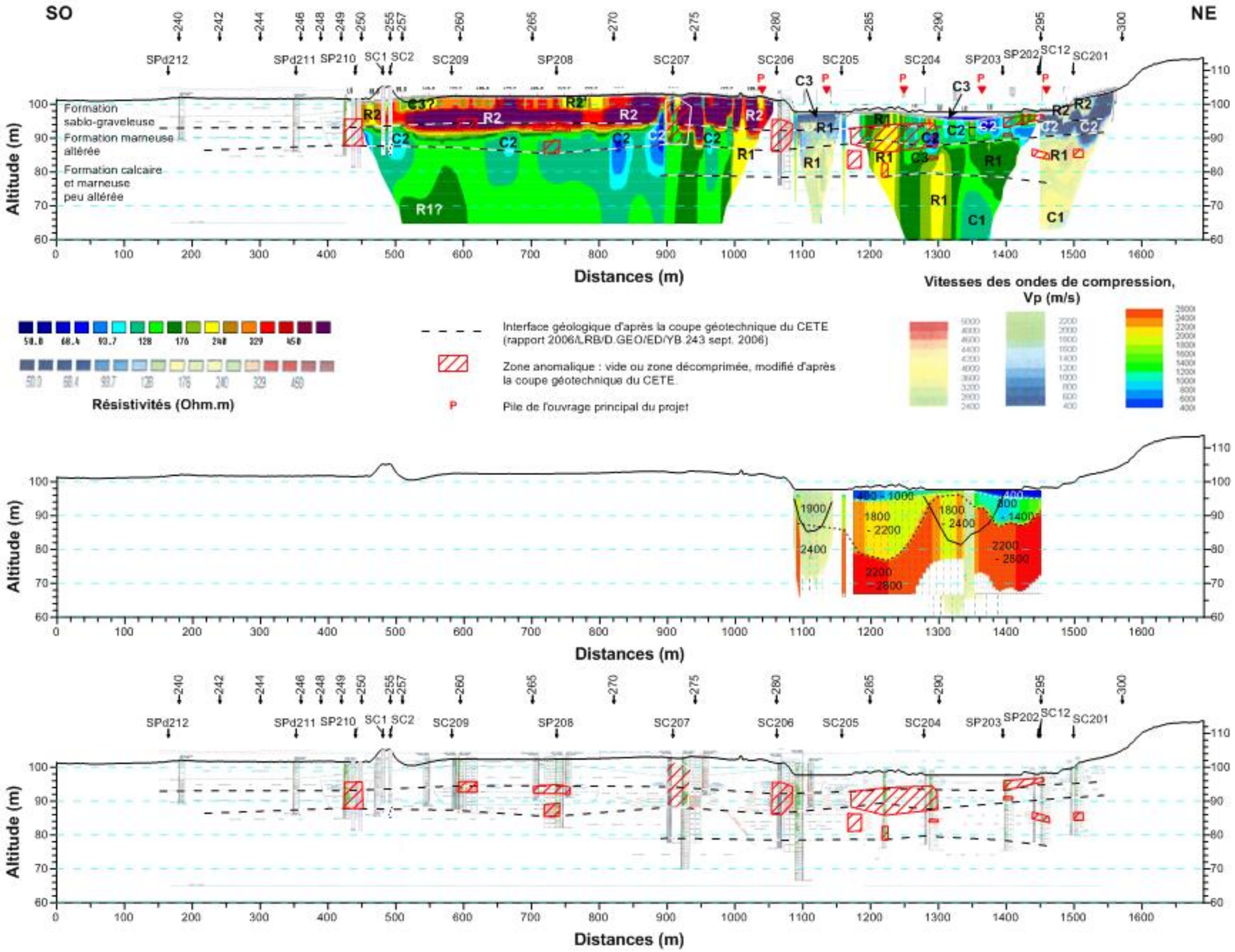


Illustration 20 : Synthèse des observations géophysiques de 2004 et 2006 le long du tracé du projet (ex - « faisceau Grand ouest »).

Les tomographies EDG 006 et 007, dans le cours mineur de la Loire ont une échelle de couleur différente (teintes plus pâles) des autres tomographies qui ont la même échelle (teintes plus accentuées). Les zones d'anomalies karstiques sont représentées hachurées en rouge (profil du bas). Les positions des piles sont indiquées par un « P ».

Ré-interprétation dans le contexte local

L'interprétation proposée pour le profil au droit du tracé du projet (ex-« faisceau Grand ouest ») a été obtenue grâce à un étalonnage dans le contexte local sur la base d'une ré-interprétation des résultats de l'étude BRGM i-Fontis (Perrin *et al.,* 2015) dont les investigations sont situées 1 km en amont, et des résultats de l'étude BRGM (projet INCA, en cours) située sur le campus du CNRS à Orléans, quelques km en aval (Illustration 21). L'étude i-Fontis bénéficie de 2 forages descendant à 25 et 30 m de profondeur, réalisés sur le profil DA2. Un forage profond de 75 m (n° BSS001CDES) situé à 1 km au sud est utilisé aussi en comparaison. Le site INCA est calibré sur un forage de 50 m de profondeur et situé à environ 100 m du profil de tomographie électrique. On retrouve sur les profils DA1, DA2 et DA3 de l'étude i-Fontis et sur le site INCA une succession R1-C2-R2 comparable à celle observée sur le profil Grand-ouest.

Sur le **site INCA**, le conducteur C2 qui correspond aux calcaires de Pithiviers altérés à composante marneuse est plus épais (20 m) que dans la région de Darvoy et le toit du calcaire de Pithiviers sain ou peu altéré est atteint à des profondeurs de 25-30 m, avec des approfondissements localisés pouvant atteindre 40 m de profondeur. Cet approfondissement est en relation avec une anomalie gravimétrique de faible densité, une anomalie de vitesse sismique (non présentés ici) et un affaissement de surface. Il est interprété comme une zone karstifiée. Au centre de ces anomalies (abscisse 240 m) on remarque une perturbation (R2'') de la couverture R2 qui se marque par un approfondissement localisé de sa base : c'est un indice que le phénomène de fontis a atteint la base de la couche R2, à 8 m de profondeur.

Sur le **site i-Fontis**, la succession R1-C2-R2 est particulièrement régulière sur la partie nord des profils et est plus perturbée au sud. Le conducteur C2 a une épaisseur réduite à moins de 10 m dans ce secteur. La série est complétée par le conducteur C1 qui marque la base du résistant R1. Cette interface est proposée comme marqueur pour caler l'interprétation de profils en profils. On remarque ainsi une remontée progressive de la couche R1 et de l'interface C1/R1 du sud au nord avec une marche vers les abscisses -175 m sur DA2 et DA3, pouvant correspondre à une faille. Cette remontée aboutit à l'affleurement de R1 dans le lit mineur de la Loire au niveau du tracé du projet. Les anomalies karstiques (hachuré rouge), observées dans les forages du projet i-Fontis, s'établissent à l'intérieur de la couche C2 et à l'interface R1-C2, à plus de 20 m de profondeur.

Des perturbations de la couche résistante R2 sont observées en relation avec un fontis à l'abscisse -90 m sur DA3 (approfondissement localisé de la surface topographique) ainsi que qu'au niveau du forage PZ1 sur DA2. Ainsi, les importantes discontinuités de la couche R2 sur la partie sud du profil DA1 peuvent être interprétées comme des indices de karstification. Elles peuvent toutefois aussi être dues à des érosions et des dépôts alluvionnaires postérieurs. Ainsi le conducteur C3, observé au sud de la digue, est attribué à des dépôts alluvionnaires récents.

Le niveau atteint au forage de Darvoy (n° BSS001CDES) et le dernier niveau du forage PZ3bis de i-Fontis (n° BSS001CEFM), attribués à la molasse du Gâtinais, permettent de situer la base des calcaires de Pithiviers à l'intérieur ou à la base du résistant R1 vers l'altitude 77 m NGF.

Ces étalonnages ont ainsi permis :

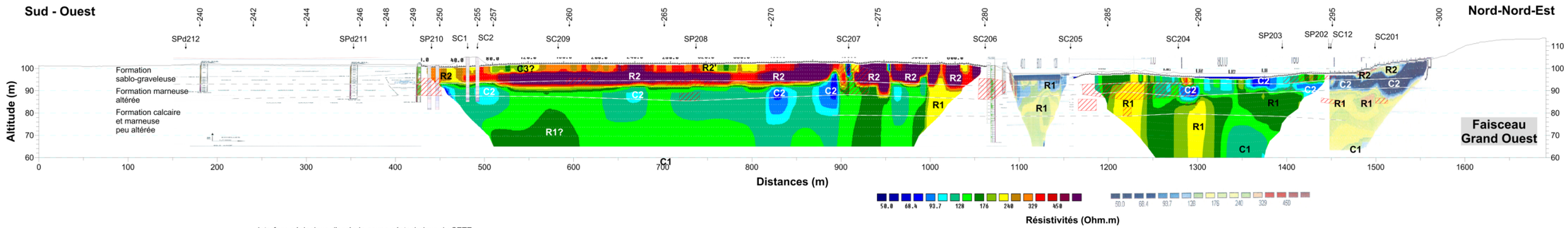
- de montrer que le résistant R1 interprété comme le calcaire de Pithiviers altéré/karstifié et lessivé affleure à proximité du cours mineur (au nord). On observe parallèlement qu'en s'éloignant du lit mineur vers le sud, le conducteur C2 interprété comme les calcaires de Pithiviers altérés/karstifiés, à composante argilo-marneuse, s'épaissit ;
- de révéler la possibilité d'un accident tectonique en rive sud contribuant au changement de faciès géo-électriques du sud vers le nord ;

- de révéler la possibilité associée d'une variation latérale de faciès géologique de la roche originelle (calcaires de Pithiviers), pour expliquer ces variations latérales de faciès géo-électriques ;
- de montrer que les perturbations des couches de couvertures peuvent être utilisées comme des indicateurs de fontis atteignant au moins la base de ces couches ;
- de proposer un calage en profondeur au niveau de l'interface C1/R1. Cette interface permettrait de préciser la transition vers les niveaux sous-jacents aux calcaires de Pithiviers (molasse du Gâtinais, calcaires d'Étampes).

4.2.4. Conclusion de la synthèse géophysique

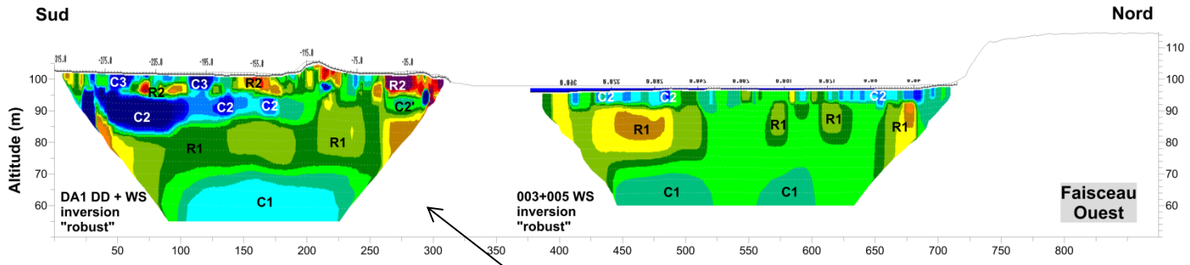
La présente synthèse géophysique apporte les éléments suivants :

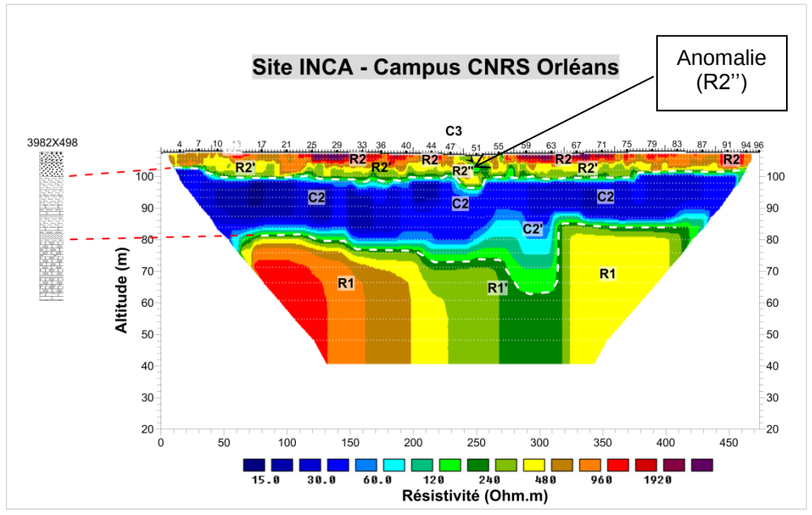
- les **méthodologies géophysiques utilisées sont peu adaptées pour une localisation des cavités** et encore moins des conduits karstiques, parce qu'elles sont trop peu profondes, handicapées par une résolution insuffisante et qu'elles n'ont pas une approche cartographique ou 3D qui permettrait d'appréhender la complexité attendue du réseau karstique. Dans ces environnements karstiques complexes, nous recommandons d'utiliser en électrique des configurations de mesure (dipôle-dipôle, pôle-dipôle, gradient, …) qui offrent une meilleure résolution verticale et latérale. Pour la sismique réfraction, nous recommandons un pas de tir resserré (1 tir/2positions géophone) et une inversion tomographique ;
- mise en évidence d'un schéma général d'interprétation géophysique différenciant la zone du lit mineur et la zone du sud Loire : cette variation de faciès géophysique est interprétée par trois hypothèses qui ne s'excluent pas et peuvent être associées. On envisage ainsi :
  - une différence d'altération entre une zone sud altérée/karstifiée, sous couverture, avec une composante argilo-marneuse importante et une zone nord correspondant au lit mineur où la roche altérée/karstifiée est subaffleurante et lessivée,
  - une structure tectonique (faille) ayant affecté les calcaires de Beauce,
  - une variation lithologique dans les calcaires de Pithiviers ;
- ces variations de nature du substrat n'avaient pas été observées dans les rapports précédents, au moins à partir de la géophysique. Il est néanmoins intéressant de noter que la limite de faciès géophysique concorde avec la discontinuité géomécanique proposée par le CETE dans son rapport de 2006 ;
- la base de la zone altérée / karstifiée n'est pas atteinte par les investigations géophysiques de 2004-2006, car les profondeurs d'investigation sont insuffisantes (<15-20 m en sismique, <15-30 m en électrique). Remarquons que c'est la même chose pour les forages dont seuls deux atteignent 30 m de profondeur ;
- pour les deux raisons précédemment évoquées (méthodologie peu adaptée à l'analyse des cavités et base de la zone altérée/karstifiée non atteinte) et étant donné que les forages réalisés après 2004 ont montré que toutes les zones sont affectées par des indices de karstification importante, l'analyse du BRGM indique que la zonation de 2004 n'est pas fiable en termes de risque vis-à-vis de l'aléa géologique.



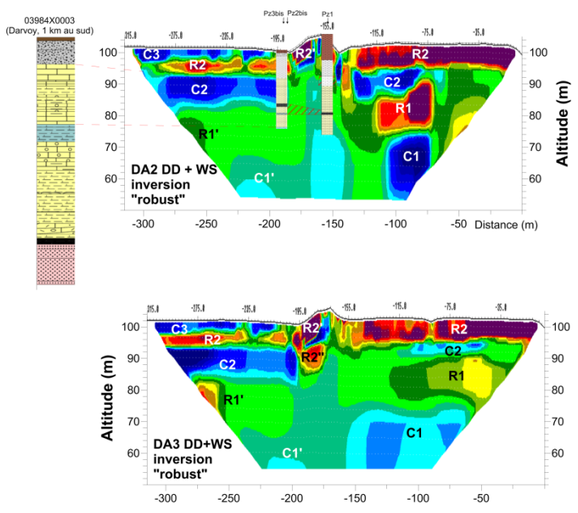
Interface géologique d'après la coupe géotechnique du CETE (rapport 2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 sept. 2006)

Zone anomalique : vide ou zone décomprimée





Anomalie (R2'')



Projet iFontis (Perrin, 2016)

Illustration 21 : Étalonnage de l'interprétation géophysique le long du tracé de franchissement de la Loire (ex-faisceau « Grand Ouest ») dans le contexte local.

Les coupes sériées de l'est à l'ouest couvrant la région de Darvoy sont présentées de bas en haut et comprennent les tomographies DA1 à DA3 du projet BRGM i-Fontis ainsi que les tomographies électriques EDG des deux faisceaux du pont de Jargeau. Les résultats du projet INCA (en cours) sont présentés dans un encadré.

4.3. SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES

4.3.1. Indices karstiques de surface, observations

Informations apportées par les études précédentes

L'étude géologique du CETE (2004a) présente une carte de synthèse des indices karstiques du secteur d'étude regroupant des observations de terrain, des indices ponctuels interprétés à partir de photos aériennes (repérage « d'anomalies » sur les missions photographiques IGN de 1981, 1998, 2001), des indices ponctuels extraits de documents d'archives (BSS, carte géologique) et des dépressions de plus large emprise.

Compléments BRGM

Les indices de l'étude CETE de 2004 sont reportés sur l'extrait cartographique de l'Illustration 22, avec l'ajout des informations suivantes :

- des informations issues d'archives :
  - les circulations karstiques supposées d'après les cartes piézométriques réalisées en 1966 (Desprez, 1967) ;
- des connaissances plus récentes acquises par le BRGM :
  - les dépressions fermées extraites d'une donnée MNT LiDAR acquise par la DREAL (cf. Donsimoni *et al.,* 2008),
  - dans le cadre du projet ALEA-Karst (Perrin *et al,* 2014),
  - les désordres récents décrits dans l'étude i-Fontis (Perrin *et al.,* 2016),
  - les fontis/pertes observés dans la carrière Mauger lors de l'étiage prononcé de septembre 2015 (cf. photos en annexe 5).

Il convient d'indiquer que la précision de localisation des indices est variable, mais dans tous les cas, inférieure à 50 m.

Cette synthèse des indices karstiques de surface indique clairement la forte concentration d'indices en rive sud de Loire et plus particulièrement à proximité du bord de Loire à la fois en amont et en aval du tracé de franchissement. Quelques points situés directement dans le lit mineur correspondent à des pertes, alors qu'en rive nord, on ne compte que deux points en aval du tracé correspondant à des fontis au niveau de la digue.

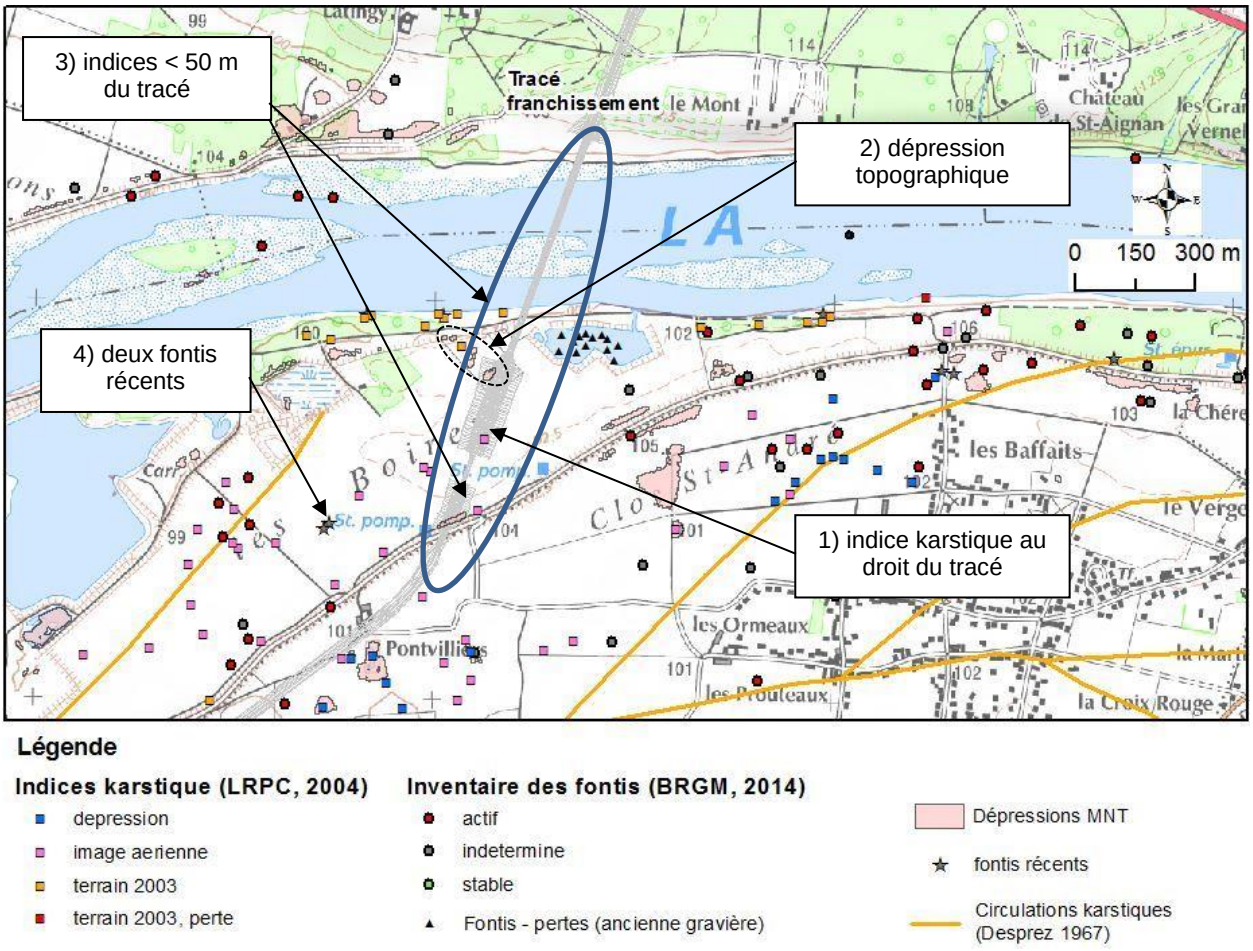


Illustration 22 : Carte synthétisant les indices karstiques et fontis, localisés dans le cadre de différentes études, et les dépressions fermées issues du traitement d'une donnée MNT Lidar.

Au sud de la Loire, au droit et à proximité du tracé du projet, on peut retenir :

- sur le tracé du projet (1) : un indice karstique, issu de l'interprétation d'images aériennes (CETE, 2004) ;
- sur le tracé (et à proximité) à un peu plus de 100 m au sud de la Loire, un alignement de plusieurs indices (2) et de 6 dépressions topographiques (détectées par la donnée MNT 1m LiDAR, Illustration 23). La plus grande dépression mesurerait 25 m de diamètre et ferait 2 m de profondeur ;

  Si elle est liée à un effondrement, la plus grande dépression constituerait l'événement le plus large de la région. La présence dans le sondage SC207, réalisé quelques mètres à l'est de cette dépression, d'une cavité de 3,2 m de haut, remplie de matériaux pourrait conforter cette hypothèse. Une autre hypothèse pouvant expliquer la présence de ces dépressions topographiques est la réalisation (historique) d'excavations pour l'extraction de matériaux (sables, graviers).

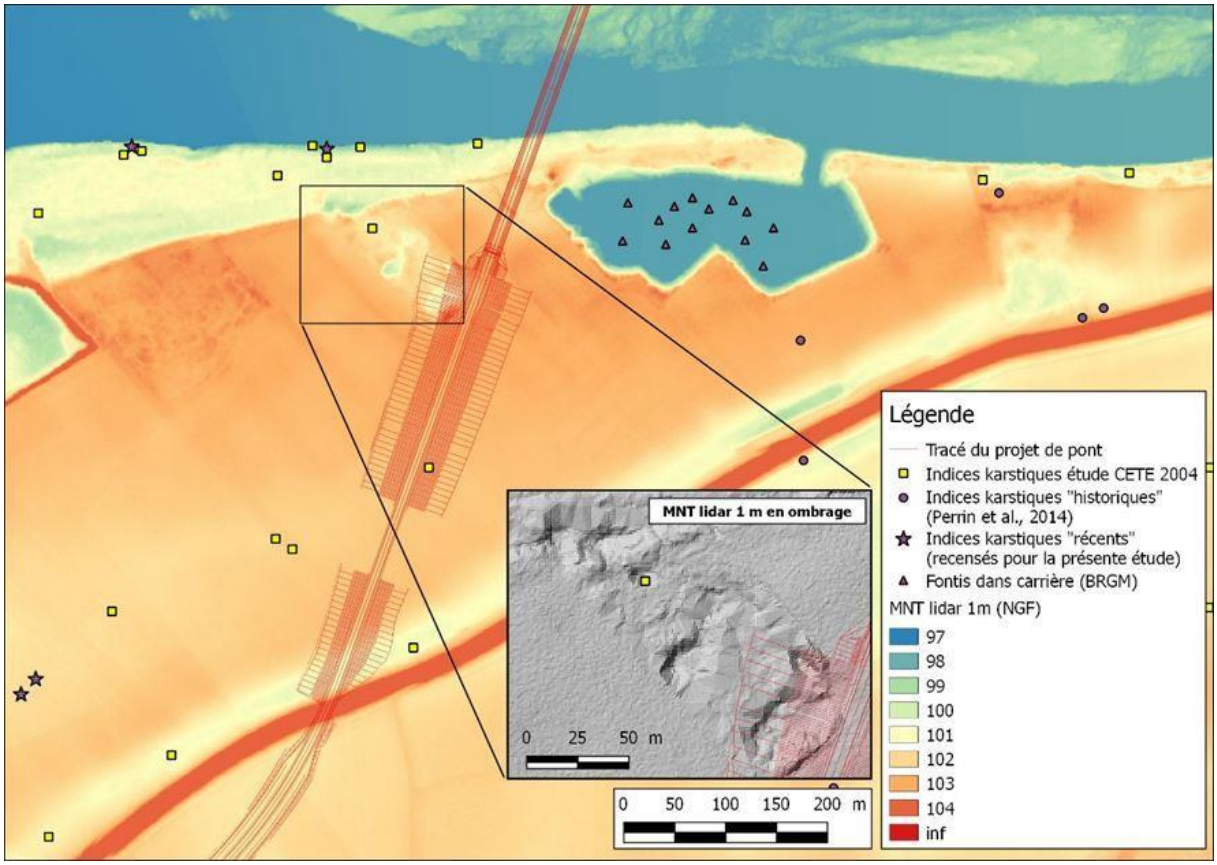


Illustration 23 : Extrait cartographique de la zone d'étude, fond carto MNT lidar, et localisation de la zone de dépression topographique sur le tracé du projet.

