

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

htb-2 d7-hta



BRGM/RP-65474-FR Mars 2016

de-hia



.89 3740,46 -625.5



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

Rapport final

BRGM/RP- 65474-FR Mars 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Recherche du BRGM

Je. Perrin, A. Gutierrez, E. Vanoudheusden, D. Salquèbre, E. Joigneaux, C. Château (DSA Technologies), N. Jozja (CETRAHE), C. Défarge (CETRAHE, ISTO), S. Binet (ISTO) Avec la collaboration de A. Guirimand-Dufour, R. Zocatelli (CETRAHE), F. Matthieu, S. Pasquier (stagiaire ENSEGID Bordeaux)

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : S. Bernardie	Nom : S.Lallier
Data : 11/03/2016	Fonction : Dir. Adjt Eau, Environnement, Ecotechnologies
Date : 11/03/2010	Date : 16/03/2016
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.



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

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

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., 52 ill., 8 ann.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet iFontis s'inscrit dans les projets de recherche innovants cofinancés par le Conseil Général du Loiret ; il a été réalisé sur deux ans (02/2014-02/2016) dans le cadre d'un partenariat scientifique entre des Instituts de recherche (BRGM, CETRAHE, ISTO) et une Entreprise (DSA Technologies).

Le projet a pour objectif scientifique d'améliorer la compréhension des processus physiques menant à l'apparition de fontis. Cette compréhension doit permettre de dégager des pistes de développement d'une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis dans une perspective de gestion du risque.

En effet, l'apparition de fontis dans le Val d'Orléans est un phénomène récurrent qui peut avoir des conséquences économiques et sociétales significatives. L'origine des fontis est liée à la présence de conduits naturels (conduits dits karstiques) formés par la dissolution des calcaires de Beauce qui constituent le substratum du Val sous une couverture peu épaisse d'alluvions. Deux types de processus sont à l'origine de l'apparition de fontis : 1) le soutirage/suffosion des alluvions vers les conduits karstiques entraînant la création d'une cloche de fontis dans les alluvions puis sa progression en direction de la surface jusqu'à l'effondrement brutal de sa voûte ; 2) la rupture du toit calcaire d'un conduit naturel et l'effondrement des terrains meubles sus-jacents.

Les principaux résultats scientifiques de l'étude montrent que : 1) la nappe des alluvions peut être en charge par rapport à celle des calcaires en période de décrue orientant les flux des alluvions vers le karst et rendant donc possible les processus de soutirage/suffosion ; cependant les vitesses d'écoulement semblent insuffisantes pour induire à elles-seules le transport particulaire, mais cela mériterait d'être confirmé ; 2) les mesures chimiques des eaux montrent des variations de leur teneur en calcium liées à l'évolution potentiellement rapide des vides karstiques par dissolution (augmentation du diamètre de ces vides de l'ordre de 1 cm/an) et donc que l'apparition de fontis par rupture du toit calcaire est plausible, en particulier à proximité des pertes de Loire où la dissolution est maximale.

Des pistes de surveillance de ce risque géologique ont pu être dégagées, en particulier par l'utilisation de capteurs de déformation développés dans le cadre du projet et par des méthodologies de cartographie des conduits depuis la surface, approche qui pourra être développée ultérieurement (proposition soumise par les partenaires à l'appel à projet recherche de la Région). Le projet a également permis la mise en place d'un site expérimental dans un secteur particulièrement sensible à l'apparition de fontis le long de la digue de Loire à l'Ouest de Jargeau.