- à moins de 50 m du tracé (3) : deux indices karstiques ;
- à environ 300 m à l'ouest du franchissement de la digue (4) : deux fontis récents ont été observés le 8 juin 2017 (cf. photos en annexe 5) ;

  L'un présente un diamètre d'environ 1,2 m et une profondeur d'environ 1,3 m de profondeur. Le 2ème fontis, situé à environ 20 m au sud-ouest, est plus important de forme oblongue de dimensions 2,5 x 3 m et d'une profondeur d'environ 1,5 m. D'après les informations obtenues auprès de l'exploitant du terrain, ils sont apparus respectivement courant avril et début mai 2017 dans un terrain cultivé, sableux. La position de ces fontis a été relevée avec un appareil GPS (précision : environ 5 m).

4.3.2. Indices karstiques de surface, analyse statistique

Densité

À l'échelle du Val, comme l'a montré le CEREMA et après lui l'INERIS et le BRGM, les effondrements se situent préférentiellement près de la Loire (« *la moitié des événements se sont produits dans une bande d'un kilomètre depuis l'axe du fleuve* » - Dore et Mathon, 2014) et près des axes de drainage karstique souterrain (Mathon, 2011). Le projet du pont de Jargeau se situe justement dans cet environnement. Dans ce secteur, en considérant une zone[11] de 3,6 km² (Illustration 24), le nombre d'effondrements signalés est de l'ordre de 47 à

[11] Zone allant : d'est en ouest des carrières au camping de Jargeau et, du nord au sud : de la Loire à la route reliant les lieux-dits la Motte et le Verge.

58[12] sur une surface de 3.6 km², soit une densité de 13,0 à 16,1 événements par km². Cette densité est supérieure d'un facteur 3,7 à 4,6 par rapport à la moyenne calculée sur l'ensemble du Val (3,5 effondrements par km²) : il y a 4 à 5 fois plus d'événements dans cette zone qu'ailleurs dans le Val d'Orléans.

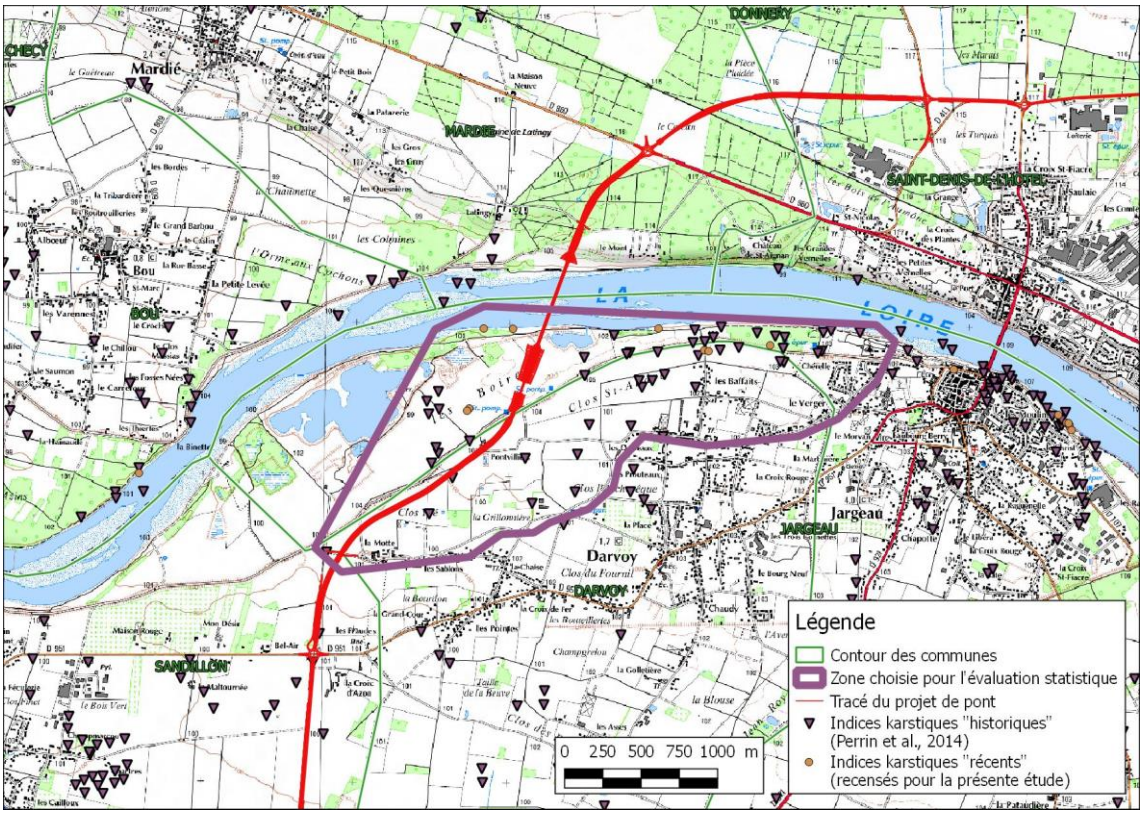


Illustration 24 : Extrait cartographique avec localisation des indices karstiques à l'ouest de Jargeau, et zone choisie pour l'évaluation statistique.

Fréquence

Dans cette zone, les dates des événements sont mal connues. À l'échelle du Val, la fréquence moyenne d'apparition (signalée) est de 3 à 4 mouvements par an (Gombert, 2014 ; Perrin *et al.,* 2016), soit 0,02 à 0,03 événement / km² / an. En considérant 3,7 à 4,6 fois plus d'événements sur ladite zone, on obtient une fréquence supposée d'apparition de 0,074 à 0,138 événement / km² / an sur cette zone.

⇨ avec une surface d'environ 5 ha pour l'emprise du projet en rive sud (entre la Loire et la digue), on peut estimer de manière approximative, car purement statistique (sans prendre en compte la configuration souterraine ou les mécanismes d'instabilité), qu'un événement peut toucher l'infrastructure routière avec une « période de retour » de 145 à 270 ans ;

⇨ à noter qu'en prenant en compte l'ensemble du projet dans le Val, cette période de retour est nécessairement plus faible. Pour rappel, la présente étude ne s'intéresse qu'à la zone de franchissement de la Loire. En allant plus loin, en considérant par exemple le linéaire allant de la Loire à la limite de commune Jargeau - Sandillon (avec les mêmes fréquences que précédemment), la « période de retour » d'un événement affectant l'emprise du projet (10 ha sur cette portion) est de 70 à 130 ans.

[12] Si l'on ajoute les informations acquises spécifiquement sur ce secteur aux études « historiques ».

Influence des inondations

On rappellera enfin l'extrême accélération des phénomènes d'instabilité en cas de fortes intempéries ou d'inondation. Le rôle de ces facteurs aggravants est encore mal connu, mais il est certain. La crise météorologique du printemps 2016 fournit quelques éléments à ce sujet (Noury *et al.,* 2017). À Chécy, l'inondation d'environ 1 km² du Val de Bou (similaire au Val d'Orléans) - 1 à 2 m d'eau pendant 10 jours - a engendré au moins une dizaine de mouvements de terrain d'origine karstique dans ce secteur. Un rapide calcul indique que la cinétique du phénomène aurait été accélérée par 15 000 à 25 000 par rapport aux conditions « normales » dans le Val d'Orléans.

La zone où s'implante le projet est justement située en zone inondable dont la fréquence d'inondation (cinquantennale) est inférieure à la durée de vie supposée de l'ouvrage. À titre purement calculatoire et théorique, dans de telles conditions d'inondation, la « période de retour » pour qu'un effondrement affecte l'emprise de la partie sud du projet s'abaisse à 15 jours environ.

En cas d'inondation de la zone, il est donc probable qu'un mouvement de terrain d'origine karstique survienne sur l'emprise du projet.

NB : Il est à noter que la différence de charges hydrauliques, entre la nappe alluviale et la nappe des calcaires (cf. § 5), peut jouer un rôle dans les phénomènes d'apparition de mouvements de terrain d'origine karstique.

Intensité

Les dimensions de 12 des 58 événements connus dans la zone sont connues. Les diamètres vont de 0,5 à 7 m, pour des profondeurs de 0,5 à 4 m (Illustration 25). Le diamètre moyen est de 2.5 m, la profondeur moyenne de 1,5 m. Ces statistiques sont similaires à celles effectuées sur l'ensemble du Val d'Orléans (Perrin *et al.,* 2014).

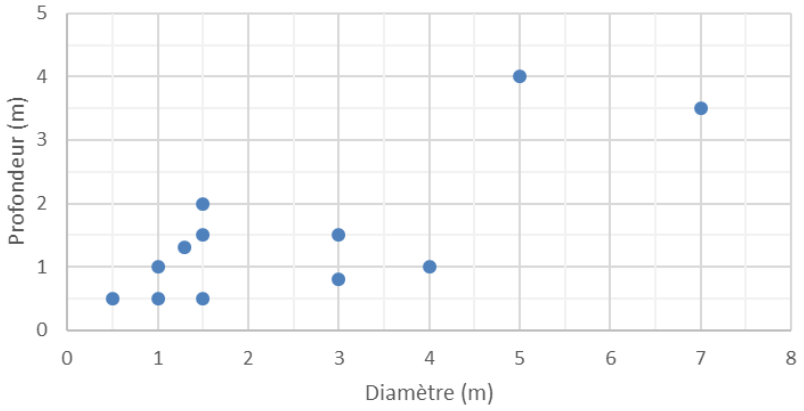


Illustration 25 : Zone située autour du projet, dimensions des mouvements de terrain connues.

L'intensité de ces événements est à confronter aux enjeux concernés. En première approche :

- **pour des fondations ponctuelles, même un petit effondrement peut avoir des conséquences importantes ;**
- **pour des fondations plus étendues, un petit effondrement (de l'ordre de 1 à 2 m) peut être supporté, au moins provisoirement, par la résistance en flexion de la fondation. Seul un important ferraillage correctement conçu (condition anti-fontis) permet à une fondation de ce type de subir une mise en porte-à-faux plus importante ;**

- **pour un corps de remblai tel que celui prévu pour la partie sud du projet, un petit effondrement peut se limiter à déformer la chaussée. Un effondrement plus grand (plusieurs mètres de diamètre) aura en revanche une incidence majeure sur la tenue de l'ouvrage si celui-ci n'est pas conçu de manière adéquate.**

4.3.3. Indices karstiques en profondeur : données issues des forages

Il s'agit ici de réaliser une synthèse des informations concernant les indices karstiques en profondeur, relevés lors des études précédentes.

Les informations géologiques présentées ici portent sur la profondeur des cavités rencontrées, vides ou en partie remplies de matériaux alluvionnaires. Elles sont présentées en Annexe 6.

Si l'on considère les forages carottés, qui bénéficient des meilleures conditions d'observation, ceux-ci indiquent la présence d'une ou plusieurs cavités pour :

- 8 forages parmi les 14 forages carottés réalisés au droit de la zone d'étude, soit 57 % ;

  NB : Si l'on cible le secteur situé le plus au sud, au niveau de la digue, seul 1 sondage carotté a traversé une cavité, parmi les 4 qui ont été réalisés en 2014-2015. Toutefois, il est à noter que ces forages sont moins profonds et ont traversé une épaisseur de calcaire plus faible (soit 1 à 3,5 m, à comparer à une épaisseur de 10 à 15 m pour les autres sondages).

- 2 forages parmi les 4 forages carottés réalisés en 2004 au droit du « faisceau ouest », soit 50 %. Il s'agit des 2 sondages situés au sud de la Loire.

La répartition verticale de ces cavités est illustrée en Annexe 6. On constate qu'elles se distribuent entre le toit des calcaires et 20 m de profondeur. Les grandes cavités sont plutôt situées proche du toit calcaire (ou de sa frange altérée). Concernant leur remplissage, pour les forages carottés, on note qu'un peu plus de la moitié des cavités traversées sont vides. Dans le détail :

- pour la zone d'étude : 11 cavités vides sur les 20 rencontrées (55 %) ;
- pour le « fuseau ouest » : 5 cavités vides sur les 10 rencontrés (50 %).

On peut citer les sondages ayant rencontré les cavités les plus importantes, et qui se répartissent comme suit :

- au droit de la zone d'étude :
  - SC42 : 6 m de hauteur de cavités cumulé, 6 cavités distinctes, hauteur maximale de cavité : 2,2 m (Illustration 26),
  - SC205 : une cavité de 4,4 m de haut,
  - SC207 : une cavité de 3,2 m de haut ;
- au droit du « fuseau ouest » :
  - SC31 : 5,8 m de hauteur de cavités cumulée, 5 cavités distinctes, hauteur maximale de cavité : 1,9 m,
  - SC32 : 3,7 m de hauteur de cavités cumulée, 2 cavités distinctes, hauteur maximale de cavité : 1,2 m.

Il convient de noter que les principales cavités sont rencontrées au sud de la Loire.

Les cavités les plus importantes sont remplies de matériaux alluvionnaires. Ces matériaux sont issus d'un soutirage/suffosion depuis l'interface avec les alluvions sus-jacentes, ou des alluvions issues des pertes en Loire, sous l'effet des circulations d'eau.

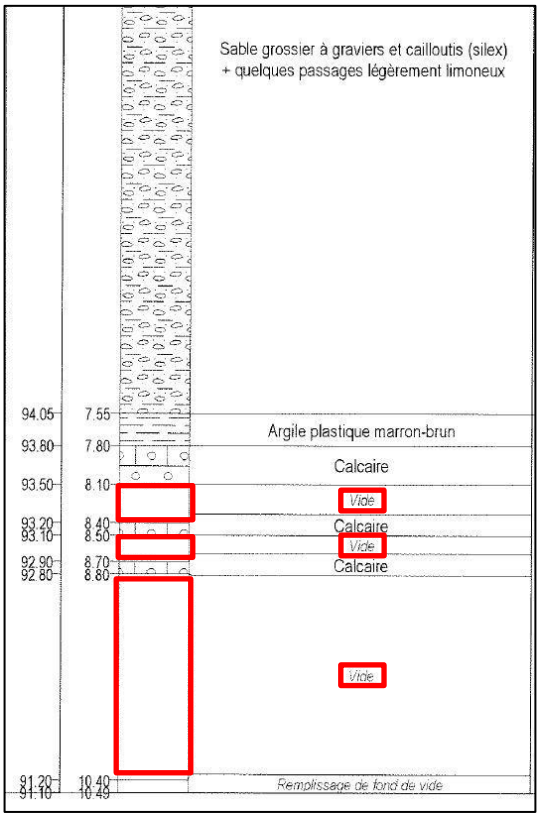


Illustration 26 : Extrait du log de forage SC42, entre 4 et 10,5 m de profondeur.

4.3.4. Analyse des investigations géotechniques menées dans la « couverture »

Données issues des forages

Autant du point de vue géométrique que géomécanique, la rive droite de la Loire et la rive gauche sont nettement différenciées.

On note ainsi des épaisseurs plus importantes de couverture alluviale en rive gauche (7,8 à 9 m) alors qu'en rive droite on observe un épaississement vers l'aval passant de moins d'un mètre au niveau du fuseau ouest à 1,8 à 6,6 m au niveau du fuseau Grand ouest (début de l'ouverture vers le Val de Bou).

Les essais pressiométriques effectués en 2004 (CETE), 2006 (CETE) et 2014 (Hydrogéotechnique) nous permettent d'évaluer les épaisseurs et les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs de cette couverture. Ce recouvrement ainsi défini (alluvions modernes et calcaires altérés) est nettement moins épais en rive droite qu'en rive gauche : 7 à 8 m (RD) contre 15 à 16 m (RG).

En rive droite, les sondages SP11 à SP13 de 2004 et SP201 à SP203 de 2006, fournissent les valeurs moyennes suivantes (Tableau 2) :

Rive droite	**Alluvions modernes**			**Calcaire altéré**		
	Épaisseur (m)	Em[13] (MPa)	Pl[14] (MPa)	Épaisseur (m)	Em (MPa)	Pl (MPa)
Moyennes	2,8	9,7	0,7	4,4	31,4	2,2
Min	2,2	2,1	0,2	2,7	1,6	0,2
Max	4,5	30,2	1,5	6,6	153,9	5,3

Tableau 2 : Données géotechniques sur les couches des alluvions et du calcaire altéré, en rive droite.

En rive gauche, les sondages SP41 et SP42 de 2004, SP206 à SP210 de 2006 et SP1 et SP2 de 2014 fournissent les valeurs moyennes suivantes (Tableau 3) :

Rive gauche	**Alluvions modernes**			**Calcaire altéré**		
	Épaisseur (m)	Em (MPa)	Pl (MPa)	Épaisseur (m)	Em (MPa)	Pl (MPa)
Moyennes	8,8	11,8	1,0	7,0	18,4	1,1
Min	7,5	0,6	0,0	5,6	1,0	0,1
Max	11,3	65,7	4,8	9,3	329,1	4,6

Tableau 3 : Données géotechniques sur les couches des alluvions et du calcaire altéré, en rive gauche.

Les valeurs minimales de Em et Pl observées en forage dans les calcaires altérés pourraient correspondre à d'anciens fontis comblés par des matériaux de couverture.

Les calcaires altérés présentent de meilleures caractéristiques mécaniques moyennes en rive droite, avec un module pressiométrique moyen de l'ordre de 30 MPa et une pression limite moyenne de l'ordre de 2 MPa, contre respectivement 20 MPa et 1 MPa en rive gauche. L'altération en rive gauche semble plus poussée du point de vue géomécanique et se développe sur une épaisseur plus importante (7 m contre 4 m en rive droite).

Ces valeurs moyennes ne rendent pas compte de la forte variabilité des caractéristiques mécaniques dans les calcaires altérés : on distingue, d'une part, des passages particulièrement peu - voire pas du tout - résistants et, d'autre part, des passages indurés qui présentent des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'un calcaire sain.

En ce qui concerne les caractéristiques géotechniques ponctuelles, trois essais de perméabilité de type Nasberg ou Lefranc ont été réalisés dans le sondage carotté SC1 situé au niveau de la digue (Hydrogéotechnique, 2014), dans la partie corps de digue et alluvions, avec les résultats suivants : 3,7 x 10^{-6} m/s (prof. : 1-2 m), 1,8 x 10^{-6} m/s (4-5 m), 4,3 x 10^{-6} m/s (8-9 m).

Les alluvions présentent des caractéristiques mécaniques comparables sur les deux rives, avec des modules pressiométriques Em de l'ordre de 10 à 12 MPa en moyenne et des pressions limites Pl* de l'ordre de 0,7 à 1 MPa. Il s'agit de caractéristiques mécaniques typiques d'un sol alluvionnaire peu résistant.

[13] Em : Module pressiométrique
[14] Pl : Pression limite

En résumé de la partie 4, les résultats des investigations réalisées et les compléments d'analyse du BRGM indiquent toutes que le substratum géologique carbonaté est fortement karstifié. En témoignent : non seulement les indices de surface (dolines, fontis), mais aussi les profils géophysiques et enfin les observations en sondages de cavités, remplies ou non de matériaux meubles.

Conformément aux connaissances bibliographiques disponibles, les investigations réalisées indiquent que la karstification se traduit de 2 manières, (1) au sommet du calcaire par crypto-karstification, soit une formation résiduelle issue de l'altération des calcaires (niveau « marneux », « mou ») et (2) par des vides au sein du substratum carbonaté (conduits/drains karstiques). Les cavités traversées par les sondages se situent essentiellement entre 82 et 92 m NGF pour la rive sud (terrain naturel entre 100 et 103 m NGF), soit de 10 à 20 m de profondeur par rapport au sol.

Par ailleurs, à l'issue d'un bilan des investigations géophysiques menées sur la zone d'étude (2004, 2006, 2014), et d'une interprétation effectuée en comparaison d'autres données géophysiques dans le Val d'Orléans, l'analyse du BRGM apporte plusieurs éléments d'information : les méthodologies géophysiques utilisées en 2004, 2006 et 2014 sont peu adaptées pour une localisation des cavités et encore moins des conduits karstiques, de plus, la zonation de 2004 n'est pas fiable en termes de risque vis-à-vis de l'aléa géologique.

La synthèse des indices karstiques de surface indique clairement la forte concentration d'indices en rive sud de Loire et plus particulièrement à proximité du bord de Loire, à la fois en amont et en aval du tracé de franchissement.

Ce contexte karstique se traduit par un fort aléa de mouvement de terrain (cf. § 6.2), fortement accru en cas de submersion. En cas d'inondation liée à la crue de la Loire, il est plus fortement probable qu'un mouvement de terrain d'origine karstique survienne sur l'emprise du projet.

5. Synthèse hydrogéologique

5.1. ANALYSE DES MESURES HYDROGÉOLOGIQUES RÉALISÉES

Les résultats des mesures de 2004 sont présentés par l'Illustration 27.

Les sondages traversent quasi-systématiquement les alluvions et le substratum carbonaté, le niveau mesuré correspond donc à un niveau piézométrique moyen intégrant les charges hydrauliques des niveaux des nappes alluviale et calcaire. Comme les deux niveaux de nappe semblent s'équilibrer dans ce secteur ouest de Jargeau (cf. § 2.2.3), on peut supposer en 1ère approche que le niveau moyen mesuré correspond à peu près au niveau de la nappe des calcaires et à celui de la nappe alluviale, considérés quasiment identiques.

Les mesures n'étant pas synchrones, c'est-à-dire qu'elles ont été faites à des périodes différentes, il n'est pas possible de les comparer entre elles. De plus, les niveaux mesurés en sondages sont rarement des mesures « stabilisées » (mesures encore perturbées par les actions de foration).

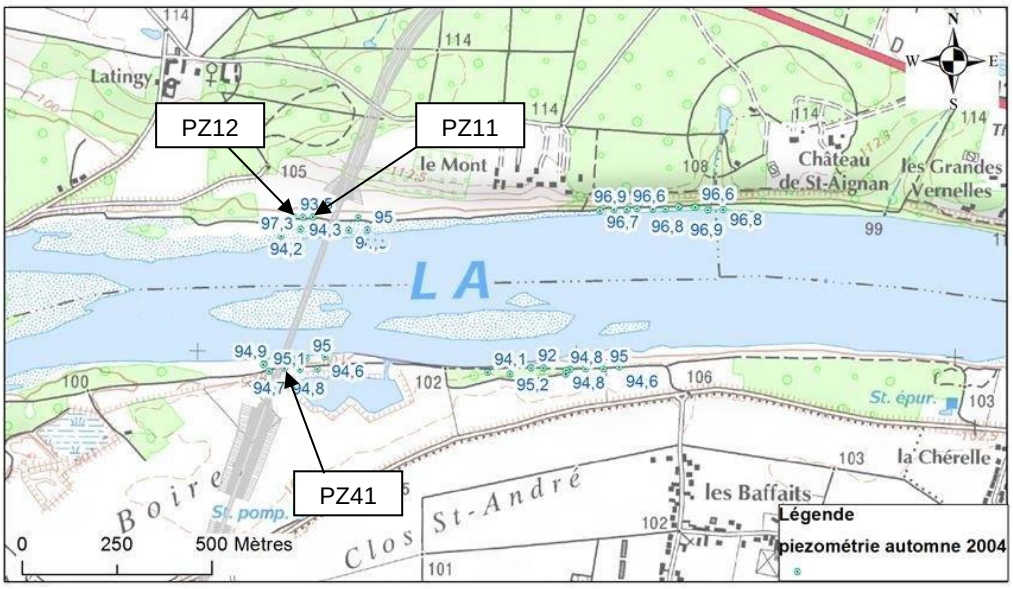


Illustration 27 : Données piézométriques non synchrones, acquises en sept.-oct. 2004 par le CETE.

Une autre information, qui illustre l'altération du toit de la formation des calcaires de Beauce, est la perte totale de circulation lors de la réalisation des sondages : la totalité des 31 sondages destructifs, des 5 piézomètres réalisés en 2004 (CETE, 2004) et le sondage destructif réalisé en 2006 (CETE, 2006) montrent des pertes totales de circulation dans les calcaires, ce qui illustre leur perméabilité élevée.

Il convient de noter que le fonctionnement hydrogéologique des vides rencontrés n'est pas connu. On peut faire l'hypothèse que la majorité des vides comblés constituent d'anciens drains actuellement peu actifs, alors que les vides francs sont pour l'essentiel des drains actifs.

Dans l'ensemble, il n'y a pas d'autres données hydrogéologiques issues des investigations. Les reconnaissances par forages n'ont pas donné lieu à des relevés sur les profondeurs des venues d'eau, ni sur les débits.

5.2. COMPLÉMENTS DU BRGM : PERTES DE LOIRE ET ÉTANG DE MAUGER

Le lit de la Loire, depuis Jargeau jusqu'en aval du tracé de franchissement, est marqué par des pertes alimentant le réseau karstique. Le lieu-dit de la zone d'étude est d'ailleurs nommé « les Boires », ce qui reflète bien la particularité hydro(géo)logique de ce secteur. Des infiltrations vers la nappe souterraine ont lieu au droit du lit mineur de la Loire, ainsi que dans les étangs qui correspondent à des gravières actuelles (environ 800 m à l'ouest du tracé du projet) ou anciennes (étang de Mauger, à moins de 100 m à l'est).

En amont immédiat du tracé, les pertes les plus importantes répertoriées sont celles observables à l'étang de Mauger, qui correspond à une ancienne gravière (cf. photos en annexe 5). La nature géologique du fond de l'étang n'est pas connue (alluvions ou calcaires ?). Lors de l'étiage prononcé de Septembre 2015, à l'occasion d'observations faites par le BRGM dans le cadre d'un autre projet d'étude, une vingtaine de fontis ont été observés au droit de l'étang de Mauger. Il s'agit de points d'infiltration vers l'aquifère, des eaux issues de la Loire, connectée à cet étang via un bras d'écoulement situé à un peu moins de 300 m en amont du tracé du projet. Le débit infiltré en septembre 2015 a été estimé à environ 100 l/s, de manière approximative (pas de mesures effectuées), mais ce débit est plus important à d'autres périodes de l'année.

Sur la base des connaissances bibliographiques, il apparaît que ces pertes alimentent l'aquifère des calcaires karstiques sous-jacent et sont probablement connectées à des drains karstiques qui s'écoulent vers le sud-ouest, comme cela est indiqué dans le rapport de 2004 (CETE, 2004b). Toutefois, on ne dispose pas d'informations sur les drains karstiques actifs. Les principales informations sont issues des cartes piézométriques réalisées en 1966, dont l'interprétation (Desprez, 1967) a conduit à tracer des zones préférentielles supposées des écoulements souterrains, qui pourraient correspondre aux principaux axes de circulations karstiques.

Il est à noter que les infiltrations d'eau à l'étang de Mauger sont supposées constituer un point d'alimentation important vers l'aquifère, et jouent ainsi un rôle de soutien au débit des exutoires, représentés principalement par les sources du Loiret. À l'issue d'une période de fermeture de cette connexion au cours des années 2000, le rétablissement de l'écoulement des eaux (de la Loire vers l'étang de Mauger) qui a suivi aurait conduit à une élévation du niveau de la rivière Loiret observée par des riverains[15].

Que ce soit en période de hautes eaux ou de basses eaux, la carte piézométrique de Desprez (1967), traduit une alimentation des eaux souterraines par les pertes de la Loire, avec un écoulement globalement orienté vers le sud-ouest (Illustration 28). Cela est confirmé par une mission d'actualisation des cartes piézométriques, en cours sur le Val d'Orléans (bureau d'études : Geaupole, maître d'ouvrage : SAGE Val Dhuy - Loiret).

[15] Information orale obtenue auprès de l'ASRL, Association Syndicale de la Rivière Loiret.

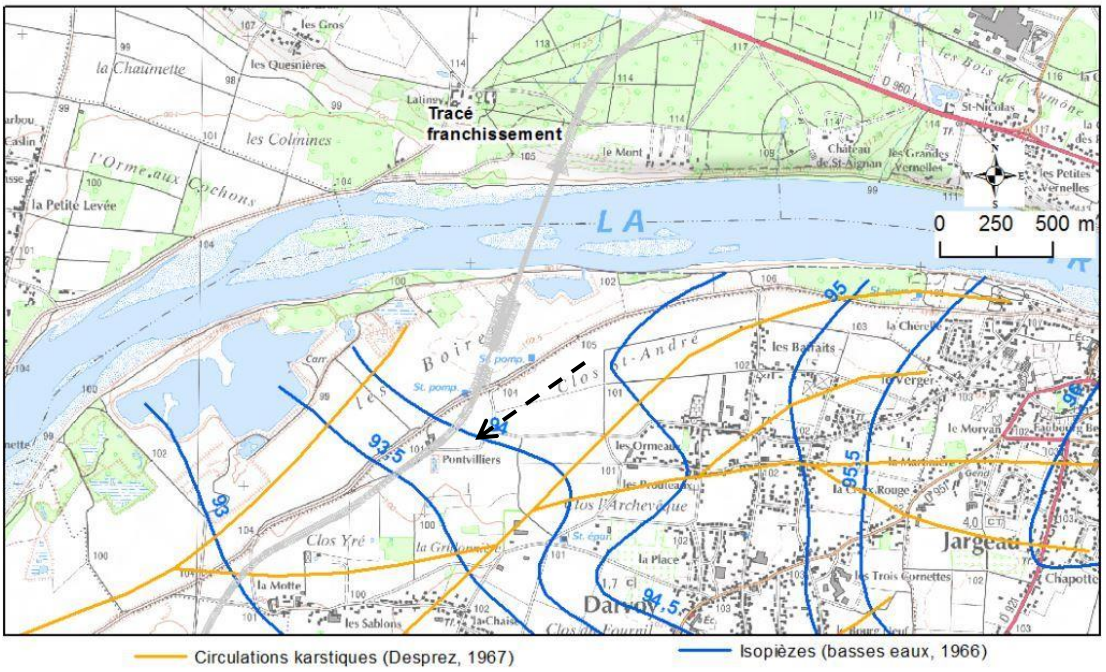


Illustration 28 : Sens d'écoulement de la nappe des calcaires, d'après la carte piézométrique de 1966 (Deprez, 1967), fond IGN à 1/25 000).

Comme cela est indiqué dans le paragraphe 2.2, des données de traçages hydrogéologiques apportent des éléments complémentaires sur les écoulements d'eau souterraine dans le secteur ouest de Jargeau. De nombreuses opérations de traçages ont été réalisées, en particulier dans les années 2000, avec injection d'un (ou plusieurs) traceur(s) fluorescent(s) et suivi de la restitution au niveau des sources du Loiret (Bouillon, Abîme, Pie, etc.). Même s'ils n'apportent pas de précision sur le sens d'écoulement souterrain local, ils confirment un transfert rapide des eaux de la Loire vers le réseau aquifère karstique présent au sein des calcaires de Beauce.

Une opération de traçage artificiel a par ailleurs été réalisée en mars 2009, avec injection de jaune duasyn au droit d'une perte de Loire (proche du camping de Jargeau) et d'uranine à l'étang de Mauger, et surveillance au droit des deux sources du Bouillon et de l'Abîme situées au Parc floral à Orléans-la-Source (Illustration 29). L'utilisation de deux traceurs différents permet de distinguer les paramètres de restitution pour ces deux points d'injection.

Les résultats et l'interprétation de cet essai sont présentés dans le rapport du bureau d'études EDREE en annexe 7 du présent rapport. L'engagement de cette opération avait été mené à l'initiative du bureau d'études, indépendamment du projet porté par le Conseil départemental du Loiret, dans un but d'amélioration de la connaissance de l'alimentation du karst du Val d'Orléans. L'édition de ce rapport a été effectuée a posteriori à la demande du Conseil départemental du Loiret dans le cadre de cette synthèse des données menée par le BRGM.

Pour ce traçage positif, réalisé en période de relatives hautes eaux, les vitesses maximales apparentes sont de l'ordre de 200 m/h, que ce soit pour les eaux infiltrées en Loire ou pour les eaux infiltrées à l'étang de Mauger.

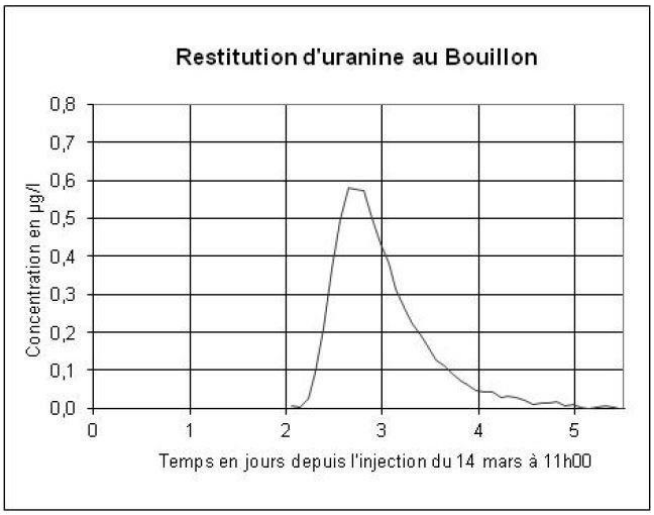


Illustration 29 : Courbe de restitution d'Uranine à la source du Bouillon (injection à l'étang de Mauger).

Cela confirme un transit rapide des eaux infiltrées à l'étang de Mauger au sein du réseau aquifère karstique.

Il est à noter que les taux de restitution aux sources, du traceur injecté à l'étang de Mauger, est plus faible (environ 6 %) que ceux du traceur injecté à la perte en Loire (environ 25 %). Cela pourrait être dû à des configurations différentes (effets de dilution ?), ou à une contribution relative plus faible des eaux de l'étang de Mauger, par rapport à celles de la perte en Loire, vers les sources du Bouillon et de l'Abîme.

5.3. SYNTHÈSE DES DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES

Le système aquifère est constitué de deux niveaux : le niveau aquifère alluvial sus-jacent (n° BD Lisa[16] 900AB47) et le niveau aquifère des calcaires de Beauce (n° 107AA/107AF). Ces 2 niveaux n'ont pas été distingués lors des investigations passées dans les documents consultés.

Dans le cadre du projet i-Fontis (Perrin *et al.,* 2016), il a été montré que les fluctuations piézométriques sont quasiment similaires entre les deux niveaux. Cette nuance peut s'avérer utile pour la suite du projet, notamment pour de prochaines investigations.

La nappe des calcaires karstiques est de loin la plus productive. Elle est exploitée notamment par deux forages agricoles (n° BSS001CDWM, n° BSS001CEAK) situés en pied de digue, côté nord, à proximité directe du tracé du projet, respectivement à 20 m et 200 m.

Concernant le réseau karstique, le rapport du CETE de 2004 décrit « un réseau karstique d'orientation E/SO très développé sur la moitié sud de la Loire et sur son lit majeur en rive gauche où des zones d'écoulements préférentiels ont été mis en évidence », ce qui est conforme avec les connaissances bibliographiques dans ce secteur et notamment avec ce qui a été présenté dans le paragraphe 5.2.

Par ailleurs, les expérimentations réalisées dans le cadre du projet i-Fontis, à environ 1 500 m en amont du tracé et situé dans un contexte comparable (Illustration 5), permet d'apporter des informations complémentaires par rapport aux documents consultés, concernant l'hydrogéologie du secteur (Perrin *et al.,* 2016) :

[16] BD Lisa : Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères

- la réalisation d'une carte piézométrique locale en période d'étiage a permis de connaître le gradient hydraulique de la nappe calcaire : il est d'environ 0,05 %, de l'est vers l'ouest, c'est-à-dire une dénivellation de 5 cm pour une distance de 100 m ;
- la forte transmissivité des calcaires (0,2 m²/s) a été montrée par un pompage d'essai sur un forage (n° BSS001CEFK) recoupant un conduit karstique. L'essai hydraulique visant à caractériser la nappe alluviale a montré que les alluvions ont une faible perméabilité ($1{,}45.10^{-6}$ m/s) ;
- les opérations de traçages menées sur le site d'étude i-Fontis, ont mis en évidence une connexion directe entre des pertes en Loire (à Jargeau) et les conduits karstiques atteints par les forages, confirmant ainsi que les forages ont pu être implantés sur des drains karstiques actifs ;
- en étiage, le niveau de la Loire a été estimé à une cote supérieure de l'ordre de 2 m au-dessus des niveaux piézométriques mesurés dans les nappes alluviale et karstique ;
- les fluctuations piézométriques atteignent une amplitude maximale de 3,4 m.

Pour rappel (cf. partie 2.2), la zone d'étude se situe au droit du système aquifère karstique du Val d'Orléans, dont l'extension correspond approximativement à la plaine alluviale de la Loire (et au-delà, notamment en rive droite de la Loire, Illustration 6), et qui s'étend depuis l'est de Châteauneuf-sur-Loire en amont, jusqu'au secteur de la confluence entre Loire et Loiret en aval (ouest d'Orléans).

Les eaux souterraines sont exploitées par des puits et forages situés en aval du projet, certains pour l'eau potable (Sandillon, Orléans, etc.) et la partie sud (de la Loire) du projet se trouve à l'intérieur du périmètre de protection éloignée des captages du Val, exploités pour l'eau potable de l'agglomération orléanaise.

En résumé, les écoulements souterrains au droit de la zone d'étude sont rapides au sein du réseau karstique (calcaires de Pithiviers) et sont alimentés essentiellement par les pertes des eaux de la Loire, qui se produisent dans le lit du fleuve et à proximité (ex : étang de Mauger). Le sens d'écoulement global est orienté vers l'ouest/sud-ouest ce qui implique que des conduits karstiques actifs sont probablement positionnés au droit du tracé du projet, entre la Loire et la digue. Les investigations réalisées essentiellement en 2004 et 2006 et présentées dans les documents consultés n'apportent pas de précisions sur les écoulements souterrains (drains actifs ? débits ?).

6. Évaluation des risques au regard du contexte karstique

Comme cela a été discuté précédemment, la zone d'étude, qui correspond au franchissement de la Loire jusqu'à la digue au sud, est caractérisée par un contexte karstique qui affecte le substratum carbonaté (calcaires de Beauce, plus ou moins altérés), ainsi que la couverture meuble sus-jacente (alluvions de la Loire).

Le projet routier de franchissement de la Loire (Illustration 30) est caractérisé par une partie en viaduc au droit du lit mineur de la Loire (appuis sur pieux), une partie en remblais au sud de la Loire, puis une partie plus courte en passage supérieur (ouvrage de décharge, permettant l'écoulement des eaux en cas de crue avec submersion) et enfin le passage sur la digue (appui sur inclusion rigide). Pour mémoire, il est prévu 5 piles de pont pour le franchissement de la Loire, et 2 piles pour l'ouvrage de décharge situé entre la Loire et la digue.

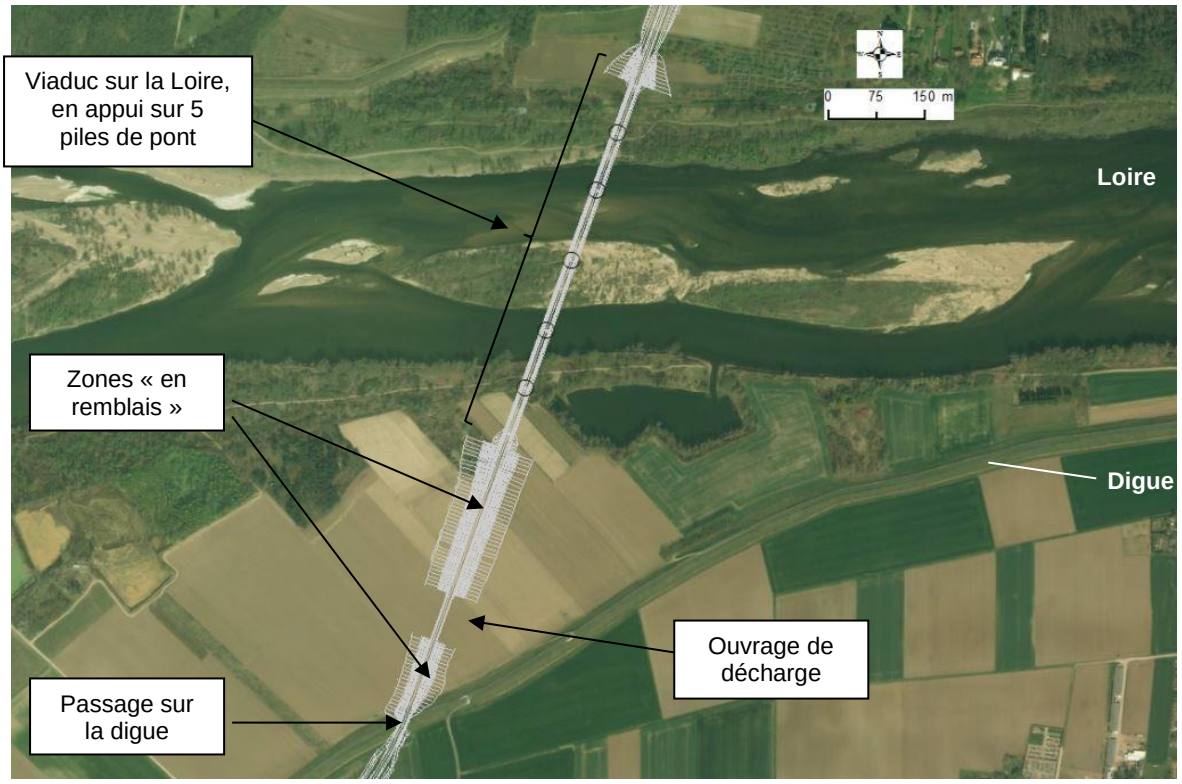


Illustration 30 : Tracé du projet dans la zone de franchissement de la Loire.

Les risques associés au projet comportent deux aspects distincts au regard du contexte karstique : 1) le risque engendré par le projet sur l'aquifère karstique, par une modification au sein du réseau de drains souterrains et 2) le risque qu'un mouvement de terrain remette en cause la stabilité de l'infrastructure.

6.1. ÉVALUATION DES RISQUES D'IMPACT SUR LES CIRCULATIONS AU SEIN DE L'AQUIFÈRE KARSTIQUE

L'ensemble du substratum du Val d'Orléans est constitué par les calcaires de Beauce karstifiés comme cela a été présenté dans la partie 4.1. Cette karstification est particulièrement intense dans la zone d'étude en raison de la proximité de la Loire, dont la position perchée par rapport à la nappe souterraine est à l'origine d'une circulation d'eau constante au sein du réseau de drains karstiques.

La réalisation des fondations des parties en viaduc devrait impliquer la réalisation de pieux en profondeur jusqu'au substratum rocheux peu altéré (Illustration 31). À notre connaissance, pour le pont de l'Europe, le CETE (actuel CEREMA) recommandait un traitement des cavités karstiques en injection solide. Les autres informations à notre disposition[17] pour des constructions en contexte similaire sur le secteur (élargissement de l'A71, STEP d'Orléans-la-Source, cf. aussi § 2.4.4) indiquent de nombreuses difficultés apparues en cours de chantier (surconsommation excessive de coulis, dépassement de budget et de calendrier). Dans tous les cas, le fait de remplir les cavités rencontrées, en partie ou totalement, serait susceptible de réduire les écoulements d'eaux issues de la Loire vers la nappe, notamment ceux issus des pertes à l'étang de Mauger.

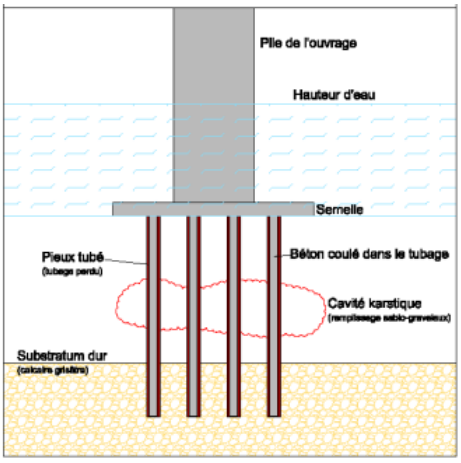


Illustration 31 : Schéma de coupe d'une pile en Loire sur fondation profonde en zone karstique - projet (source : Conseil départemental du Loiret).

En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de quantifier l'impact potentiel d'un éventuel comblement de conduits karstiques, dans la mesure où les quantités infiltrées, et leur évolution dans le temps sont actuellement mal connues. De plus, le réseau karstique est évolutif, la position des conduits actuellement non connue, et il n'est pas possible de prédire l'impact du comblement d'un ou plusieurs conduit(s) sur le réseau de drains, un report sur des conduits voisins (mise en charge hydraulique) étant possible.

Par ailleurs, un autre risque d'impact concerne la qualité de la ressource en eau, d'autant plus que la rive gauche de la Loire se trouve dans le périmètre de protection éloignée des captages d'eau potable de la Ville d'Orléans. En phase de travaux, le chantier peut être à l'origine d'infiltrations de composés indésirables vers le sous-sol et par conséquent impacter la qualité de l'eau de la nappe.

[17] informations essentiellement orales, n'ayant à notre connaissance jamais donné lieu à un quelconque retour d'expérience officiel.

6.2. ÉVALUATION DES RISQUES DE MOUVEMENT DE TERRAIN

Comme en témoignent les nombreux indices relevés en surface, la section du projet en remblais, située dans le lit majeur entre la levée sud (digue) et l'ouvrage de franchissement de la Loire *stricto sensu*, est particulièrement exposée à l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique.

Cette zone cumule en effet plusieurs caractéristiques défavorables :

- un réseau particulièrement dense de cavités karstiques (cf. § 2 et § 4). Celles-ci sont parfois très grandes : jusqu'à 4 m de haut, et souvent vides (50 % des cavités rencontrées) ;
- en conditions normales : d'intenses circulations d'eau (§ 5), qui vont non seulement de la surface vers le réseau (infiltration à travers la couverture alluviale, battement de nappe, zones de pertes), mais sont aussi très fortes au sein même du réseau karstique ;
- en cas de crue : des circulations d'eau sont encore plus fortes. Il s'agit ici d'un phénomène qui dégrade particulièrement la stabilité de ce type de terrain (§ 4.3.2).

Cette configuration est propice aux deux phénomènes décrits au § 2.3.2, qui aboutissent tous deux à des effondrements (ou au mieux à des affaissements) en surface :

- rupture du toit de grandes cavités karstiques. Ce phénomène est *a priori* rare mais génère de grands effondrements en surface ;
- soutirage des alluvions recouvrant le karst.

Cet aléa est par ailleurs accru :

- du fait du poids de l'ouvrage en remblais (cf. Gombert *et al.,* 2015) ;
- en cas de modification des écoulements dans les drains karstiques (obstruction d'un drain actif lors de travaux et réactivation consécutive d'un drain colmaté).

Les études géotechniques spécifiquement réalisées pour le projet n'ont pas précisé le niveau de cet aléa. Bien qu'une démarche soit actuellement en cours (travaux du BRGM et du CEREMA pour la DGPR[18]), il n'existe actuellement pas de guide méthodologique pour l'évaluation de l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique.

En l'état actuel des connaissances, et en se basant sur des démarches similaires d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à d'autres types de cavités[19], nous estimons que l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique sur l'emprise du projet est fort.

En effet, vu les événements enregistrés sur la zone (§ 4.3 et § 4.3.2) et la connaissance actuelle du sous-sol (§ 4.2, § 4.3.3, § 5) :

- la probabilité qu'un tel événement se produise sur l'emprise du projet pendant sa durée de vie est possible, voire probable. Suivant le guide GEODERIS, cela correspond à une « prédisposition » très sensible ;
- les dimensions que pourrait prendre un tel événement correspondent à des intensités allant de « limitée » à « modérée », voire à « élevée » si on considère les profondeurs ou le plus grand diamètre possible :
  - diamètre pouvant aller de 0,5 à 7 m (§ 4.3.2), voire 25 m (§ 4.3),

[18] Direction Générale de Prévention des Risques (Ministère de la transition écologique et solidaire).
[19] Guide PPRN « cavités souterraines abandonnées » (MEDE, 2012), et guide GEODERIS pour l'aléa mouvement de terrain d'origine minière (Vuidart, 2012).

- profondeur pouvant aller de 0,5 à 4 m (§ 4.3.2) ;

- le croisement « prédisposition » et intensités aboutit à un aléa fort.

Cet aléa pourra être confirmé et complété en précisant sur toute l'emprise du projet :

- la cartographie (dans l'idéal dans les trois dimensions) des cavités karstiques vides, partiellement remplies ou remplies ;
- leurs profondeurs et dimensions ;
- les circulations d'eau y régnant ;
- les phénomènes d'instabilité pouvant y avoir lieu.

En l'état, le risque inhérent est fort sur l'emprise du projet :

- s'il survient en phase chantier, un tel mouvement de terrain remettrait non seulement en cause la sécurité des biens et des personnes se trouvant à proximité, mais imposerait aussi un arrêt de chantier ;
- s'il survient en phase d'exploitation sur un ouvrage non conçu pour supporter un tel désordre, un tel mouvement remettrait en cause la stabilité de l'ouvrage et donc son usage, voire la sécurité des biens et des personnes y circulant à ce moment.

6.3. AUTRES RISQUES GÉOTECHNIQUES

Comme évoqué de manière générale au § 2.4, au-delà des risques de mouvements de terrain (voir § 6.2) qui devront nécessairement être pris en compte pour la conception et l'exécution du projet, l'intense karstification du substratum ainsi que les fortes circulations d'eau dans le réseau génèrent d'importants risques géotechniques au sens de la norme NF P94-500 (§ 3.2).

Si aucune précaution n'est prise à ce sujet, il y a des risques d'intenses surconsommations de coulis lors d'injections en profondeur, en particulier dans le karst. S'agissant de génie-civil, cette partie pourra être précisée par le CEREMA.

7. Synthèse des recommandations et propositions complémentaires

7.1. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

La configuration géologique et le fonctionnement hydrogéologique complexes du secteur nécessitent d'être connus dans l'espace et dans le temps.

Les cavités karstiques souterraines s'organisent en effet en un réseau évolutif. Des conduits peu actifs, voire bouchés peuvent se réactiver à la faveur de perturbations (crues de la Loire, effondrement affectant une cavité, comblement anthropique). Cette réactivation peut à son tour générer d'autres perturbations (effondrements, turbidité dans les écoulements).