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

Les résultats du projet ont ou vont être communiqués par plusieurs biais : deux communications orales seront faites à des congrès spécialisés dans le domaine de la géotechnique et du karst avec dans les deux cas une publication d'un article dans les Actes. Il est également prévu de publier un article dans un numéro spécial de la revue Géologues sur le thème de la géotechnique. Des présentations à un plus large public ont été données par exemple auprès de l'association Action Science à Jargeau, de la convention tripartite réunissant la Chambre d'Agriculture, l'Orléanaise des Eaux et la ville d'Orléans, ou encore dans le cadre du congrès national de l'APBG (association des professeurs de biologie et géologie). Une présentation des résultats de l'étude est envisagée au printemps 2016 à Darvoy.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS	11
1.2. LES EFFONDREMENTS D'ORIGINE KARSTIQUE DANS LE VAL D'ORLEANS	12
1.3. CHOIX DU SITE EXPERIMENTAL	17
2. Caractérisation du site expérimental	19
2.1. GEOPHYSIQUE ET FORAGES 2.1.1. Profils géophysiques 2.1.2. Forages des piézomètres	19 19 19
2.2. CAMPAGNE PIEZOMETRIQUE	22
2.3. TESTS HYDRAULIQUES 2.3.1. Pompage d'essai sur Pz1 2.3.2. Slug test sur Pz2bis	23 23 25
 2.4. ESSAIS DE TRAÇAGE 2.4.1. Traçages au cours du pompage d'essai 2.4.2. Traçage fontis / Bouillon du 01/07/2015 2.4.3. Traçage Pz1 - Pz3bis du 01/09/2015 	27 27 31 32
2.5. DIAGRAPHIES SUR PZ1 ET PZ3BIS	33
2.6. CARTOGRAPHIE DES CONDUITS KARSTIQUES PAR GEOPHYSIQUE 2.6.1. Préparation de l'opération 2.6.2. Déroulement de l'opération 2.6.3. Analyses et résultats	35 36 37 39
2.7. SYNTHESE	42
3. Equipement du site	43
3.1. INSTRUMENTATION DES PIEZOMETRES	43
3.2. INSTRUMENTATION DU FONTIS	44
4. Résultats des suivis du site expérimental	47
4.1. SUIVI DES DEFORMATIONS 4.1.1. Nivellements 4.1.2. Capteurs de déformation	47 47 48

4.2.1. Niveaux d'eau		4.2. SUIVI DES NAPPES ALLUVIALE ET CALCAIRE	49
4.2.2. Température. 52 4.2.3. Conductivité. 53 4.2.4. Turbidité 53 4.2.4. Turbidité 54 4.3. SUIVI HYDROCHIMIQUE 56 4.3.1. Paramètres physico-chimiques mesurés dans la Loire, le karst et la source du Bouillon 56 4.3.2. Eléments majeurs. 57 4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4.1. Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR L		4.2.1.Niveaux d'eau	49
4.2.3. Conductivité 53 4.2.4. Turbidité 54 4.3. SUIVI HYDROCHIMIQUE 56 4.3.1. Paramètres physico-chimiques mesurés dans la Loire, le karst et la source du Bouillon 56 4.3.2. Eléments majeurs 57 4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4.1. Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2. Résultats 58 4.4.2. Résultats 58 4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTAT		4.2.2. Température	52
4.2.4. Turbidité 54 4.3. SUIVI HYDROCHIMIQUE 56 4.3.1. Paramètres physico-chimiques mesurés dans la Loire, le karst et la source du Bouillon 56 4.3.2. Eléments majeurs 57 4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4.1. Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE		4.2.3. Conductivité	53
4.3. SUIVI HYDROCHIMIQUE 56 4.3.1. Paramètres physico-chimiques mesurés dans la Loire, le karst et la source du Bouillon 56 4.3.2. Eléments majeurs 57 4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4.1. Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7.8 Bibliographie 79		4.2.4. Turbidité	54
4.3.1. Parametres physico-chimiques mesures dans la Loire, le karst et la source du Bouillon 56 4.3.2. Eléments majeurs 57 4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4.1. Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		4.3. SUIVI HYDROCHIMIQUE	56
4.3.2. Eléments majeurs. 57 4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4.1. Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		4.3.1. Parametres physico-chimiques mesures dans la Loire, le karst et la source du Bouillon	56
4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4.1. Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		4 3 2 Fléments majeurs	
4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES 58 4.4.1. Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79			
4.4.1.Préparation des échantillons et analyses 58 4.4.2.Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES	58
4.4.2. Résultats 58 5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie		4.4.1. Préparation des échantillons et analyses	58
5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement.61 5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78		4.4.2. Résultats	58
5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE 61 5.1.1. Charges hydrauliques 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79	5.	Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement	t. 61
5.1.1. Charges hydrauliques. 61 5.1.2. Paramètres physico-chimiques. 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE	61
5.1.2. Paramètres physico-chimiques. 61 5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		5.1.1.Charges hydrauliques	61
5.1.3. Dissolution des calcaires 62 5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		5.1.2. Paramètres physico-chimiques	61
5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES 63 5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		5.1.3. Dissolution des calcaires	62
5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 65 5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant 65 5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES	63
5.3.1.Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant		5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE	65
5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes 67 5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant	65
5.4. SYNTHESE 73 5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT 75 6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes	67
5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT		54 SANTHESE	73
5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT			
6. Perspectives et Conclusions 77 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 77 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS 77 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE 78 7. Bibliographie 79		5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT	75
 6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES	6.	Perspectives et Conclusions	77
 6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS		6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES	77
 6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE		6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS	77
7. Bibliographie		6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE	78
	7.	Bibliographie	79