Les investigations réalisées ont essentiellement suivi les axes pressentis du projet mais n'ont guère abordé sa véritable zone d'influence. Celle-ci n'est d'ailleurs pas déterminable en l'état actuel des connaissances. Elle dépend non seulement de la configuration géologique et du fonctionnement hydrogéologique du réseau karstique (celui-ci s'étendant a priori jusqu'aux sources du Loiret) mais aussi de la conception du projet.

Les investigations réalisées se sont par ailleurs principalement intéressées à l'aléa mouvement de terrain (bien que de manière incomplète), mais elles n'ont que peu traité l'aléa hydrogéologique et les interactions bilatérales pouvant avoir lieu entre les circulations d'eau et les mouvements de terrain (l'un perturbant l'autre et vice-versa). Bien que les études précédentes aient confirmé et précisé les contraintes générées par le contexte karstique, elles n'ont donc pas intégralement traité les risques qui en découlent.

➔ Au vu des éléments présentés dans ce rapport, il est recommandé dans un **objectif n° 1** de mener des investigations complémentaires pour tenter de localiser et de caractériser les principaux conduits karstiques :

- la méthode géophysique de microgravimétrie est préconisée, car elle est plus sélective en matière de cavités que les autres méthodes géophysiques présentées dans cette synthèse et plus adaptée pour obtenir une première vue cartographique des principales anomalies de faible densité associées au karst. Elle sera utilement complétée par des profils sériés de tomographie électrique et sismique qui permettront de préciser la nature et la profondeur des anomalies ;
- la réalisation de sondages et d'investigations associées coordonnés à la géophysique : des forages implantés au droit des anomalies identifiées par la géophysique permettront de confirmer l'existence d'un conduit karstique et d'évaluer ses caractéristiques (dimensions), à l'aide de diagraphies : mesure venues d'eau, passage caméra, etc.

NB : prévoir une localisation systématique des sondages avec une précision centimétrique en cas de mesure du niveau de la nappe (levé par un géomètre, GPS différentiel).

7.2. RECOMMANDATIONS VISANT À LIMITER L'IMPACT DU PROJET SUR L'AQUIFÈRE KARSTIQUE

➔ En phase de travaux, en cas de recoupement de conduits karstiques lors de la réalisation des sondages préalables à l'implantation des pieux, les recommandations identifiées dans un **objectif n° 2** sont les suivantes :

- de même que dans l'objectif n° 1, la réalisation de diagraphies permettrait d'évaluer les caractéristiques de la cavité traversée (dimensions, débit d'écoulement). Dans le cas où il s'agit d'un écoulement jugé « majeur » au regard des investigations précédentes (éléments de synthèse présentés dans le chapitre 5 du présent rapport, complétés par les connaissances acquises grâce à l'action correspondant à l'objectif n° 1), envisager de déplacer la pile de pont concernée de quelques mètres ;
- mettre en œuvre des conditions de réalisation des pieux permettant de limiter au maximum les risques de comblement, avec par exemple la mise en place d'un tubage à l'avancement (Illustration 31), d'un chemisage ou d'une autre technique permettant d'éviter toute perte de ciment vers le karst.

➔ Dans un **objectif n° 3** de suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines, avant, pendant et après la phase de travaux, il est recommandé :

- l'équipement en piézomètres, de sondages ayant atteint des conduits karstiques actifs, avec au moins 1 piézomètre en amont du tracé et 2 piézomètres positionnés en aval. Leur implantation sera à préciser en fonction des éléments de localisation des conduits karstiques (cf. objectif n° 1). Ils devraient être positionnés entre la Loire et la digue, si possible au droit de conduits karstiques actifs, a priori à l'est du tracé (piézomètre(s) amont) et à l'ouest (piézomètres aval), à une distance indicative d'environ 100 à 500 m. Une analyse des fluctuations piézométriques au regard des fluctuations des niveaux de la Loire est nécessaire, couplée, si possible, à l'analyse des débits d'arrivée d'eau de la Loire vers l'étang de Mauger et/ou des niveaux d'eau de l'étang. Pour mémoire, il est nécessaire de définir le repère de mesure, et qu'il soit nivelé (cote altimétrique) afin de disposer d'un système de référence à maintenir de façon pérenne ;
- la mise en place au droit de ces piézomètres d'un équipement de mesure en continu du niveau piézométrique (quantitatif), et d'un ou plusieurs indicateurs de qualité (ex : turbidité, température, conductivité, pH).

7.3. RECOMMANDATIONS VISANT À LIMITER L'IMPACT D'UN MOUVEMENT DE TERRAIN SUR LE PROJET

➔ Dans un but de localisation des vides potentiels ou de zones décomprimées sous l'emprise de l'ouvrage prévu, il est recommandé dans un **objectif n° 4** (rejoint l'objectif n° 1) de :

- mener des observations de terrain préalablement aux travaux pour vérifier les caractéristiques des indices karstiques de surface identifiés à ce jour (cf. partie 4.), et la présence d'éventuels nouveaux indices karstiques (identifiés dans le cadre des travaux entrepris pour l'objectif 1) ;
- lors de la réalisation des sondages préalables à la réalisation des fondations (pieux), atteindre une profondeur allant a minima 10 m au-delà de la base des pieux, afin de vérifier l'absence de cavités[20].

[20] Recommandation formulée dans le rapport du Cerema (CETE, 2006)

➔ Selon les résultats des investigations, des actions de sécurisation sont recommandées dans un **objectif n° 5** :

- travaux de mise en sécurité préventifs à envisager au droit de zones décomprimées ou de vides (comblements, renforcements, etc.), qui ne devront pas impacter les écoulements souterrains ;
- comblement du forage agricole situé dans l'emprise du projet (n° BSS001CDWM[21]), au pied de la digue, lequel pourrait constituer un point de fragilité ;
- dispositions constructives visant à renforcer le remblai, afin de limiter l'impact d'un éventuel désordre sur l'ouvrage ;
- la conduite à tenir en cas de détection de vides karstiques lors du forage des pieux est à définir préalablement aux travaux[22].

7.4. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Les recommandations formulées dans les paragraphes précédents (parties 7.1, 7.2 et 7.3), sont synthétisées dans le Tableau 4 :

Objectif	Thème	Pourquoi ?	Secteur(s)	Solution(s) technique(s) proposée(s)	Quand ?
1) Localiser et caractériser les principaux conduits karstiques	Zone d'influence du projet, risques d'impact sur l'aquifère karstique et de mouvement de terrain	Eléments sur la zone d'influence du projet, éviter comblement principaux conduits et orienter aménagements/ meilleure connaissance du risque de mouvements de terrain	Lit mineur de la Loire et secteur en rive gauche*	Géophysique (dont microgravimétrie) + sondages (avec diagraphies)	Avant les travaux
2) Précautions à prendre en phase de travaux	Risques d'impact sur l'aquifère karstique	Eviter comblement principaux conduits	Ensemble de la zone d'étude	Diagraphies en sondages, envisager déplacement position pile pont, précautions techniques lors de la réalisation des pieux	Pendant les travaux
3) Suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines	Risques d'impact sur l'aquifère karstique	Vérifier l'absence d'impact sur la ressource / usages en aval (captages AEP, Loiret)	Secteur en rive gauche*	Mise en place d'un réseau piézométrique de suivi qualité / quantité	Avant, pendant, et après les travaux
4) localisation des vides potentiels ou des zones décomprimées	Risques de mouvement de terrain	Eviter les risques de mouvement de terrain pouvant affecter l'infrastructure	Lit mineur de la Loire et secteur en rive gauche*	Observations de terrain, sondages 10 m au-delà de la base des pieux	Avant et pendant les travaux
5) Actions de sécurisation (géotechnique)	Risques de mouvement de terrain	Eviter les risques de mouvement de terrain pouvant affecter l'infrastructure	Ensemble de la zone d'étude	Travaux préventifs de mise en sécurité au droit de vides, comblement du forage agricole, dispositions constructives à prévoir	Avant et pendant les travaux

**Secteur en rive gauche : entre le lit mineur de la Loire et la digue de Loire (incluse)*

Tableau 4 : Synthèse des recommandations.

NB : Le Conseil départemental précise que l'ensemble de ces missions incombent au concepteur/réalisateur.

[21] D'après les informations issues de la Banque de données du Sous-Sol (BSS).

[22] Avis émis par le CTPBOH (Comité technique Permanent des Barrages et des Ouvrages Hydrauliques) – séance du 29/09/2015 .

7.5. PROPOSITIONS COMPLÉMENTAIRES

En complément, plusieurs actions sont suggérées pour une meilleure compréhension globale du contexte karstique et afin de concourir à l'atteinte des objectifs identifiés précédemment.

Pour la localisation des principaux conduits karstiques (objectif n° 1), d'autres méthodes peuvent également être pertinentes :

- la méthode géophysique de résonance magnétique des protons (RMP) qui est sensible à l'eau et à la taille des pores contenant l'eau. Une série de profils parallèles est à même d'évaluer la position des principaux conduits et estimer leurs caractéristiques ;
- le suivi par méthode électromagnétique d'une injection de saumure en amont de la zone d'intérêt pour esquisser une cartographie des principaux conduits et leurs propriétés hydrodynamiques. Une injection aux pertes de l'étang de Mauger, situé en amont immédiat, serait idéale. Des mesures de débit des eaux de Loire arrivant à l'étang de Mauger seraient nécessaires pour calibrer le dosage de la saumure.

Pour la réalisation de sondages à venir, en particulier pour les forages carottés, la reconnaissance des faciès rencontrés par un géologue pourrait être accompagnée notamment par une analyse de la fraction de carbonates. Cela permettrait de préciser les caractéristiques de la partie intercalée entre alluvions et calcaires de Beauce, et qui correspond au cryptokarst, c'est-à-dire aux résidus d'altération du substratum carbonaté souvent désignés sous le terme de « marnes ».

Pour mieux distinguer les zones altérées/karstifiées, et mieux caler l'interprétation des données géophysiques en s'assurant d'atteindre le substrat calcaire sain ou peu altéré, la réalisation d'investigations géophysiques supplémentaires en tomographie électrique et sismique réfraction est proposée en visant une profondeur supérieure à 60 m. La réalisation conjointe de sondages atteignant la base des calcaires d'Étampes, avec reconnaissance de l'existence (ou pas) du niveau de la molasse du Gâtinais (marne verte) apporterait des éléments complémentaires de calage aux résultats d'investigations géophysiques. Ces forages permettraient par ailleurs de contrôler l'existence ou non de cavités, et sans doute d'apporter ainsi des éléments complémentaires en réponse aux incertitudes sur la profondeur de la karstification (cf. partie 4.2.3).

Lors de la réalisation de prochains forages, des diagraphies électriques et gamma-ray seraient pertinentes pour aider à l'interprétation géophysique (passage d'échelle entre les échantillons de forage et les mesures géophysiques de surface).

En ce qui concerne la connaissance des écoulements d'eau souterraine, la réalisation d'une carte piézométrique (mesures synchrones) à une échelle locale autour de la zone de franchissement de la Loire permettrait d'affiner les connaissances actuelles (cartes piézométriques à l'échelle du Val d'Orléans). Une piézométrie locale pourrait apporter des éléments complémentaires en vue de la localisation de drains karstiques majeurs. Elle serait idéalement réalisée en bénéficiant de la réalisation de nouveaux piézomètres (objectif n° 3), dans un rayon de l'ordre d'1 à 2 km autour de la zone d'étude, et à des périodes contrastées (hautes, moyennes eaux, basses eaux).

8. Conclusion

Dans le cadre de la mission d'appui technique du BRGM au Conseil départemental du Loiret, relative au projet de déviation de Jargeau avec franchissement de la Loire, cette 1ère phase a permis d'effectuer une synthèse des données disponibles sur les caractéristiques karstiques du sous-sol. Les résultats des investigations réalisées en phase d'avant-projet (2004, 2006 et 2014) ont été analysés, et complétés par les connaissances bibliographiques disponibles. Une attention particulière a été portée aux résultats d'investigations géophysiques, qui ont fait (en partie) l'objet d'un retraitement à partir des données brutes.

La synthèse qui en résulte a permis d'apporter une vision globale des connaissances sur le contexte géologique et hydrogéologique local, les phénomènes de karstification, les risques de mouvement de terrain liés (fontis), et sur les écoulements souterrains. La zone d'étude se situe dans une zone de pertes des eaux de la Loire vers le système aquifère karstique, soit un secteur où la nappe souterraine est particulièrement vulnérable du point de vue quantitatif et qualitatif, et où les risques de mouvement de terrain sont élevés du fait d'une karstification intense et évolutive (proximité de la Loire).

Dans le cas où un mouvement de terrain se produirait en phase chantier, cela remettrait non seulement en cause la sécurité des biens et des personnes se trouvant à proximité, mais cela imposerait aussi vraisemblablement un arrêt de chantier. S'il survient en phase d'exploitation sur un ouvrage non conçu pour supporter un tel désordre, un tel mouvement remettrait en cause la stabilité de l'ouvrage et donc la sécurité des biens et des personnes y circulant à ce moment. Les coûts financiers en jeu, bien qu'étant difficiles à estimer, seraient bien sûr considérables. Le potentiel « effet cascade » d'une inondation de la Loire, pouvant amplifier ce type de phénomène, aurait un impact d'autant plus fort.

Afin de répondre aux incertitudes sur les caractéristiques du sous-sol au droit du projet de franchissement de la Loire, et afin d'anticiper les impacts potentiels liés au contexte karstique, des recommandations ont été formulées afin de limiter les risques d'impact du projet sur les écoulements d'eau souterraine d'une part, et sur les risques de mouvement de terrain vis-à-vis de l'ouvrage d'autre part.

9. Bibliographie

Camus H. (2010) - Diagnostic du risque karstique - Le cryptokarst de la LGV Méditerranée. Grottes & karsts de France. Karstologia Mémoires, 19, 59-60.

CETE (2004a) - RD 921-Déviation de Jargeau (45). Projet de franchissement de la Loire - Étude géologique particulière en amont et aval de Jargeau. Rapport technique CETE Blois, Janvier 2004.

CETE (2004b) - Conseil général du Loiret (45). Projet de franchissement de la Loire à Jargeau - Tranche ferme - phase 1 : reconnaissance géotechnique et géophysique des fuseaux ouest et Grand ouest. Rapport technique CETE Blois, Novembre 2004.

CETE (2006) - Conseil général du Loiret (45). Projet de franchissement de la Loire à Jargeau - Tranche ferme - phase 2 : reconnaissance géotechnique au droit du tracé. Rapport de synthèse CETE Blois, Septembre 2006.

Charles N., Graviou P. (2016) - Curiosités géologiques du Loiret. Livret-guide.

Chatelain S., Chery JL., Livrozet E. (1981) - Le système aquifère karstique du Val d'Orléans. III. Apport d'un double traçage dans l'étude du système Loire-Loiret. Comm. 26ème Coll. Nat. Limnologie, Orléans, juin 1981.

Chery J.L. (1983) - Étude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (La Loire) : Le système des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans. Thèse Université d'Orléans.

Desprez N. (1966) - Inventaire et étude hydrogéologique du Val d'Orléans. Rapport BRGM/DSGR.67.A21.

Desprez N. (1967) - Étude hydrogéologique du calcaire de Beauce : inventaire du bassin versant de la Loire en amont d'Orléans. Rapport BRGM DSGR 67 A86.

Donsimoni M., Berthier H., Martin J-C., Nachbaur A. (2008) - Détermination de la présence de karsts sous les levées domaniales de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels. Rapport final BRGM/RP-55711-FR : 179 p.

Gigout M. (1972) - L'altération périglaciaire 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. p.54-59.

Gilli E. (2011) - Karstologie - Karsts, grottes et sources. Éditions Dunod (Sciences Sup).

Gombert *et al* (2015) - Rôle des effondrements karstiques sur les desordres survenus sur les digues de Loire dans le Val D'Orléans (France). In Bull. Eng. Geol. Environ. (2015) 74. p. 125-140.

Hydrogéotechnique (2006) - Département du Loiret, Conseil Général. Déviation de Jargeau-Saint-Denis-de-l'Hôtel, Lot 4. Rapport d'étude géotechnique, Missions G0 & G12.

Hydrogéotechnique (2014) - Conseil Général du Loiret. Déviation RD921 - Franchissement de la digue Darvoy (45). Rapport d'étude géotechnique, Missions G5.

Jozja N. *et al*. (2010) - Apport des traçages à la connaissance du système karstique du Val d'Orléans. Historique et nouvelles avancées. Géologues 167 : 70-74.

Lepiller M. (2006) - Val d'Orléans. In : Aquifères et eaux souterraines en France, tome 1, J.-C. Roux (éd.), BRGM Éditions, 200-214.

Lorrain 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. p. 14-53.

Martin J.C., Noyer M.L. avec la collaboration **Amraoui N. et Pathirana N.** (2003) - Caractérisation du risque d'inondation par remontée de nappe sur le Val d'Orléans. Rapport final. BRGM/RP-52121-FR.

MEDE (2012) - Guide méthodologique - Plan de prévention des risques naturels - Cavités souterraines abandonnées. 82 p.

Noury G, Perrin J., Gourdier S., Raucoules D. (2017) - Retour d'expérience sur les mouvements de terrains liés à des cavités survenus dans le Loiret suite à la crise météo du printemps 2016. Rapport BRGM/RP-66462-FR.

Perrin Je., Noury G., Cartannaz C., Gutierrez T., Van Laere A. (2014) - ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 2 : étude de sites. Rapport BRGM/RP-63771-FR.

Perrin Je., Joigneaux E., Château C., Jozja N., 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.

Perrin Je., Gutierrez A., Vanoudheusden E., Salquèbre D., Joigneaux E., Château C., N. Jozja, Défarge C., Binet S. (2016) - Projet i-Fontis : vers une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis dans le Val d'Orléans. Rapport final. BRGM/RP- 65474-FR, 82 p.

Samyn K., Mathieu F., Nachbaur A., Closset L. (2012) - Détermination de la présence de karsts sous des levés domaniales du bassin de la Loire - Tranche 3 : investigations géophysiques à grand rendement. BRGM/RP-60906-FR. 83 p., 2 tabl., 6 planches.

Trautman F. (1974) - Les Formations du groupe Beauce (Aquitanien du Bassin de Paris) caractéristiques, utilisation. Rapport BRGM/74-SGN-358-BSS.

Vuidart I. (2012) - GEODERIS Guide pratique pour l'homogénéisation des études détaillées des aléas miniers – Volet effondrement localise. Rapport N2012/010DE - 12NAT2210, 64 p.

Waltham T, Bell FG, Culshaw MG (2005) - Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer [u.a.], Berlin, oCLC: 249167969.

Annexe 1

Données utilisées pour la synthèse géophysique, avec leurs caractéristiques

Tomograhies de résistivité électrique	Axe	Rapport EDG et autres	Rapport CETE	Longueur/ espacement (m)	Configuration de quadripôle	Profondeur d'investigation (m)
001	Grand ouest	EDG04.04.082/45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	315/5	WS	<15-35
002	Grand ouest	EDG04.04.082/45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	155/5	WS	<30
004	Grand ouest	EDG04.04.082/45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	155/5	WS	<25
003	ouest	EDG04.04.082/45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	315/5	WS	<20
005	ouest	EDG04.04.082/45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	110/5	WS	<30
006	Grand ouest	EDG04.04.082/45 de juil-sept 2005	2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 sept.2006	315/5	WS	<30
007	Grand ouest	EDG04.04.082/45 de juil-sept 2005	2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 sept. 2006	155/5	WS	<30
PE1	Grand ouest	EDG04.04.082/45 de mars 2006	2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 sept. 2006	475/5	WS	<35
PE2	Grand ouest	EDG04.04.082/45 de mars 2006	2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 sept. 2006	635/5	WS	<35
PE1	Grand ouest (digue)	IMG 14D031 N		126/2	PP	35 ?
PE2	Grand ouest (digue)	IMG 14D031 N		126/2	PP	35 ?
DA1	Digue amont projet	BRGM/RP-64298-FR		315 / 5	WS +DD	40
DA2	Digue amont projet	BRGM/RP-64298-FR		315 / 5	WS + DD	40
DA3	Digue amont projet	BRGM/RP-64298-FR		315 / 5	WS + DD	40

Liste des données de tomographie électrique utilisées pour la synthèse géophysique, avec leurs caractéristiques. Les configurations de quadripôle sont indiquées par les sigles DD = dipôle-dipôle, WS = Wenner-Schlumberger, PP = Pôle-pôle.

Base sismique réfraction	Axe	Rapport EDG	Rapport CETE	Longueur (m)	Intertrace / nb tirs	Profondeur d'investigation (m) / vitesse réfracteur (m/s)
000	Ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321 11/2004	160	10/4	15 / 2 400
010	Ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321 11/2004	120	10/5	10-15 / 2 200-2 400
020	Ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321 11/2004	120	10/5	15-20 / 2 200-2 400
030	Ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	120	10/5	5-20 / 2 000-2 400
040	Grand ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321 11/2004	170	10/5	0-20 / 1 800-2 400
050	Grand ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321 11/2004	120	10/4	5-10 / 2 200-2 400
060	Grand ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321 11/2004	120	10/5	5-15 / 2 400
070	Grand ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321 11/2004	120	10/5	10-15 / 2 200-2 400
080	Ouest	EDG04.04.082/ 45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321 11/2004	120	10/5	10-15 / 2 400
090	Grand ouest	EDG04.04.082/ 45 de juil-sept 2005	2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 sept. 2006	120		15
100	Grand ouest	EDG04.04.082/ 45 de juil-sept 2005	2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 sept. 2006	120		10

Liste des données de sismique réfraction utilisées pour la synthèse géophysique, avec leurs caractéristiques. Les profondeurs d'investigation correspondent à la profondeur du réfracteur principal étudié.

Cylindre électrique	Axe	Rapport EDG	Rapport CETE	Longueur/ espacement (m)	Forage	
Faisceau Est - Rive Droite	Ouest	EDG04.04.082 /45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	13.75/ ?	SD + PZ21	
Faisceau Est - Rive Gauche	Ouest	EDG04.04.082 /45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	8.75/ ?	SD + PZ31	
Faisceau Ouest - Rive Droite	Grand ouest	EDG04.04.082 /45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	11.25/ ?	SD + PZ11	
Faisceau Ouest - Rive Gauche	Grand ouest	EDG04.04.082 /45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	7.5/ ?	SD + PZ41	
?	Grand ouest	EDG04.04.082 /45 de juil-sept 2005	2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 Sept 2006		SC201	

Liste des données de cylindre électrique utilisées pour la synthèse géophysique, avec leurs caractéristiques.

Log sismique	Axe	Rapport EDG	Rapport CETE	Longueur/ espacement (m)	Forage	Profondeur d'investigation (m) / Profondeur (m) / vitesse (m/s) du dernier terrain
Faisceau Ouest - Rive Droite	Ouest	EDG04.04.082 /45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	16.0/ 1.0	SD + PZ21	18 / 4.0 / 2 980
Faisceau Ouest - Rive Gauche	Ouest	EDG04.04.082 /45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	12.0/ 1.0	SD + PZ31	18.75 / 10.0 / 3 560
Faisceau Ouest - Rive Droite	Grand ouest	EDG04.04.082 /45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	13.0/ 1.0	SD + PZ11	17.5 / 10.0 / 2 217
Faisceau Ouest - Rive Gauche	Grand ouest	EDG04.04.082 /45 de sept-oct 2004	2004/LRB/D.GEO/ED.321	11.0/ ?	SD + PZ41	17.0 / 10.0 / 3 940
?	Grand ouest	EDG04.04.082 /45 de juil-sept 2005	2006/LRB/D.GEO/ED/YB.243 Sept 2006		SC201	

Liste des données de profils sismique vertical (downhole) utilisées pour la synthèse géophysique, avec leurs caractéristiques.

Annexe 2

Liste des sondages réalisés dans la zone d'étude

Année	Num	Type	Cote alti. sol (m NGF)	Prof	Cote alti. Fond sondage	Localisation	Coord_X_L93	Coord_Y_L93
2004	PZ11	Piézomètre	97,8	18,6	79,2	rive droite Loire	631689,66	6752941,57
2004	PZ12	Piézomètre	97,8	18,6	79,2	rive droite Loire	631666,05	6752941,8
2004	PZ41	Piézomètre	101,2	18,2	83	rive gauche Loire	631634,26	6752540,7
2004	SC11	Carotté	97,8	20	77,8	rive droite Loire	631663,46	6752941,64
2004	SC12	Carotté	97,8	20	77,8	rive droite Loire	631771,35	6752910,69
2004	SC41	Carotté	100,3	20,3	80	rive gauche Loire	631588,61	6752555,34
2004	SC42	Carotté	101,6	20,5	81,1	rive gauche Loire	631679,49	6752537,84
2004	SD11	Destructif	97,9	20,6	77,3	rive droite Loire	631597,05	6752908,1
2004	SD13	Destructif	97,9	20,6	77,3	rive droite Loire	631684,34	6752909,83
2004	SD14	Destructif	97,8	20,6	77,2	rive droite Loire	631746,82	6752921,51
2004	SD15	Destructif	97,8	20,6	77,2	rive droite Loire	631767,57	6752910,77
2004	SD16	Destructif	97,8	20,4	77,4	rive droite Loire	631810,76	6752906,59
2004	SD17	Destructif	99	20,5	78,5	rive droite Loire	631836,36	6752939,79
2004	SD18	Destructif	97,8	20,5	77,3	rive droite Loire	631860,99	6752907,59
2004	SD41	Destructif	100,4	21,7	78,7	rive gauche Loire	631524,28	6752533,35
2004	SD42	Destructif	100,7	21,1	79,6	rive gauche Loire	631554,2	6752526,2
2004	SD43	Destructif	100,3	21,6	78,7	rive gauche Loire	631689,66	6752941,57
2004	SD44	Destructif	101,2	21	80,2	rive gauche Loire	631666,05	6752941,8
2004	SD45	Destructif	99,7	22,5	77,2	rive gauche Loire	631634,26	6752540,7
2004	SD46	Destructif	101,6	22,7	78,9	rive gauche Loire	631663,46	6752941,64
2004	SD47	Destructif	101,3	20,8	80,5	rive gauche Loire	631771,35	6752910,69
2004	SD48	Destructif	100,3	20,7	79,6	rive gauche Loire	631588,61	6752555,34
2004	SP11	Pressiométrique	97,6	20,4	77,2	rive droite Loire	631679,49	6752537,84
2004	SP12	Pressiométrique	98,1	20,5	77,6	rive droite Loire	631597,05	6752908,1
2004	SP13	Pressiométrique	96	20,4	75,6	rive droite Loire	631684,34	6752909,83
2004	SP41	Pressiométrique	101,1	20,5	80,6	rive gauche Loire	631746,82	6752921,51
2004	SP42	Pressiométrique	99,7	20,7	79	rive gauche Loire	631767,57	6752910,77
2006	SD204	Destructif	97,4	21,4	76	lit mineur Loire	631681,1	6752688
2006	SC201	Carotté	99,9	20	79,9	rive droite Loire	631778,3	6752957
2006	SC204	Carotté	97,2	20	77,2	lit mineur Loire	631703,6	6752749,7
2006	SC205	Carotté	97	19,9	77,1	lit mineur Loire	631662,7	6752636,1
2006	SC206	Carotté	101,2	25	76,2	rive gauche Loire	631629	6752545,5
2006	SC207	Carotté	102,8	25	77,8	rive gauche Loire	631576,8	6752402
2006	SC209	Carotté	102,3	15	87,3	rive gauche Loire	631453,3	6752099,3
2006	SP201	Pressiométrique	99,9	20,2	79,7	rive droite Loire	631775,4	6752964

Année	Num	Type	Cote_alti_sol (m NGF)	Prof	Cote_alti Fond sondage	Localisation	Coord_X_L93	Coord_Y_L93
2006	SP202	Pressiométrique	97,9	20,1	77,8	rive droite Loire	631758,9	6752909,1
2006	SP203	Pressiométrique	96	20,5	75,5	lit mineur Loire	631742,5	6752859,3
2006	SP204	Pressiométrique	97	20,6	76,4	lit mineur Loire	631703,7	6752754,7
2006	SP205	Pressiométrique	96,9	21,8	75,1	lit mineur Loire	631659,7	6752640,2
2006	SP206	Pressiométrique	101,2	34,6	66,6	rive gauche Loire	631627,9	6752543,5
2006	SP207	Pressiométrique	102,8	32,7	70,1	rive gauche Loire	631576,8	6752402
2006	SP208	Pressiométrique	102,4	20,3	82,1	rive gauche Loire	631518,5	6752240,6
2006	SP209	Pressiométrique	102,3	15,8	86,5	rive gauche Loire	631456,4	6752104,2
2006	SP210	Pressiométrique	100,8	16	84,8	rive gauche Loire	631349,5	6751992,2
2006	SPd206	Pénétrométrique	100,7	11,8	88,9	rive gauche Loire	631632	6752554,5
2006	SPd207	Pénétrométrique	102,8	10,3	92,5	rive gauche Loire	631578,8	6752405
2006	SPd208-1	Pénétrométrique	102,4	10,7	91,7	rive gauche Loire	631520,5	6752245,6
2006	SPd208-2	Pénétrométrique	102,3	11,4	90,9	rive gauche Loire	631506,2	6752206,8
2006	SPd209	Pénétrométrique	102,2	12,7	89,5	rive gauche Loire	631453,3	6752099,3
2006	SPd210	Pénétrométrique	100,8	14,9	85,9	rive gauche Loire	631384,7	6752020,9
2006	SPd211	Pénétrométrique	101	14,8	86,2	rive gauche Loire	631290,2	6751950,7
2014	PS1	Pénétrométrique	105,04	13,6	91,44	rive gauche, digue Loire	631433,238	6752003,997
2014	PS2	Pénétrométrique	105,03	16,6	88,43	rive gauche, digue Loire	631416,1	6751997,2
2014	SC1	Carotté	105,03	20	85,03	rive gauche, digue Loire	631423,4172	6752000,097
2014	SC2	Carotté	104,04	20	84,04	rive gauche, digue Loire	631442,0303	6752007,111
2014	SP1	Pressiométrique	105,03	20,04	84,99	rive gauche, digue Loire	631405,29	6751993,2
2014	SP2	Pressiométrique	105,08	20,11	84,97	rive gauche, digue Loire	631460,7074	6752014,545
2014	SD1bis	Destructif	*nc*	20	*nc*	rive gauche, pied digue Loire	631406,28	6751963
2014	SD2bis	Destructif	*nc*	18	*nc*	rive gauche, pied digue Loire	631420,15	6751965,63
2014	SC1bis	Carotté	*nc*	20	*nc*	rive gauche, pied digue Loire	631406,28	6751963
2014	SC2bis	Carotté	*nc*	20	*nc*	rive gauche, pied digue Loire	631420,15	6751965,63

Annexe 3

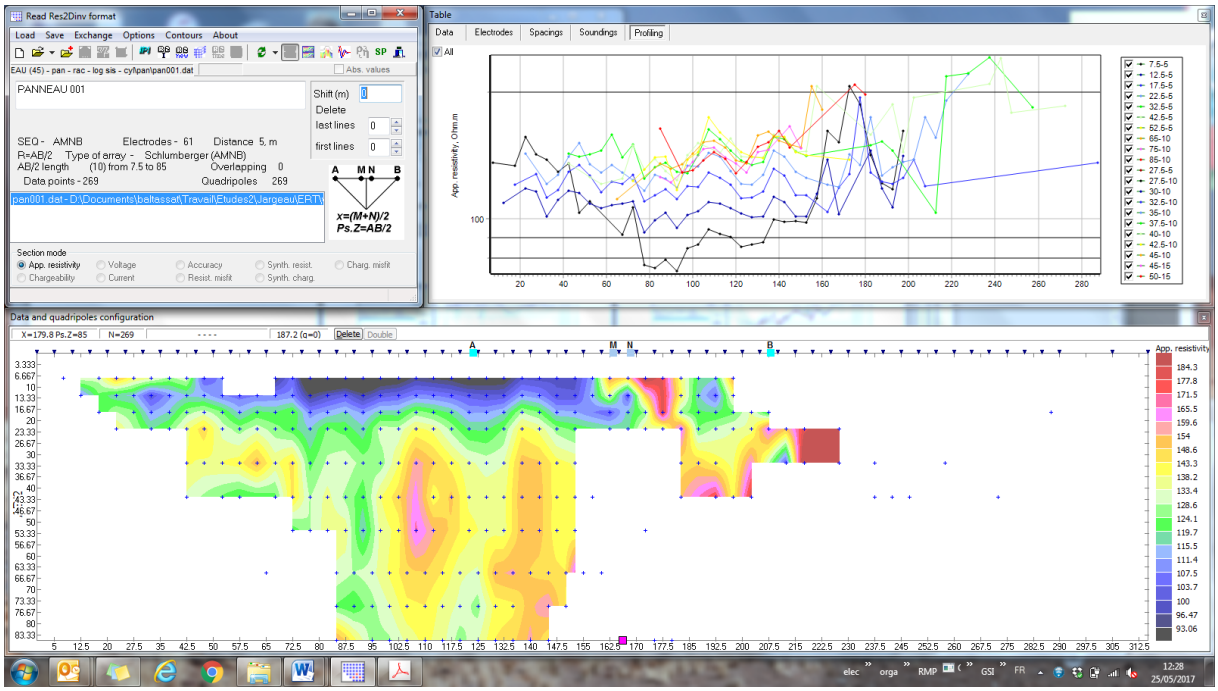
Coupe géologique au droit de la zone d'étude

Planche hors-texte

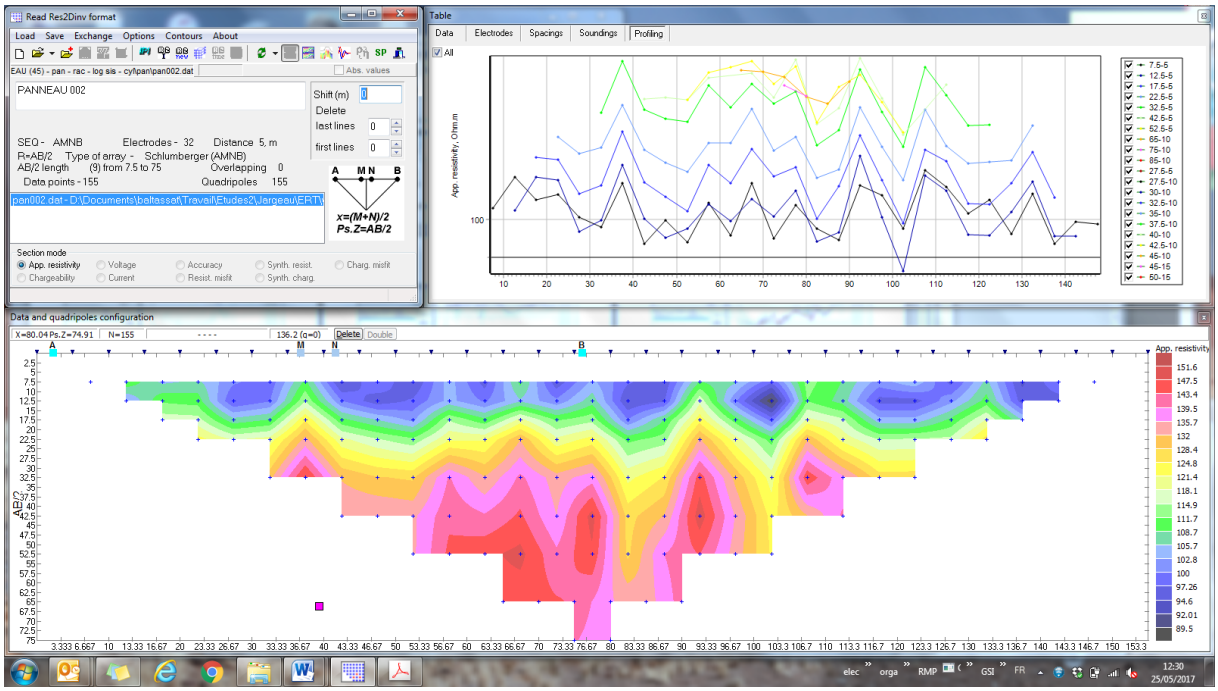
Annexe 4

Pseudo-section de résistivité apparente des tomographies électriques

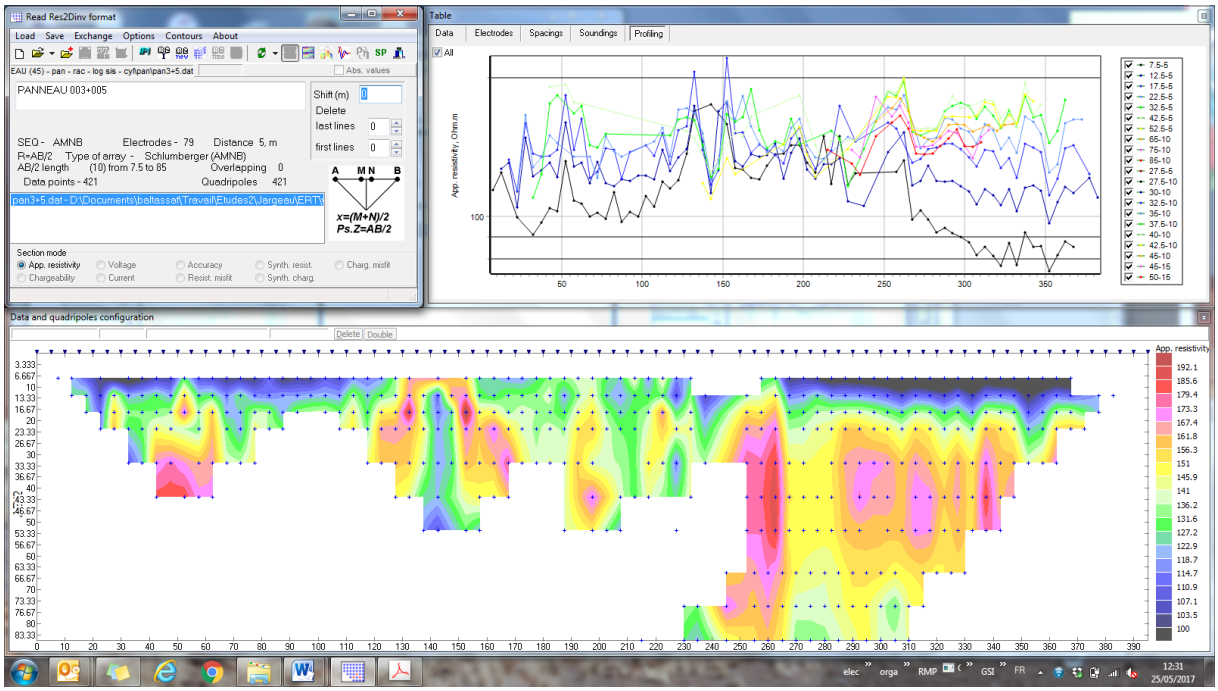
001 EDG



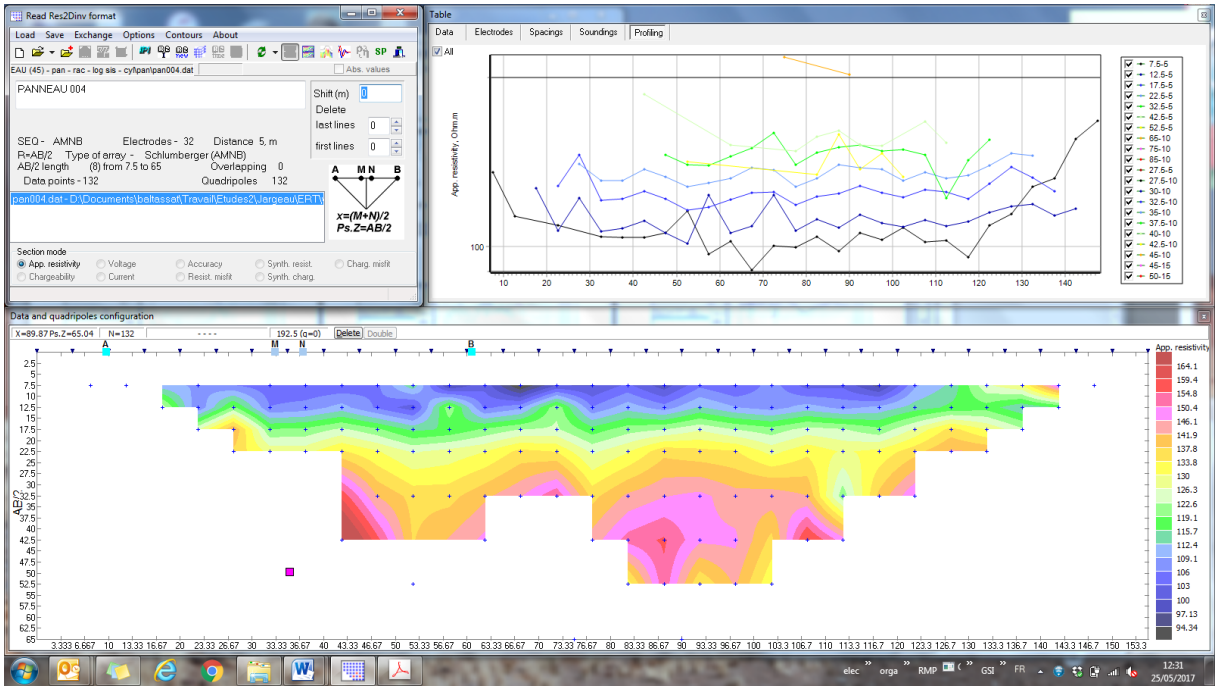
002 EDG



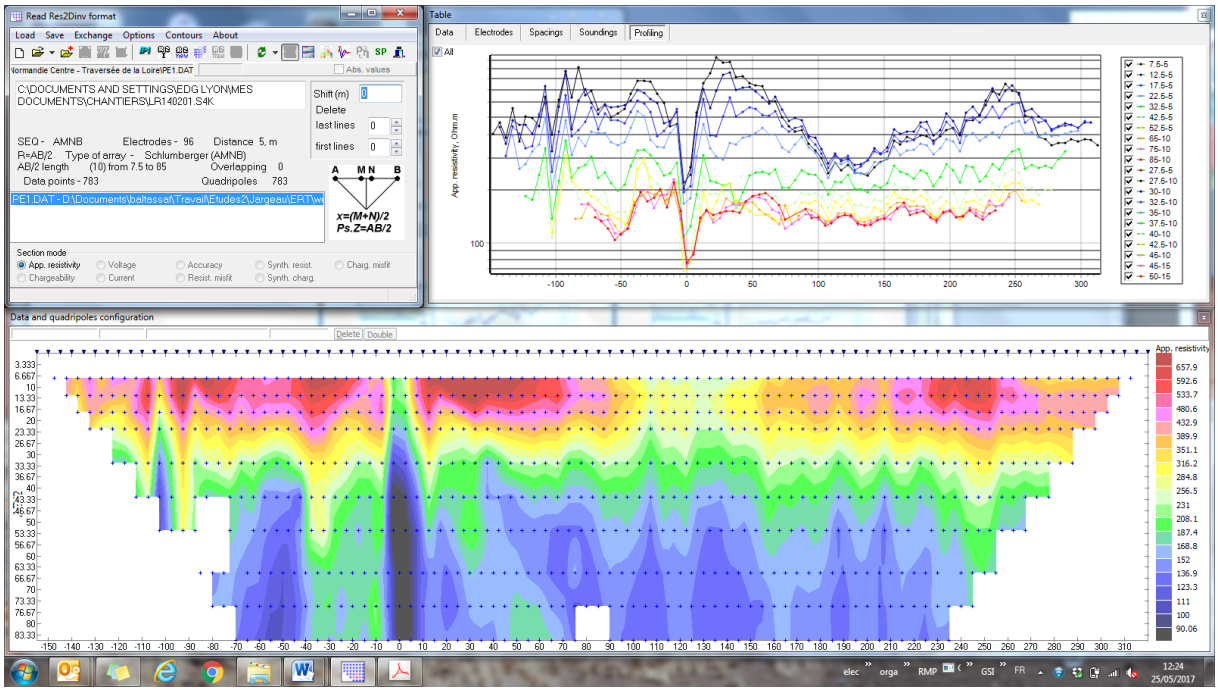
003 + 005 EDG



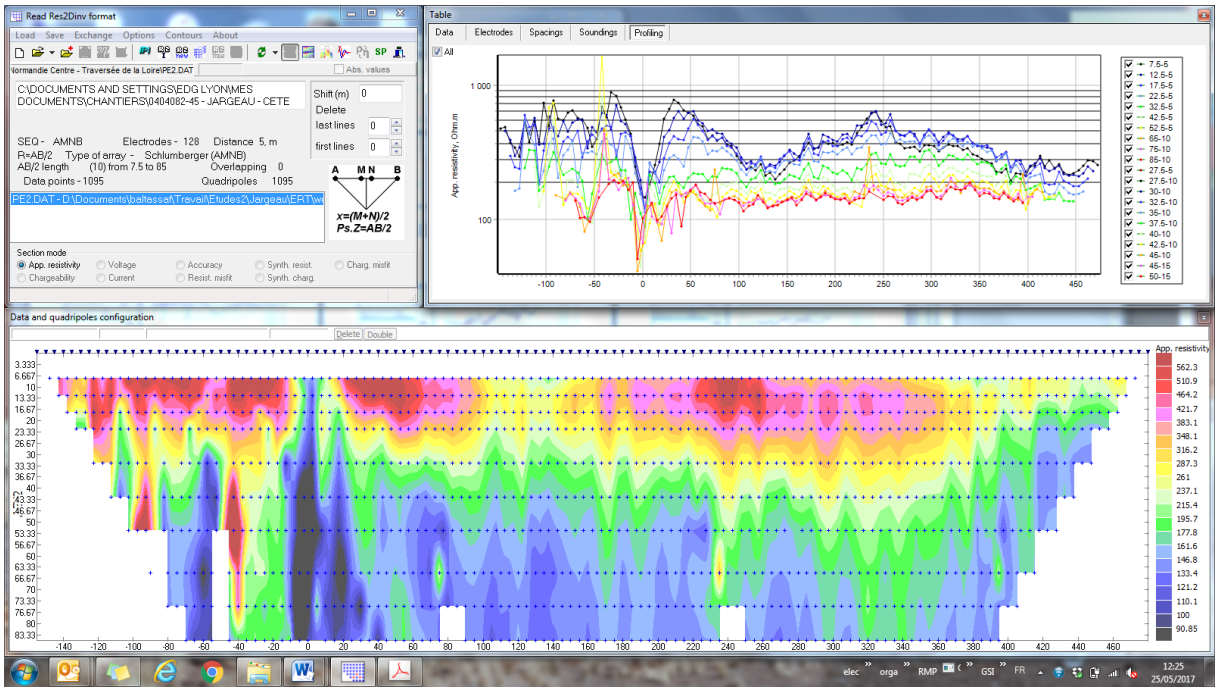
004 EDG



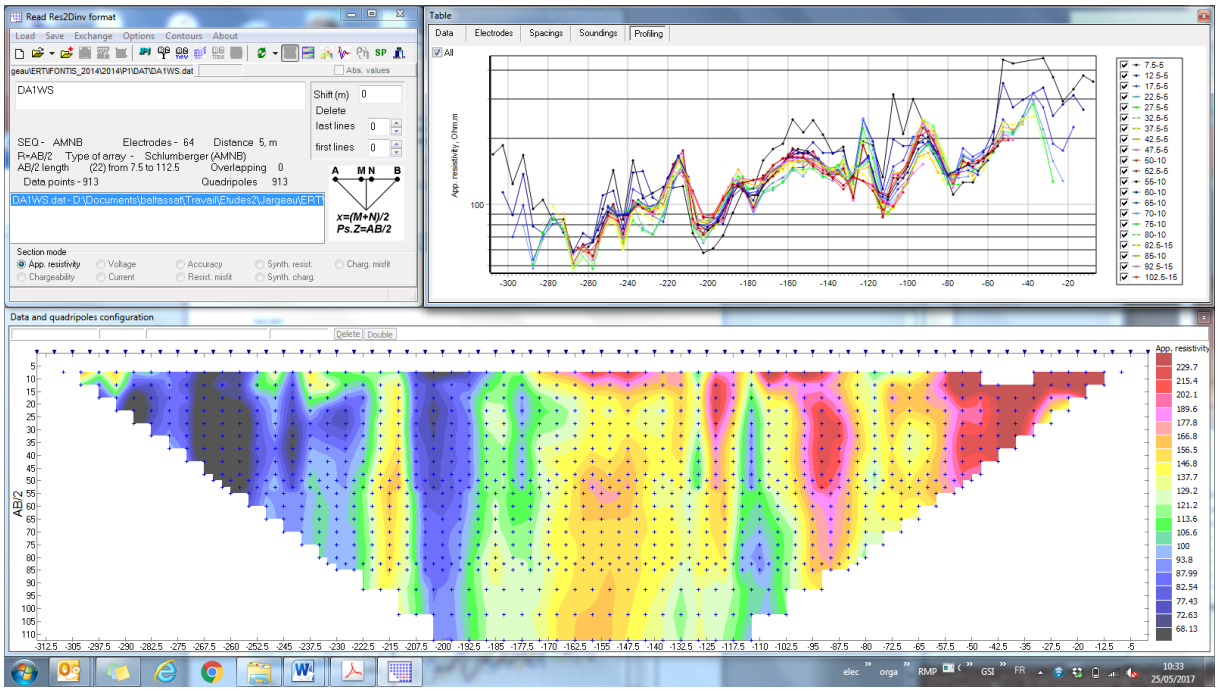
PE1 EDG



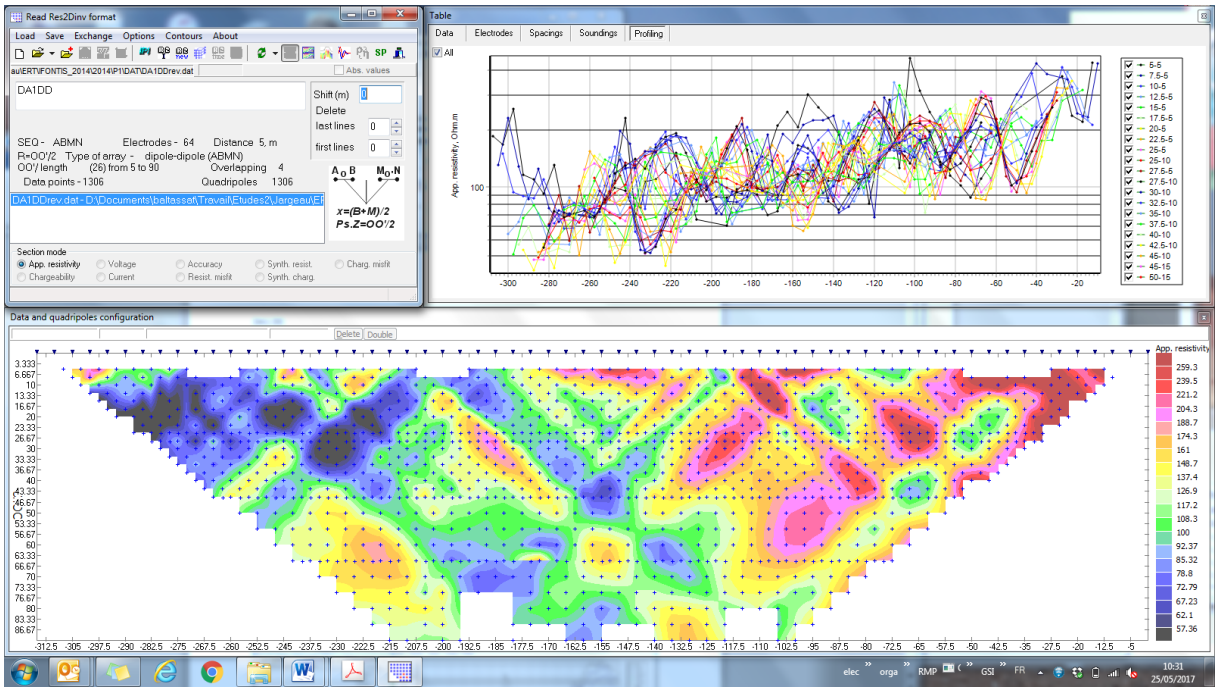
PE2 EDG



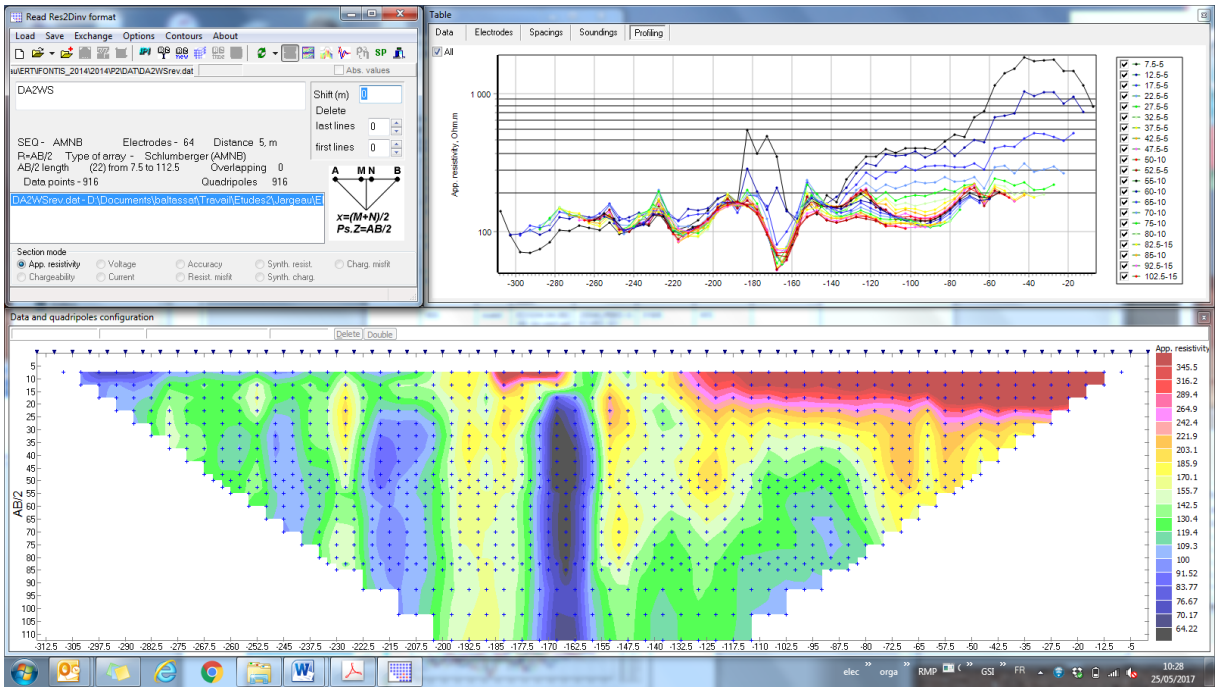
DA1WS


Read Res2Dinv format
DA1WS
SEQ - AMNB Electrodes - 64 Distance 5, m
R=AB/2 Type of array - Schlumberger (AMNB)
AB/2 length (22) from 7.5 to 112.5 Overlapping 0
Data points - 913 Quadripoles 913
x=(M+N)/2
Ps.Z=AB/2
Table
Data
Electrodes
Spacings
Soundings
Profiling
App. resistivity, Ohm.m
Data and quadripoles configuration
AB/2

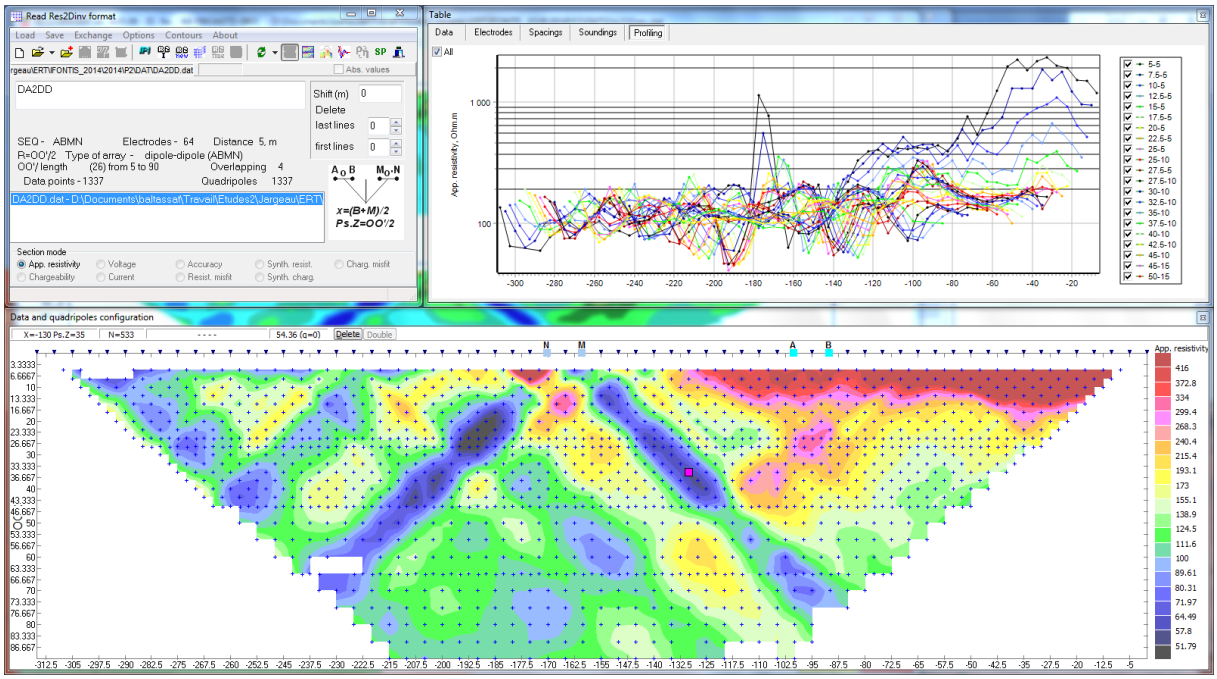
DA1 DD


Read Res2Dinv format
DA1DD
SEQ - ABMN Electrodes - 64 Distance 5, m
R=OO'/2 Type of array - dipole-dipole (ABMN)
OO'/ length (26) from 5 to 90 Overlapping 4
Data points - 1306 Quadripoles 1306
x=(B+M)/2
Ps.Z=OO'/2
Table
Data
Electrodes
Spacings
Soundings
Profiling
App. resistivity, Ohm.m
Data and quadripoles configuration
n

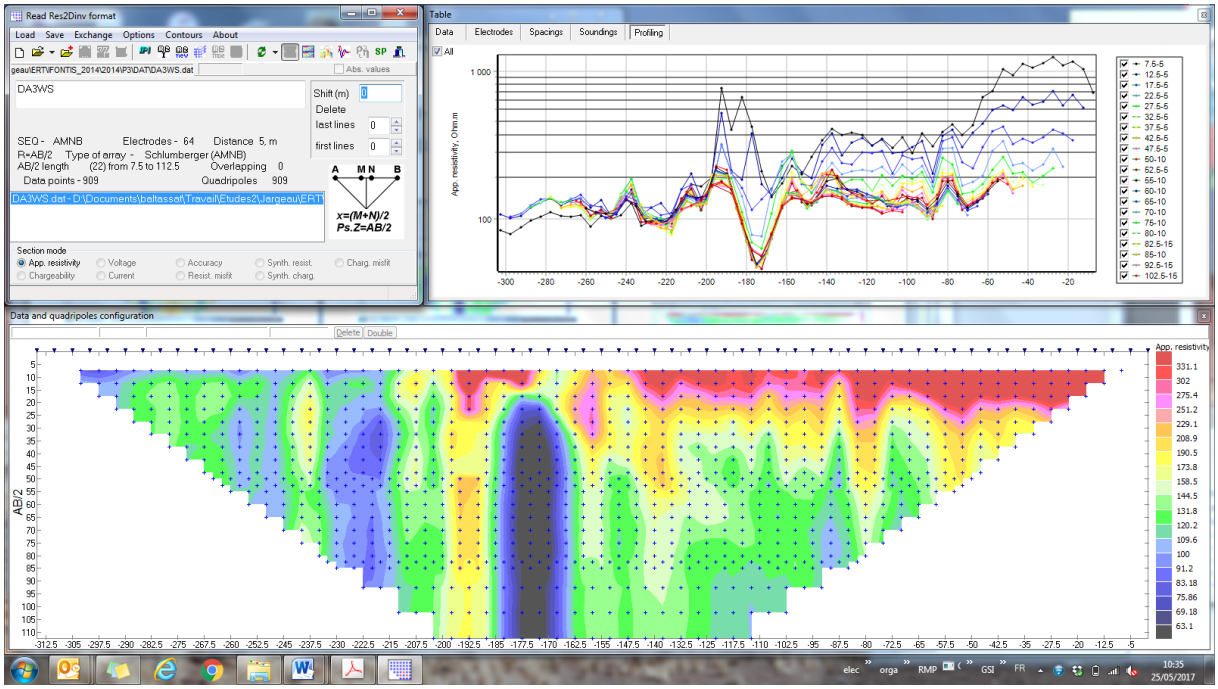
DA2 WS


Read Res2Dinv format
DA2WS
SEQ - AMNB Electrodes - 64 Distance 5, m
R=AB/2 Type of array - Schlumberger (AMNB)
AB/2 length (22) from 7.5 to 112.5 Overlapping 0
Data points - 916 Quadripoles 916
x=(M+N)/2
Ps.Z=AB/2
Table
Data
Electrodes
Spacings
Soundings
Profiling
App. resistivity, Ohm.m
Data and quadripoles configuration
AB/2
App. resistivity

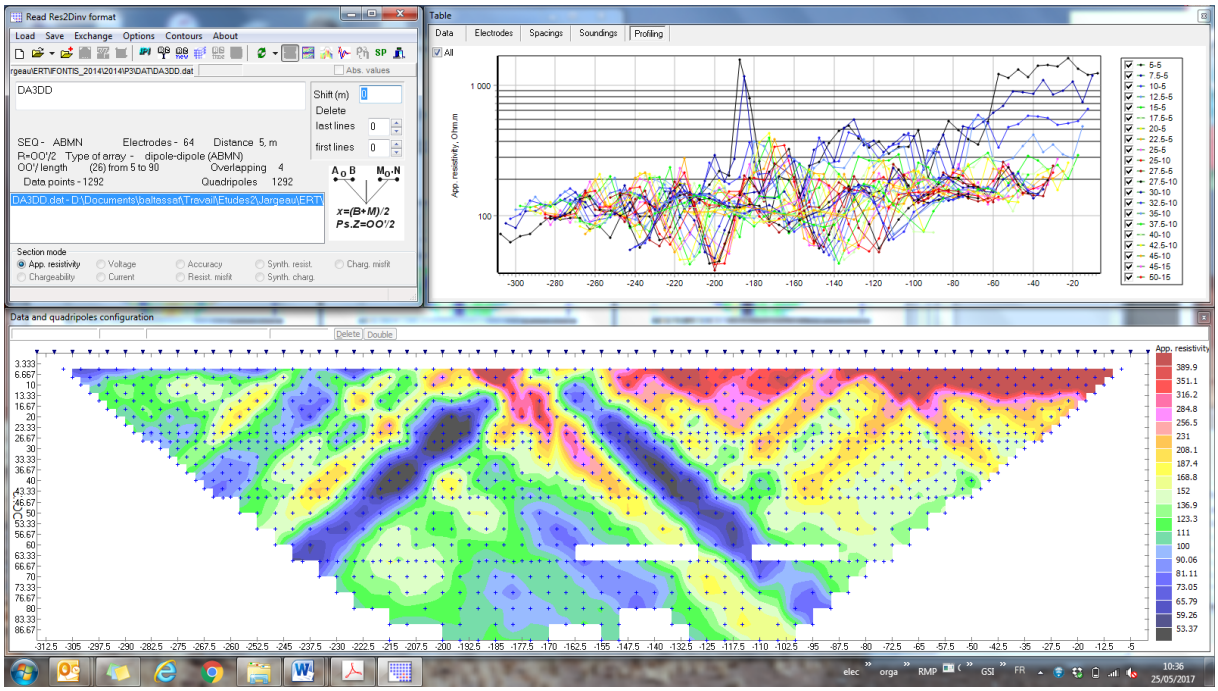
DA2 DD


Read Res2Dinv format
DA2DD
SEQ - ABMN Electrodes - 64 Distance 5, m
R=OO'/2 Type of array - dipole-dipole (ABMN)
OO'/ length (26) from 5 to 90 Overlapping 4
Data points - 1337 Quadripoles 1337
x=(B+M)/2
Ps.Z=OO'/2
Table
Data
Electrodes
Spacings
Soundings
Profiling
App. resistivity, Ohm.m
Data and quadripoles configuration
App. resistivity

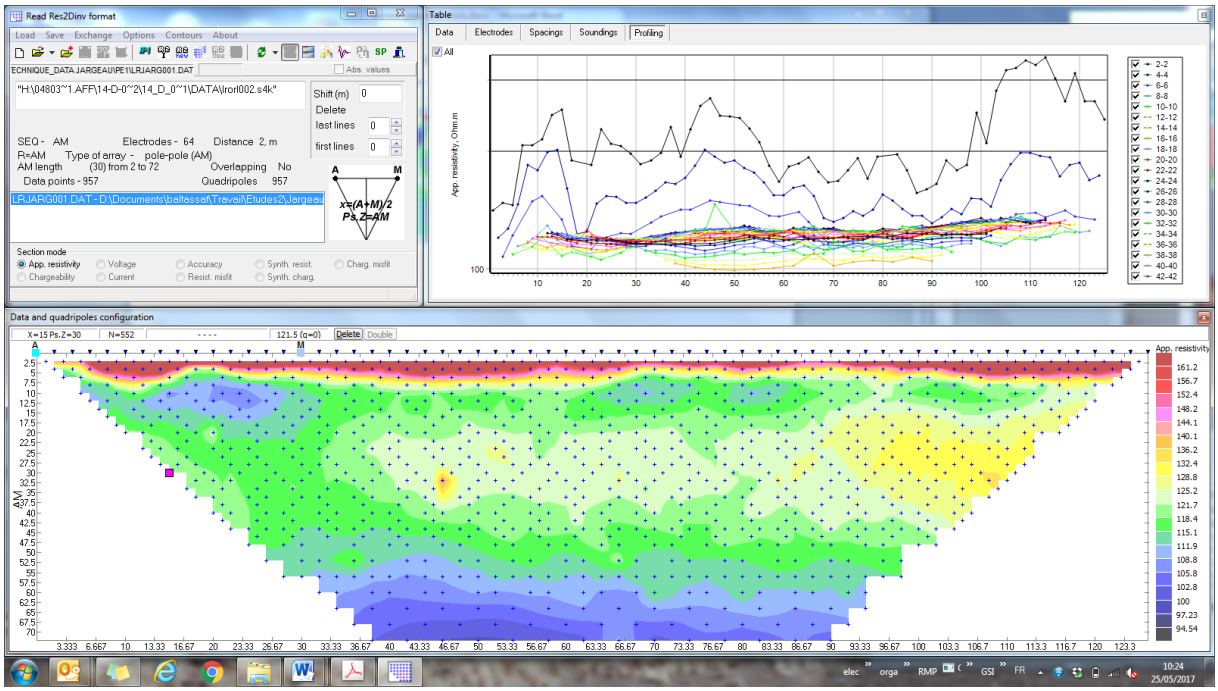
DA3 WS


Read Res2Dinv format
Load Save Exchange Options Contours About
DA3WS
SEQ - AMNB Electrodes - 64 Distance 5. m
R=AB/2 Type of array - Schlumberger (AMNB)
AB/2 length (22) from 7.5 to 112.5 Overlapping 0
Data points - 909 Quadripoles 909
DA3WS.dat - D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Jargeau\ERT
x=(M+N)/2
Ps.Z=AB/2
Table
Data Electrodes Spacings Soundings Profiling
App. resistivity, Ohm.m
Data and quadripoles configuration
AB/2

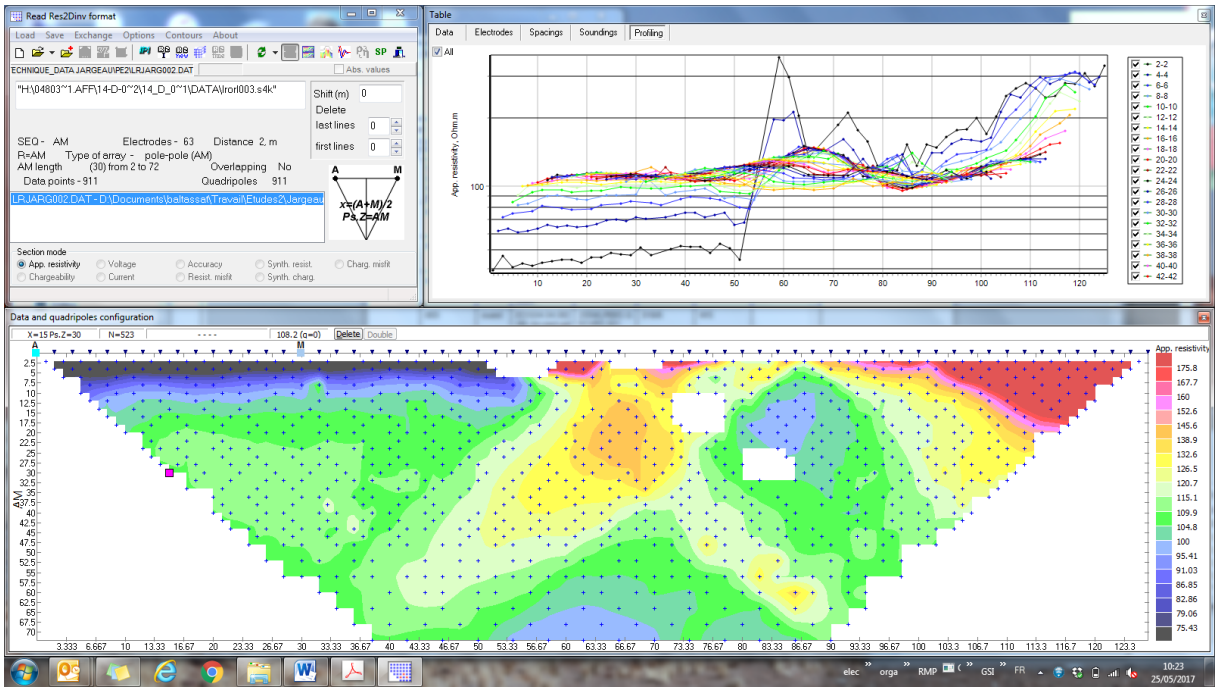
DA3 DD


Read Res2Dinv format
Load Save Exchange Options Contours About
DA3DD
SEQ - ABMN Electrodes - 64 Distance 5. m
R=OO'/2 Type of array - dipole-dipole (ABMN)
OO'/ length (26) from 5 to 90 Overlapping 4
Data points - 1292 Quadripoles 1292
DA3DD.dat - D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Jargeau\ERT
x=(B+M)/2
Ps.Z=OO'/2
Table
Data Electrodes Spacings Soundings Profiling
App. resistivity, Ohm.m
Data and quadripoles configuration
C1

PE1 Hydrogéotechnique



PE2 Hydrogéotechnique



Annexe 5

Illustrations photographiques

Photographies des fontis-pertes observés dans l'ancienne gravière (étang de Mauger), en période d'étiage prononcé (cliché BRGM, 01/09/2015).

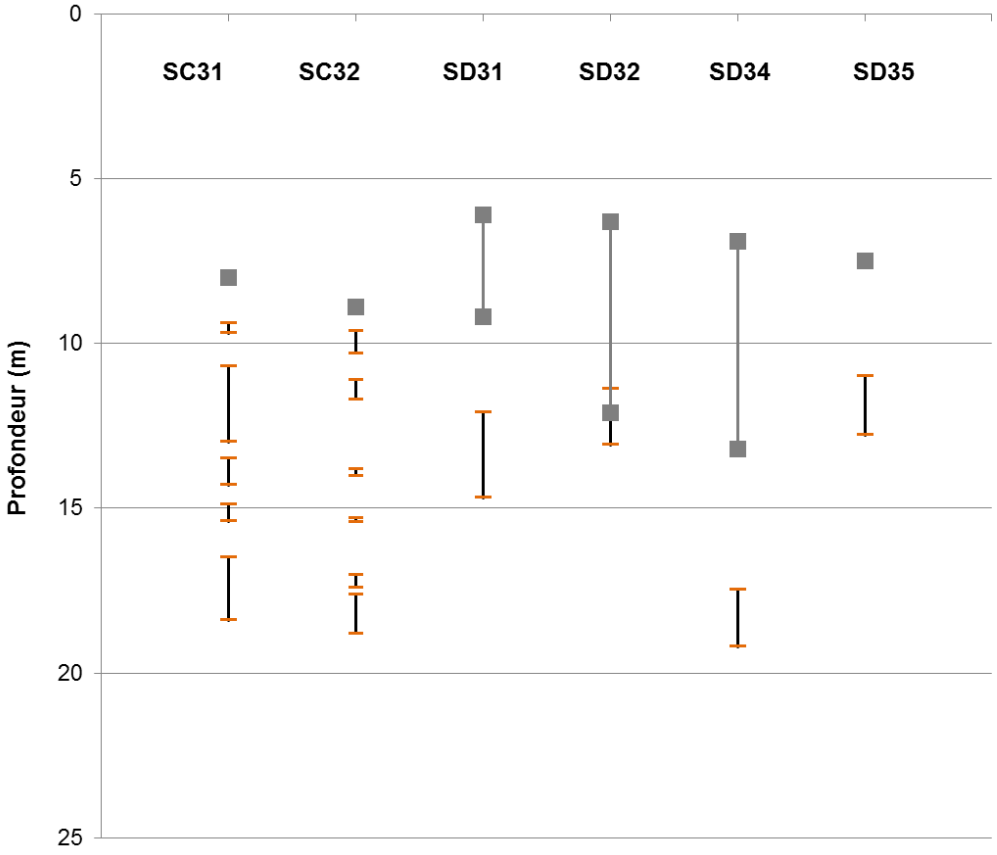
Photographies à l'ancienne gravière - Étang de Mauger (cliché BRGM, 04/05/17).

Photos de fontis observés en rive sud de Loire à deux emplacements où des fontis avaient déjà été observés en 2004 (CETE, 2004) ; la photo de droite montre un fontis situé à environ 150 m à l'ouest du tracé de franchissement (clichés BRGM, 9 Avril 2017).

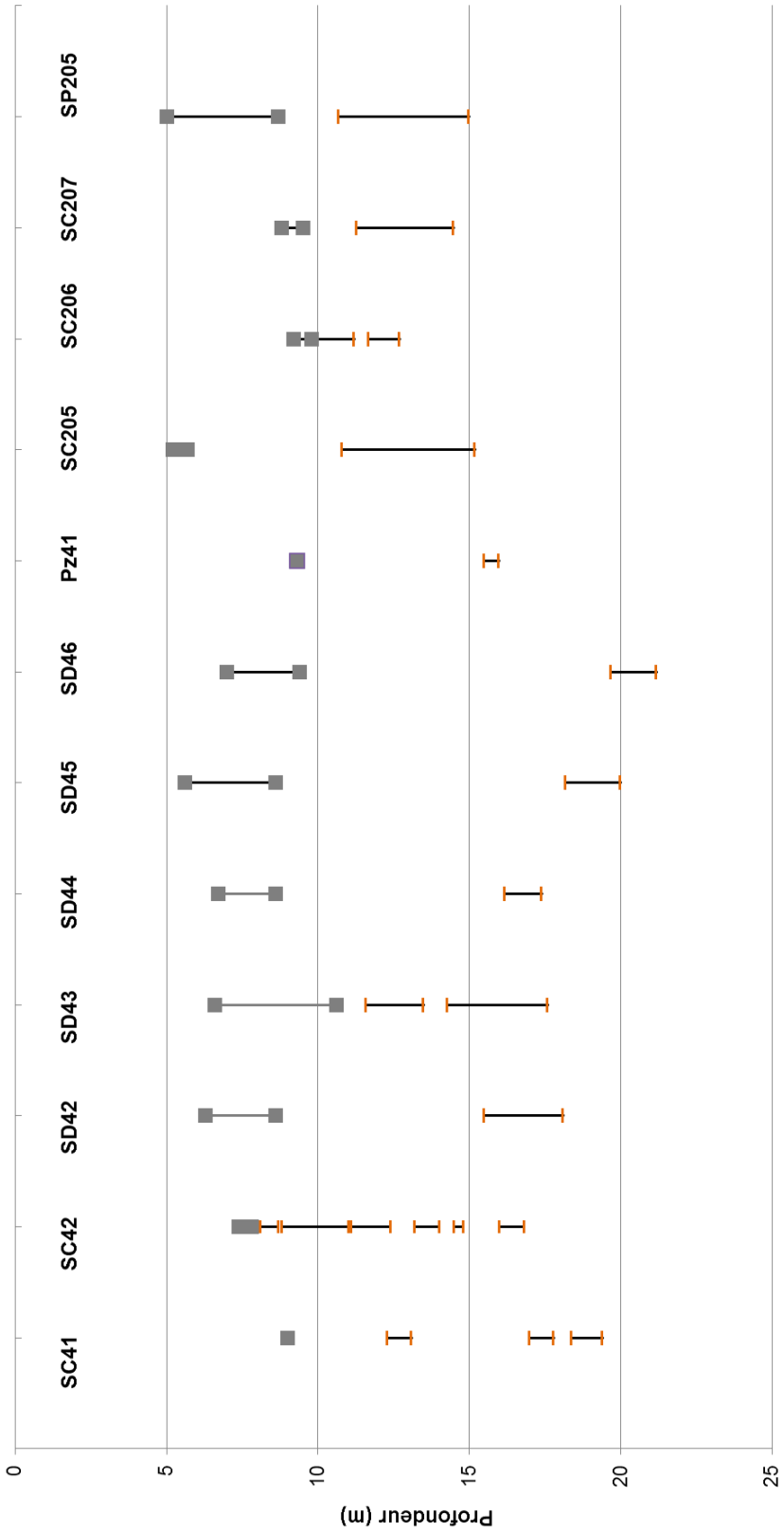
Photos d'un des 2 fontis apparus a priori *en avril 2017 et situés au sud de la Loire, à environ 300 m à l'ouest du projet (cliché BRGM, 08/06/17). Les dimensions de ce fontis, le plus important des deux, sont un diamètre d'environ 3 m et une profondeur d'environ 1,5 m.*

Annexe 6

Données issues des sondages - Profondeur du toit du calcaire et profondeur des vides traversés



Répartition des vides dans les sondages rive sud du fuseau ouest ; les carrés gris représentent respectivement le toit du calcaire et la base du calcaire altéré ; les traits horizontaux oranges matérialisent les parois des vides rencontrés.



Répartition des vides dans les sondages rive sud du fuseau Grand-Ouest ; les carrés gris représentent respectivement le toit du calcaire et la base du calcaire altéré ; les traits horizontaux oranges matérialisent les parois des vides rencontrés.

Annexe 7

Rapport du traçage hydrogéologique réalisé en 2009, à partir des pertes de la Loire et de l'étang de Mauger (EDREE)

VALORISATION DES DONNÉES DES TRAÇAGES DE 2009 ENTRE LA PERTE DE L'ÉTANG DE SAINT-ANDRÉ ET LA LOIRE À JARGEAU

ET LES SOURCES DU BOUILLON ET DE L'ABÎME À ORLÉANS

N° R/H17.39

CONSEIL DÉPARTEMENTAL DU LOIRET
1, Hôtel du département
15, rue Eugène Vignat
45010 Orléans cedex

Juin 2017

Table des matières

INTRODUCTION.....2

PROTOCOLE DE RÉALISATION DES TRAÇAGES.....3

I) TRACEURS UTILISÉS.....3
II) QUANTITÉ, LIEU, DATE ET CONDITIONS D'INJECTION.....3
III) DISPOSITIF ET DURÉE DE SURVEILLANCE.....4
IV) MODE D'ANALYSE POUR LA RECHERCHE DES TRACEURS DANS LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS.....4
V) RESTITUTION DE L'URANINE.....5
V) RESTITUTION DU JAUNE DUASYN.....7

CONCLUSION.....9

ANNEXES

ANNEXE 1 : CARTE DE SITUATION : LOCALISATION DES POINTS D'INJECTION SUR LA COMMUNE DE JARGEAU
ANNEXE 2 : CARTE DE SITUATION : LOCALISATION DES POINTS DE SUIVI DANS LE VAL D'ORLÉANS
ANNEXE 3 : PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE
ANNEXE 4 : TABLEAU DES DOSAGES EN URANINE À LA SOURCE DU BOUILLON
ANNEXE 5 : TABLEAU DES DOSAGES EN URANINE À LA SOURCE DE L'ABÎME
ANNEXE 6 : TABLEAU DES DOSAGES EN JAUNE DUASYN À LA SOURCE DU BOUILLON
ANNEXE 7 : TABLEAU DES DOSAGES EN JAUNE DUASYN À LA SOURCE DE L'ABÎME

Introduction

Objet de l'étude

Améliorer la connaissance de l'alimentation du karst du Val d'Orléans et donc des sources du Loiret par les pertes de Loire situées à l'aval de Jargeau par la réalisation de traçages artificiels.

Le présent rapport synthétise les informations collectées lors de cette étude, qui s'est déroulée entre le 15 et le 21 mars 2009.

Protocole de réalisation des traçages

I) Traceurs utilisés

L'uranine ou sel sodique de la fluorescéine et le jaune duasyn ont été choisis comme traceurs fluorescents lors de cette étude.

Les longueurs d'ondes d'excitation et d'émission des traceurs choisis sont les suivantes :

	Longueur d'onde d'excitation	Longueur d'onde d'émission	Seuil de détection
Uranine	486 nm	518 nm	0,020 µg/l
Jaune duasyn	449 nm	474 nm	0,1 µg/l

II) Quantité, lieu, date et conditions d'injection

Les quantités de traceurs utilisées sont :

	Quantité	Date d'injection	Lieu d'injection (cf. annexe 1)
Uranine	1 kg	14 mars 2009 à 10h05	Perte de l'Étang des Boires de Saint-André (Jargeau)
Jaune duasyn	1,325 kg	14 mars 2009 à 11h00	Perte de la Loire à proximité du terrain de camping de Jargeau

Les coordonnées des points d'injection sont (calcul à partir du site Géoportail.fr) :

Perte de l'Étang des Boires de Saint-André	X	Y
Lambert II étendu :	581 350 m	2 318 900 m
Lambert 93 :	631 760 m	6 752 485 m
GPS (WGS84):	Latitude : 47° 52' 8,91" N	Longitude : 2° 5' 13,61" E

Altitude NGF : 97,7 m

Perte de la Loire	X	Y
Lambert II étendu :	583 430 m	2 319 000 m
Lambert 93 :	633 840 m	6 752 565 m
GPS (WGS84):	Latitude : 47° 52' 12,56'' N	Longitude : 2° 6' 54,22" E

Altitude NGF : 99,00 m

L'uranine a été déversée sous la forme de 3 l de solution à 333 g/l, directement dans la zone d'absorption (cf. annexes 1 et 3).

Le jaune duasyn étant commercialisé uniquement sous forme liquide (concentration d'environ 330 g/l), il a été déversé 4 l (soit 1,325 kg de matière active environ) dans une perte de la Loire (cf. annexes 1 et 3).

III) Dispositif et durée de surveillance

Les points de surveillance étaient les suivants (cf. annexe 2) :

- La source du Bouillon,
- Source de l'Abîme,

Dont les coordonnées sont (calcul à partir du site Géoportail.fr) :

La source du Bouillon	X	Y
Lambert II étendu :	570 125 m	2 316 845 m
Lambert 93 :	620 530 m	6 750 525 m
GPS (WGS84):	Latitude : 47° 51' 1,11" N	Longitude : 1° 56' 14,65" E

Altitude NGF : 91,1 m

La source de l'Abîme	X	Y
Lambert II étendu :	569 950 m	2 316 990 m
Lambert 93 :	620 555 m	6 750 670 m
GPS (WGS84):	Latitude : 47° 51' 5,68" N	Longitude : 1° 56' 1,17" E

Altitude NGF : 91,1 m

Le prélèvement des échantillons d'eau a été réalisé avec des préleveurs automatiques de marque ISCO.

La cadence des prélèvements a été la suivante pour la surveillance de la source du Bouillon et de l'Abîme :

- Un échantillon toutes les 2 heures entre le 15/03/09 à 19h30 et le 21/03/09 à 17h30

Soit au total 72 échantillons prélevés par point suivi, pendant une durée de suivi de 7 jours.

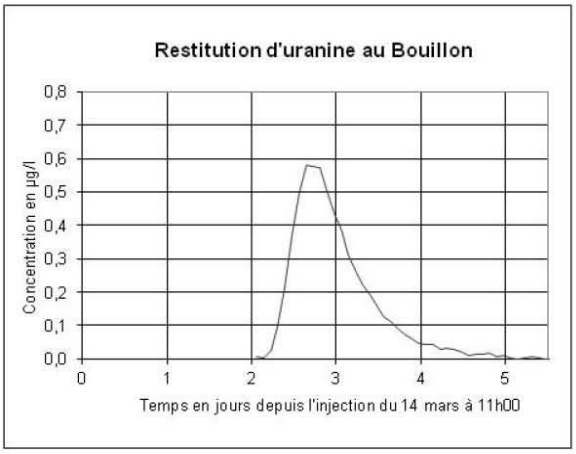
IV) Mode d'analyse pour la recherche des traceurs dans les échantillons prélevés

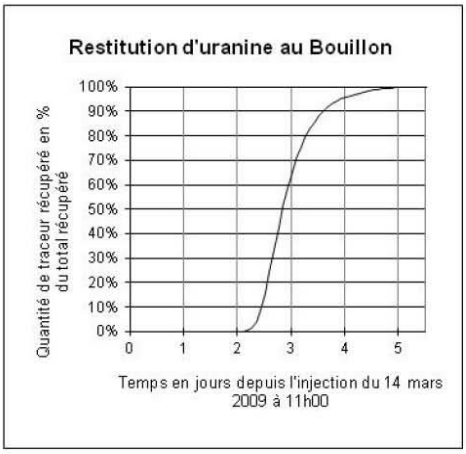
La recherche et le dosage des traceurs ont été effectués au laboratoire de EDREE à l'aide d'un spectrofluorimètre SAFAS FLX Xenius XC. Cet appareil est capable de détecter dans de l'eau pure des traces d'uranine à des valeurs de l'ordre de 20 ng/l, et des traces de jaune duasyn à des valeurs de l'ordre de 0,1 µg/l.
Dans notre cas, la fluorescence naturelle (bruit de fond) s'est avérée très faible dans les longueurs d'ondes d'émission des traceurs utilisés et non gênante.

V) Restitution de l'uranine

1) Source du Bouillon

Les vitesses moyennes d'écoulement calculées entre le point d'injection et la source du bouillon sont proches de 200 m/h (235 m/h pour les vitesses les plus rapides).



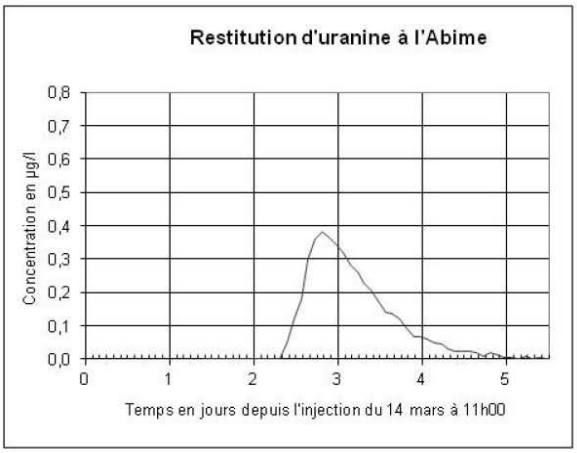


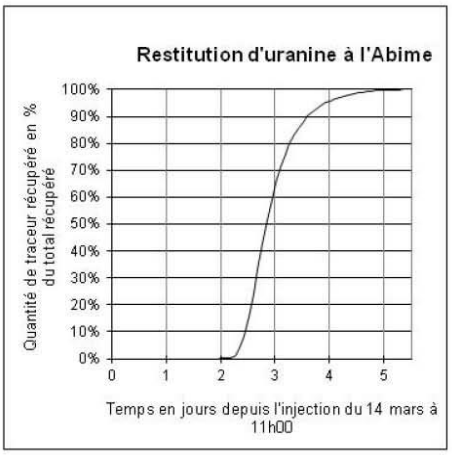
Distance apparente	11 410 mètres
Masse injectée	1 kg
Masse restituée	35,75 g *
Taux de restitution	3,58 %
Temps d'apparition du traceur	2,02 jours (48,5 heures)
Temps modal du traceur	2,64 jours (63,4 heures)
Temps 50 % du traceur restitué	2,85 jours (68,4 heures)
Temps 90 % du traceur restitué	3,60 jours (86,4 heures)
Temps 99 % du traceur restitué	4,65 jours (111,6 heures)
Temps fin de restitution	5,39 jours (129,4 heures)
Temps moyen de séjour	3,70 jours (88,9 heures)
Vitesse d'apparition apparente	235 m/h
Vitesse modale apparente	180 m/h
Concentration maximale	0,58 µg/l

*Calcul avec un débit moyen de la source du Bouillon estimé à 800 l/s

2) Source de l'Abîme

Les vitesses moyennes d'écoulement calculées entre le point d'injection et la source de l'Abîme sont proches de 200 m/h (201 m/h pour les vitesses les plus rapides).





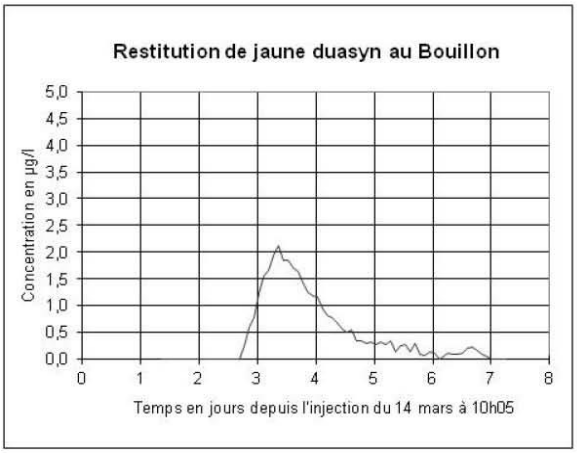
Distance apparente	11 560 mètres
Masse injectée	1 kg
Masse restituée	26,31 g *
Taux de restitution	2,63 %
Temps d'apparition du traceur	2,39 jours (57,4 heures)
Temps modal du traceur	2,81 jours (67,4 heures)
Temps 50 % du traceur restitué	3,02 jours (72,4 heures)
Temps 90 % du traceur restitué	3,85 jours (92,4 heures)
Temps 99 % du traceur restitué	4,81 jours (115,4 heures)
Temps fin de restitution	5,39 jours (129,4 heures)
Temps moyen de séjour	3,89 jours (93,4 heures)
Vitesse d'apparition apparente	201 m/h
Vitesse modale apparente	172 m/h
Concentration maximale	0,38 µg/l

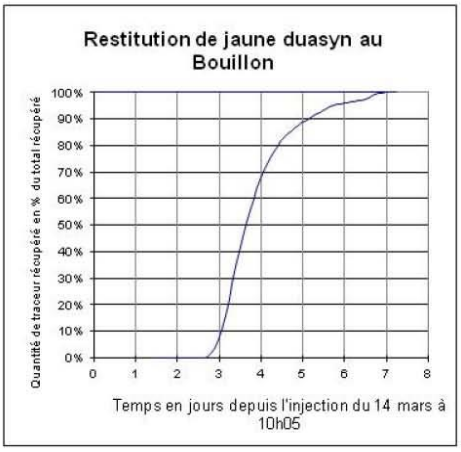
*Calcul avec un débit moyen de la source du Bouillon estimé à 800 l/s

V) Restitution du jaune duasyn

1) Source du Bouillon

Les vitesses moyennes d'écoulement calculées entre le point d'injection et la source du bouillon sont proches de 200 m/h (203 m/h pour les vitesses les plus rapides).



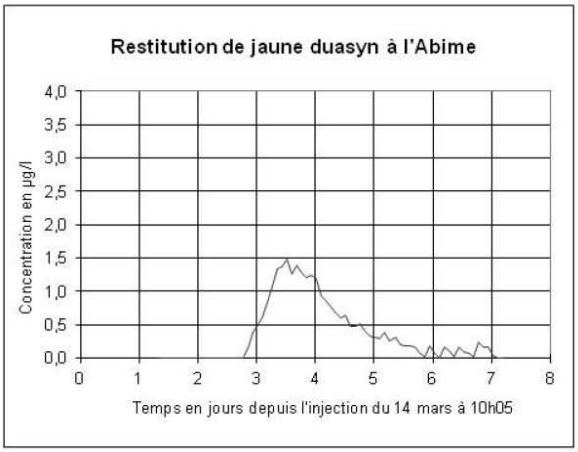


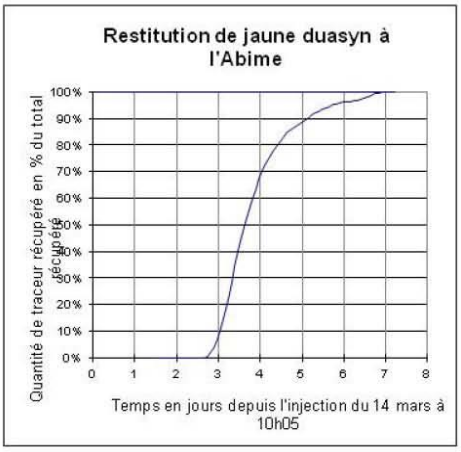
Distance apparente	13 480 mètres
Masse injectée	1,325 kg
Masse restituée	185 g *
Taux de restitution	14 %
Temps d'apparition du traceur	2,77 jours (66,5 heures)
Temps modal du traceur	3,35 jours (80,5 heures)
Temps 50 % du traceur restitué	3,65 jours (87,5 heures)
Temps 90 % du traceur restitué	5,1 jours (122,5 heures)
Temps 99 % du traceur restitué	6,69 jours (160,5 heures)
Temps fin de restitution	6,94 jours (166,5 heures)
Temps moyen de séjour	4,86 jours (116,5 heures)
Vitesse d'apparition apparente	203 m/h
Vitesse modale apparente	167 m/h
Concentration maximale	2,12 µg/l

*Calcul avec un débit moyen de la source du Bouillon estimé à 800 l/s

2) Source de l'Abîme

Les vitesses moyennes d'écoulement calculées entre le point d'injection et la source de l'Abîme sont proches de 200 m/h (199 m/h pour les vitesses les plus rapides).





Distance apparente	13 630 mètres
Masse injectée	1,325 kg
Masse restituée	149 g *
Taux de restitution	11,2 %
Temps d'apparition du traceur	2,9 jours (68,5 heures)
Temps modal du traceur	3,5 jours (84,5 heures)
Temps 50 % du traceur restitué	3,8 jours (92,4 heures)
Temps 90 % du traceur restitué	5,3 jours (127 heures)
Temps 99 % du traceur restitué	6,8 jours (163 ,5 heures)
Temps fin de restitution	7,1jours (170,5 heures)
Temps moyen de séjour	5 jours (119,5 heures)
Vitesse d'apparition apparente	199 m/h
Vitesse modale apparente	161 m/h
Concentration maximale	1,478 µg/l

*Calcul avec un débit moyen de la source de l'Abîme estimé à 800 l/s

Conclusion

Les deux traçages réalisés ont donné lieu à restitution à la fois à la source du Bouillon et à la Source de l'Abîme.

Les courbes de restitution obtenues sur les deux sources sont assez proches pour les deux traceurs injectés, avec des vitesses maximales de circulation apparente proches de 200 m/h. Les concentrations maximales sont un peu plus élevées pour les deux traceurs à la source du Bouillon. Cela est cohérent avec les observations spéléologiques qui montrent des réseaux karstiques légèrement différenciés à l'amont de chaque source, bien que les réseaux communiquent entre eux.
Mais surtout le taux de restitution est sensiblement plus important pour le jaune duasyn injecté en Loire (environ 25 % récupéré) par rapport à l'uranine injecté dans l'ancienne gravière (environ 6 % récupéré).
Cela est probablement dû à une dilution plus importante de l'uranine. Le réseau karstique immédiatement à l'aval de la perte de la gravière semble de grande ampleur avec une capacité d'absorption très importante (lors du traçage, le débit d'eau estimé entrant dans la gravière était très supérieur à qu'alimentée à 1 m^3/s).

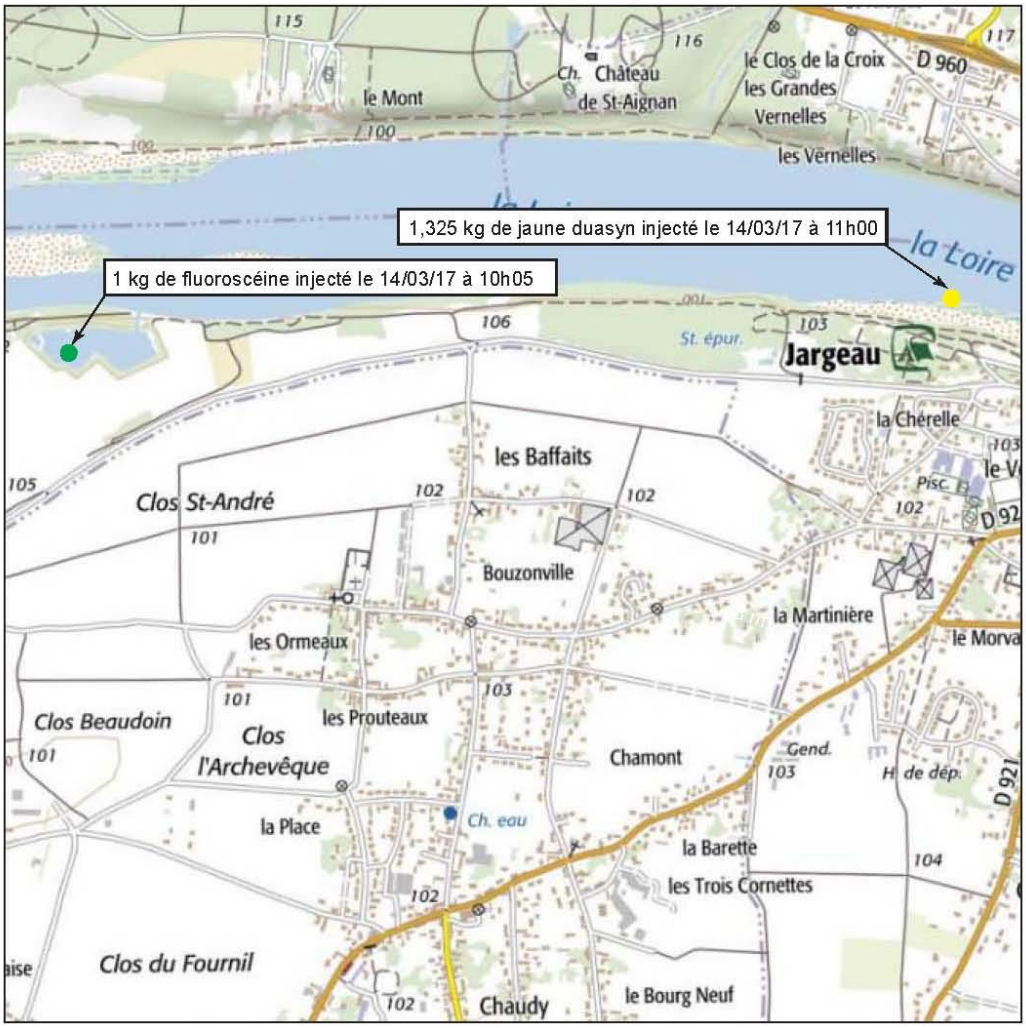
La perte de l'étang Saint-André contribue de manière importante à l'alimentation du karst du Val d'Orléans et donc au débit des sources du Bouillon et de l'Abîme..

Olivet, le 18 juin 2017

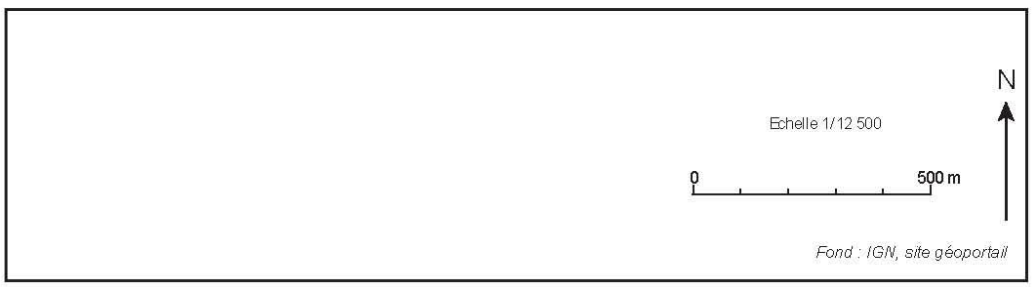
B. LECLERC
Hydrogéologue

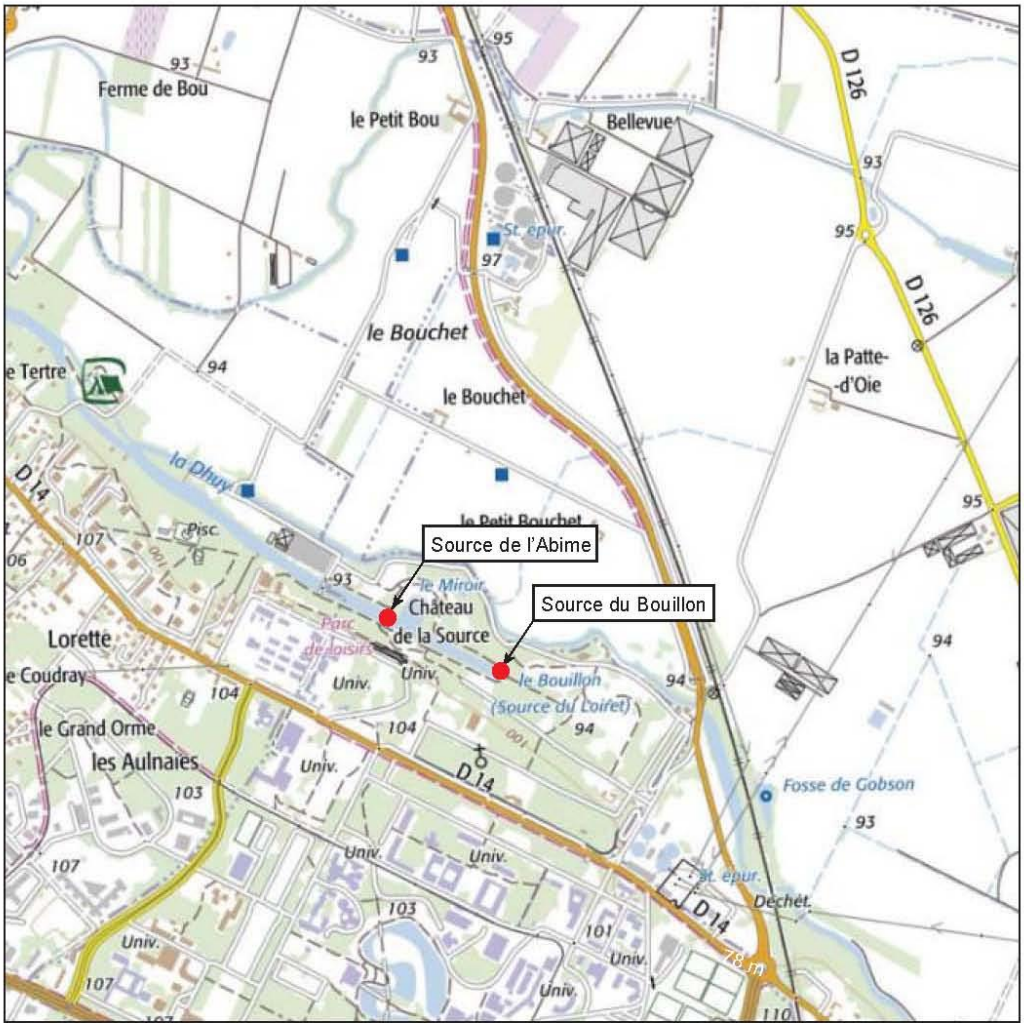
Parc des Aulnaies - 84, rue du Beuvron – 45160 Olivet
Tél : 02 38 64 02 30 - Fax : 02 34 59 11 10

Annexes



ANNEXE1
CARTE DE SITUATION





ANNEXE2
CARTE DE SITUATION

ANNEXE 3
PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE

Photographie 1 : Canal de communication entre la Loire et l'étang

Photographie 2 : Injection de l'uranine

Photographie 3 : Injection de l'uranine

Photographie 4 : Injection de l'uranine

Photographie 5 : Injection du jaune duasyn

Photographie 6 : Surveillance de la restitution à la source de l'Abime

Photographie 7 : Surveillance de la restitution à la source du Bouillon

ANNEXE 4

Traceur utilisé : 1 kg d'uranine			Date d'injection : le 14 mars 2009 à 10h05		
Lieu d'injection : Darvoy			Lieu de prélèvement : Source du Bouillon		
N° d'échantillon	Date et heure	Temps relatif en jour	Intensité de la fluorescence	Spectre d'émission	Concentration corrigée du bruit de fond en µg/l
1 série 1	15/03/2009 19:30	1,39	4,598		
2 série 1	15/03/2009 21:30	1,48	4,619		
3 série 1	15/03/2009 23:30	1,56	4,219	4,015	
4 série 1	16/03/2009 01:30	1,64	4,333		
5 série 1	16/03/2009 03:30	1,73	4,509		
6 série 1	16/03/2009 05:30	1,81	4,280		
7 série 1	16/03/2009 07:30	1,89	4,823		
8 série 1	16/03/2009 09:30	1,98	4,431		
9 série 1	16/03/2009 11:30	2,06	5,137		0,007
10 série 1	16/03/2009 13:30	2,14	4,971		0,004
11 série 1	16/03/2009 15:30	2,23	5,947		0,025
12 série 1	16/03/2009 17:30	2,31	9,024		0,094
13 série 1	16/03/2009 19:30	2,39	14,300		0,211
14 série 1	16/03/2009 21:30	2,48	21,405		0,369
15 série 1	16/03/2009 23:30	2,56	27,212		0,498
16 série 1	17/03/2009 01:30	2,64	30,884		0,580
17 série 1	17/03/2009 03:30	2,73	30,822		0,578
18 série 1	17/03/2009 05:30	2,81	30,575		0,573
19 série 1	17/03/2009 07:30	2,89	27,251		0,499
20 série 1	17/03/2009 09:30	2,98	24,342		0,434
21 série 1	17/03/2009 11:30	3,06	21,959		0,381
22 série 1	17/03/2009 13:30	3,14	18,881		0,313
23 série 1	17/03/2009 15:30	3,23	16,786		0,266
24 série 1	17/03/2009 17:30	3,31	14,768		0,222
1 série 2	17/03/2009 19:30	3,39	13,510		0,194
2 série 2	17/03/2009 21:30	3,48	12,124		0,163
3 série 2	17/03/2009 23:30	3,56	10,529		0,127
4 série 2	18/03/2009 01:30	3,64	9,842		0,112
5 série 2	18/03/2009 03:30	3,73	8,916		0,091
6 série 2	18/03/2009 05:30	3,81	8,088		0,073
7 série 2	18/03/2009 07:30	3,89	7,624		0,063
8 série 2	18/03/2009 09:30	3,98	6,933		0,047
9 série 2	18/03/2009 11:30	4,06	6,661		0,041
10 série 2	18/03/2009 13:30	4,14	6,779		0,044
11 série 2	18/03/2009 15:30	4,23	6,021		0,027
12 série 2	18/03/2009 17:30	4,31	6,222		0,032
13 série 2	18/03/2009 19:30	4,39	6,128		0,030
14 série 2	18/03/2009 21:30	4,48	5,800		0,022
15 série 2	18/03/2009 23:30	4,56	5,310		0,011
16 série 2	19/03/2009 01:30	4,64	5,346		0,012
17 série 2	19/03/2009 03:30	4,73	5,431		0,014
18 série 2	19/03/2009 05:30	4,81	5,567		0,017
19 série 2	19/03/2009 07:30	4,89	5,072		0,006
20 série 2	19/03/2009 09:30	4,98	5,280		0,011
21 série 2	19/03/2009 11:30	5,06	4,924		0,003
22 série 2	19/03/2009 13:30	5,14	4,835		0,001
23 série 2	19/03/2009 15:30	5,23	4,992		0,004
24 série 2	19/03/2009 17:30	5,31	5,079		0,006
1 série 3	19/03/2009 19:30	5,39	4,848		0,001
2 série 3	19/03/2009 21:30	5,48	4,675		-
3 série 3	19/03/2009 23:30	5,56	4,936		-

ANNEXE 4

N° d'échantillon	Date et heure	Temps relatif en jour	Intensité de la fluorescence	Spectre d'émission	Concentration corrigée du bruit de fond en µg/l
4 série 3	20/03/2009 01:30	5,64	4,890		-
5 série 3	20/03/2009 03:30	5,73	4,710		-
6 série 3	20/03/2009 05:30	5,81	4,847		-
7 série 3	20/03/2009 07:30	5,89	4,519		-
8 série 3	20/03/2009 09:30	5,98	4,661		-
9 série 3	20/03/2009 11:30	6,06	5,003		-
10 série 3	20/03/2009 13:30	6,14	4,556		-
11 série 3	20/03/2009 15:30	6,23	4,714		-
12 série 3	20/03/2009 17:30	6,31	4,960		-
13 série 3	20/03/2009 19:30	6,39	4,762		-
14 série 3	20/03/2009 21:30	6,48	4,949		-
15 série 3	20/03/2009 23:30	6,56	5,046		-
16 série 3	21/03/2009 01:30	6,64	4,684		-
17 série 3	21/03/2009 03:30	6,73	4,484		-
18 série 3	21/03/2009 05:30	6,81	4,662		-
19 série 3	21/03/2009 07:30	6,89	4,365		-
20 série 3	21/03/2009 09:30	6,98	4,702		-
21 série 3	21/03/2009 11:30	7,06	4,521		-
22 série 3	21/03/2009 13:30	7,14	4,523		-
23 série 3	21/03/2009 15:30	7,23	4,506		-
24 série 3	21/03/2009 17:30	7,31	4,885		-

ANNEXE 5

Traceur utilisé : 1 kg d'uranine		Date d'injection : le 14 mars 2009 à 10h05			
Lieu d'injection : Darvoy			Lieu de prélèvement : Source de l'Abime		
N° d'échantillon	Date et heure	Temps relatif en jour	Intensité de la fluorescence	Spectre d'émission	Concentration corrigée du bruit de fond en µg/l
1 série 1	15/03/2009 19:30	1,39	5,196		-
2 série 1	15/03/2009 21:30	1,48	4,307		-
3 série 1	15/03/2009 23:30	1,56	4,581		-
4 série 1	16/03/2009 01:30	1,64	4,610		-
5 série 1	16/03/2009 03:30	1,73	4,822		-
6 série 1	16/03/2009 05:30	1,81	4,761		-
7 série 1	16/03/2009 07:30	1,89	4,642		-
8 série 1	16/03/2009 09:30	1,98	4,502		-
9 série 1	16/03/2009 11:30	2,06	5,171		-
10 série 1	16/03/2009 13:30	2,14	4,475		-
11 série 1	16/03/2009 15:30	2,23	4,593		-
12 série 1	16/03/2009 17:30	2,31	5,070		-
13 série 1	16/03/2009 19:30	2,39	7,302		0,051
14 série 1	16/03/2009 21:30	2,48	10,563		0,123
15 série 1	16/03/2009 23:30	2,56	13,155		0,181
16 série 1	17/03/2009 01:30	2,64	18,498		0,299
17 série 1	17/03/2009 03:30	2,73	21,254		0,361
18 série 1	17/03/2009 05:30	2,81	22,266		0,383
19 série 1	17/03/2009 07:30	2,89	21,360		0,363
20 série 1	17/03/2009 09:30	2,98	20,519		0,344
21 série 1	17/03/2009 11:30	3,06	19,507		0,322
22 série 1	17/03/2009 13:30	3,14	17,806		0,284
23 série 1	17/03/2009 15:30	3,23	16,852		0,263
24 série 1	17/03/2009 17:30	3,31	15,283		0,228
1 série 2	17/03/2009 19:30	3,39	14,390		0,208
2 série 2	17/03/2009 21:30	3,48	12,867		0,174
3 série 2	17/03/2009 23:30	3,56	11,410		0,142
4 série 2	18/03/2009 01:30	3,64	11,126		0,136
5 série 2	18/03/2009 03:30	3,73	10,558		0,123
6 série 2	18/03/2009 05:30	3,81	9,268		0,094
7 série 2	18/03/2009 07:30	3,89	8,067		0,068
8 série 2	18/03/2009 09:30	3,98	8,086		0,068
9 série 2	18/03/2009 11:30	4,06	7,719		0,060
10 série 2	18/03/2009 13:30	4,14	7,270		0,050
11 série 2	18/03/2009 15:30	4,23	7,110		0,046
12 série 2	18/03/2009 17:30	4,31	6,422		0,031
13 série 2	18/03/2009 19:30	4,39	6,120		0,024
14 série 2	18/03/2009 21:30	4,48	6,048		0,023
15 série 2	18/03/2009 23:30	4,56	6,130		0,025
16 série 2	19/03/2009 01:30	4,64	5,948		0,021
17 série 2	19/03/2009 03:30	4,73	5,433		0,009
18 série 2	19/03/2009 05:30	4,81	5,964		0,021
19 série 2	19/03/2009 07:30	4,89	5,623		0,013
20 série 2	19/03/2009 09:30	4,98	5,262		0,005
21 série 2	19/03/2009 11:30	5,06	5,327		0,007
22 série 2	19/03/2009 13:30	5,14	5,072		0,001
23 série 2	19/03/2009 15:30	5,23	5,515		0,011
24 série 2	19/03/2009 17:30	5,31	5,083		0,001
1 série 3	19/03/2009 19:30	5,39	5,297		0,006
2 série 3	19/03/2009 21:30	5,48	4,886		-

ANNEXE 5

N° d'échantillon	Date et heure	Temps relatif en jour	Intensité de la fluorescence	Spectre d'émission	Concentration corrigée du bruit de fond en µg/l
3 série 3	19/03/2009 23:30	5,56	5,151		-
4 série 3	20/03/2009 01:30	5,64	4,682		-
5 série 3	20/03/2009 03:30	5,73	4,751		-
6 série 3	20/03/2009 05:30	5,81	4,761		-
7 série 3	20/03/2009 07:30	5,89	5,536		-
8 série 3	20/03/2009 09:30	5,98	5,255		-
9 série 3	20/03/2009 11:30	6,06	4,419		-
10 série 3	20/03/2009 13:30	6,14	4,519		-
11 série 3	20/03/2009 15:30	6,23	4,751		-
12 série 3	20/03/2009 17:30	6,31	4,719		-
13 série 3	20/03/2009 19:30	6,39	4,362		-
14 série 3	20/03/2009 21:30	6,48	4,662		-
15 série 3	20/03/2009 23:30	6,56	4,617		-
16 série 3	21/03/2009 01:30	6,64	4,692		-
17 série 3	21/03/2009 03:30	6,73	4,910		-
18 série 3	21/03/2009 05:30	6,81	5,163		-
19 série 3	21/03/2009 07:30	6,89	4,752		-
20 série 3	21/03/2009 09:30	6,98	4,641		-
21 série 3	21/03/2009 11:30	7,06	5,094		-
22 série 3	21/03/2009 13:30	7,14	4,374		-
23 série 3	21/03/2009 15:30	7,23	4,684		-

ANNEXE 6

Traceur utilisé : 1,325 kg de jaune duasyn			Date d'injection : le 14 mars 2009 à 11h00		
Lieu d'injection : Jargeau			Lieu de prélèvement : Source du Bouillon		
N° d'échantillon	Date et heure	Temps relatif en jour	Intensité de la fluorescence	Spectre d'émission	Concentration corrigée du bruit de fond en µg/l
1 série 1	15/03/2009 19:30	1,35	10,111		-
2 série 1	15/03/2009 21:30	1,44	10,208		-
3 série 1	15/03/2009 23:30	1,52	10,244		-
4 série 1	16/03/2009 01:30	1,60	9,871		-
5 série 1	16/03/2009 03:30	1,69	9,53		-
6 série 1	16/03/2009 05:30	1,77	10,096		-
7 série 1	16/03/2009 07:30	1,85	10,046		-
8 série 1	16/03/2009 09:30	1,94	10,06		-
9 série 1	16/03/2009 11:30	2,02	10,07		-
10 série 1	16/03/2009 13:30	2,10	9,724		-
11 série 1	16/03/2009 15:30	2,19	10,482		-
12 série 1	16/03/2009 17:30	2,27	10,163		-
13 série 1	16/03/2009 19:30	2,35	10,014		-
14 série 1	16/03/2009 21:30	2,44	10,06		-
15 série 1	16/03/2009 23:30	2,52	9,977		-
16 série 1	17/03/2009 01:30	2,60	9,946		-
17 série 1	17/03/2009 03:30	2,69	10,221		-
18 série 1	17/03/2009 05:30	2,77	11,135		0,239
19 série 1	17/03/2009 07:30	2,85	12,76		0,589
20 série 1	17/03/2009 09:30	2,94	13,574		0,764
21 série 1	17/03/2009 11:30	3,02	15,775		1,237
22 série 1	17/03/2009 13:30	3,10	17,219		1,548
23 série 1	17/03/2009 15:30	3,19	17,786		1,669
24 série 1	17/03/2009 17:30	3,27	19,044		1,940
1 série 2	17/03/2009 19:30	3,35	19,875		2,119
2 série 2	17/03/2009 21:30	3,44	18,634		1,852
3 série 2	17/03/2009 23:30	3,52	18,615		1,848
4 série 2	18/03/2009 01:30	3,60	17,961		1,707
5 série 2	18/03/2009 03:30	3,69	17,646		1,639
6 série 2	18/03/2009 05:30	3,77	16,728		1,442
7 série 2	18/03/2009 07:30	3,85	15,79		1,240
8 série 2	18/03/2009 09:30	3,94	15,477		1,173
9 série 2	18/03/2009 11:30	4,02	15,451		1,167
10 série 2	18/03/2009 13:30	4,10	14,446		0,951
11 série 2	18/03/2009 15:30	4,19	13,842		0,821
12 série 2	18/03/2009 17:30	4,27	13,641		0,778
13 série 2	18/03/2009 19:30	4,35	13,208		0,685
14 série 2	18/03/2009 21:30	4,44	12,623		0,559
15 série 2	18/03/2009 23:30	4,52	12,33		0,496
16 série 2	19/03/2009 01:30	4,60	12,539		0,541
17 série 2	19/03/2009 03:30	4,69	11,637		0,347
18 série 2	19/03/2009 05:30	4,77	11,6		0,339
19 série 2	19/03/2009 07:30	4,85	11,364		0,288
20 série 2	19/03/2009 09:30	4,94	11,442		0,305
21 série 2	19/03/2009 11:30	5,02	11,316		0,278
22 série 2	19/03/2009 13:30	5,10	11,47		0,311
23 série 2	19/03/2009 15:30	5,19	11,245		0,263
24 série 2	19/03/2009 17:30	5,27	11,61		0,341
1 série 3	19/03/2009 19:30	5,35	10,623		0,129
2 série 3	19/03/2009 21:30	5,44	11,184		0,250
3 série 3	19/03/2009 23:30	5,52	11,219		0,257
4 série 3	20/03/2009 01:30	5,60	10,662		0,137
5 série 3	20/03/2009 03:30	5,69	11,354		0,286
6 série 3	20/03/2009 05:30	5,77	10,47		0,096
7 série 3	20/03/2009 07:30	5,85	10,35		0,070
8 série 3	20/03/2009 09:30	5,94	10,628		0,130
9 série 3	20/03/2009 11:30	6,02	10,476		0,097

ANNEXE 6

N° d'échantillon	Date et heure	Temps relatif en jour	Intensité de la fluorescence	Spectre d'émission	Concentration corrigée du bruit de fond en µg/l
10 série 3	20/03/2009 13:30	6,10	10,025		0,000
11 série 3	20/03/2009 15:30	6,19	10,254		0,050
12 série 3	20/03/2009 17:30	6,27	10,58		0,120
13 série 3	20/03/2009 19:30	6,35	10,38		0,077
14 série 3	20/03/2009 21:30	6,44	10,473		0,097
15 série 3	20/03/2009 23:30	6,52	10,557		0,115
16 série 3	21/03/2009 01:30	6,60	10,979		0,206
17 série 3	21/03/2009 03:30	6,69	11,074		0,226
18 série 3	21/03/2009 05:30	6,77	10,771		0,161
19 série 3	21/03/2009 07:30	6,85	10,439		0,089
20 série 3	21/03/2009 09:30	6,94	10,256		0,050
21 série 3	21/03/2009 11:30	7,02	9,877		-
22 série 3	21/03/2009 13:30	7,10	10,014		-
23 série 3	21/03/2009 15:30	7,19	10,349		-
24 série 3	21/03/2009 17:30	7,27	9,97		-

ANNEXE 7

Traceur utilisé : 1,325 kg de jaune duasyn		Date d'injection : le 14 mars 2009 à 11h00			
Lieu d'injection : Jargeau			Lieu de prélèvement : Source de l'Abime		
N° d'échantillon	Date et heure	Temps relatif en jour	Intensité de la fluorescence	Spectre d'émission	Concentration corrigée du bruit de fond en µg/l
1 série 1	15/03/2009 19:30	1,35	10,758		0,000
2 série 1	15/03/2009 21:30	1,44	10,301		0,000
3 série 1	15/03/2009 23:30	1,52	9,789		0,000
4 série 1	16/03/2009 01:30	1,60	10,092		0,000
5 série 1	16/03/2009 03:30	1,69	10,506		0,000
6 série 1	16/03/2009 05:30	1,77	10,688		0,000
7 série 1	16/03/2009 07:30	1,85	10,242		0,000
8 série 1	16/03/2009 09:30	1,94	10,165		0,000
9 série 1	16/03/2009 11:30	2,02	11,261		0,000
10 série 1	16/03/2009 13:30	2,10	9,977		0,000
11 série 1	16/03/2009 15:30	2,19	9,89		0,000
12 série 1	16/03/2009 17:30	2,27	10,021		0,000
13 série 1	16/03/2009 19:30	2,35	10,244		0,000
14 série 1	16/03/2009 21:30	2,44	10,752		0,000
15 série 1	16/03/2009 23:30	2,52	9,951		0,000
16 série 1	17/03/2009 01:30	2,60	9,945		0,000
17 série 1	17/03/2009 03:30	2,69	9,889		0,000
18 série 1	17/03/2009 05:30	2,77	10,485		0,000
19 série 1	17/03/2009 07:30	2,85	10,666		0,138
20 série 1	17/03/2009 09:30	2,94	11,811		0,385
21 série 1	17/03/2009 11:30	3,02	12,345		0,499
22 série 1	17/03/2009 13:30	3,10	12,902		0,619
23 série 1	17/03/2009 15:30	3,19	13,922		0,838
24 série 1	17/03/2009 17:30	3,27	15,05		1,081
1 série 2	17/03/2009 19:30	3,35	16,227		1,334
2 série 2	17/03/2009 21:30	3,44	16,431		1,378
3 série 2	17/03/2009 23:30	3,52	16,894		1,478
4 série 2	18/03/2009 01:30	3,60	15,858		1,255
5 série 2	18/03/2009 03:30	3,69	16,504		1,394
6 série 2	18/03/2009 05:30	3,77	16,013		1,288
7 série 2	18/03/2009 07:30	3,85	15,606		1,201
8 série 2	18/03/2009 09:30	3,94	15,815		1,246
9 série 2	18/03/2009 11:30	4,02	15,552		1,189
10 série 2	18/03/2009 13:30	4,10	14,388		0,939
11 série 2	18/03/2009 15:30	4,19	13,977		0,850
12 série 2	18/03/2009 17:30	4,27	13,571		0,763
13 série 2	18/03/2009 19:30	4,35	13,179		0,679
14 série 2	18/03/2009 21:30	4,44	12,828		0,603
15 série 2	18/03/2009 23:30	4,52	13,015		0,643
16 série 2	19/03/2009 01:30	4,60	12,256		0,480
17 série 2	19/03/2009 03:30	4,69	12,236		0,476
18 série 2	19/03/2009 05:30	4,77	12,377		0,506
19 série 2	19/03/2009 07:30	4,85	11,903		0,404
20 série 2	19/03/2009 09:30	4,94	11,518		0,322
21 série 2	19/03/2009 11:30	5,02	11,465		0,310
22 série 2	19/03/2009 13:30	5,10	11,38		0,292
23 série 2	19/03/2009 15:30	5,19	11,835		0,390
24 série 2	19/03/2009 17:30	5,27	11,177		0,248
1 série 3	19/03/2009 19:30	5,35	11,507		0,319
2 série 3	19/03/2009 21:30	5,44	10,95		0,199
3 série 3	19/03/2009 23:30	5,52	10,855		0,179

ANNEXE 7

N° d'échantillon	Date et heure	Temps relatif en jour	Intensité de la fluorescence	Spectre d'émission	Concentration corrigée du bruit de fond en µg/l
4 série 3	20/03/2009 01:30	5,60	10,888		0,186
5 série 3	20/03/2009 03:30	5,69	10,801		0,167
6 série 3	20/03/2009 05:30	5,77	10,391		0,079
7 série 3	20/03/2009 07:30	5,85	10,09		0,014
8 série 3	20/03/2009 09:30	5,94	10,902		0,189
9 série 3	20/03/2009 11:30	6,02	10,376		0,076
10 série 3	20/03/2009 13:30	6,10	10,026		0,001
11 série 3	20/03/2009 15:30	6,19	10,785		0,164
12 série 3	20/03/2009 17:30	6,27	10,538		0,111
13 série 3	20/03/2009 19:30	6,35	10,137		0,025
14 série 3	20/03/2009 21:30	6,44	10,748		0,156
15 série 3	20/03/2009 23:30	6,52	10,467		0,095
16 série 3	21/03/2009 01:30	6,60	10,334		0,067
17 série 3	21/03/2009 03:30	6,69	10,122		0,021
18 série 3	21/03/2009 05:30	6,77	11,086		0,229
19 série 3	21/03/2009 07:30	6,85	10,806		0,168
20 série 3	21/03/2009 09:30	6,94	10,747		0,156
21 série 3	21/03/2009 11:30	7,02	10,195		0,037
22 série 3	21/03/2009 13:30	7,10	9,656		-
23 série 3	21/03/2009 15:30	7,19	10,382		-

Géosciences pour une Terre durable
brgm

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

Direction régionale Centre-Val de Loire
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 31 92