Liste des illustrations

Illustration 1 – 0	Compilation des données de Desprez 1976, 1977, BD-cavités, Donsimoni 2008, CETE, carte géologique 1/50 000	12
Illustration 2 - E	Effondrement d'une habitation suite à l'apparition d'un fontis, St-Pryvé-St-Mesmin, 22 mai 2010	12
Illustration 3 – S	Schéma illustrant la formation d'un fontis par soutirage/suffosion des particules fines vers les conduits karstiques puis effondrement de la cloche de fontis dans le contexte du val d'Orléans (Maurin 2012)	13
Illustration 4 – S	Schéma illustrant l'apparition d'un fontis par effondrement soudain du toit calcaire d'un conduit karstique dans le contexte du val d'Orléans	13
Illustration 5 - L	ocalisation des 27 fontis et 1 groupe de 6 fontis (amont du pont de Jargeau) apparus sur la période 2010-2015 portés à notre connaissance	14
Illustration 6 – I	Processus de soutirage/suffosion par battement de la nappe karstique au niveau de l'interface karst-couverture envisagé par Newton (1987) ; les schémas décrivent une séquence temporelle allant du haut à gauche jusqu'en bas à droite avec deux battements de nappe successifs. Un tel processus semble possible dans certains secteurs du Val	15
Illustration 7 - S	Schéma conceptuel d'une montée de cloche de fontis dans une couverture meuble coiffant un calcaire karstifié non saturé dans sa partie supérieure. Ce schéma pourrait correspondre à un mode d'apparition de fontis sur le glacis d'Olivet (d'après White & White, 1986)	16
Illustration 8 – 0	Carte indiquant les fontis connus et les forages dans les environs du site expérimental de Jargeau/Darvoy	17
Illustration 9 – I	Photos des fontis apparus récemment à proximité immédiate du site de Jargeau/Darvoy : en haut fontis en pied de digue s'étant réactivé à l'automne 2013 (F1), en bas à gauche fontis apparu en Décembre 2013 (F2), en bas à droite fontis apparu en Novembre 2008 (F3, document SSL)	18
Illustration 10 -	 Carte de localisation des ouvrages finalisés (Pz1, Pz2bis et Pz3bis) et comblés (Pz2 et Pz3) (Source : IGN – extrait de carte au 1/25000 au-dessus, photo aérienne – BD Carto en-dessous) 	20
Illustration 11 -	- Réalisation du forage Pz1 en sommet de digue	20
Illustration 12 -	Zoom sur la carte piézomètrique de Desprez et les axes de drainages préférentiels (Desprez, 1967)	22
Illustration 13 -	Esquisse piézomètrique autour de Jargeau début juin 2015	23
Illustration 14 -	Résultats obtenus lors de l'essai de pompage (débits et niveaux d'eau observés)	24
Illustration 15 -	Interprétation du pompage d'essai à l'aide du logiciel Ouaip (BRGM)	25
Illustration 16 -	Réalisation du slug test	26
Illustration 17 -	Variation du niveau d'eau dans Pz2bis durant le Slug Test	26
Illustration 18 -	Courbe de décroissance des concentrations en chlorures au piézomètre Pz2bis (suivi sonde de conductivité située vers 7.5 m sous la surface)	29
Illustration 19 -	Courbe de décroissance des concentrations en sulforhodamine B au piézomètre Pz3bis (suivi fluorimètre de terrain GGUN FL-24)	29
Illustration 20 -	Courbes de restitution de naphtionate de sodium à l'exhaure du Pz1 (courbe verte) et au piézomètre Pz3bis (courbe marron)	30
Illustration 21 -	Injection d'uranine dans Pz1 le 1 ^{er} Septembre 2015	33

Illustration 22 -	Diagraphies de température et de turbidité sur la partie trou nu de Pz1 (réalisées le 13/09/2014 16h00-16h40)	.34
Illustration 23 -	- Diagraphies de température et de sulforhodamine sur la partie trou nu de Pz3bis (réalisées le 11/09/2014 18h45-19h15)	.35
Illustration 24 -	Gamme étalonnage, conductivité/concentration en NaCl	37
Illustration 25 -	Localisation des profils géophysiques	37
Illustration 26 -	Préparation du dispositif d'injection	38
Illustration 27 -	Variations de la résistivité électrique enregistrée sur le profil P1 (15 m en aval du piézomètre d'injection Pz3bis) lors de l'injection de la solution salée du 30 juin 2015	.40
Illustration 28 -	Variations de la résistivité électrique enregistrée sur le profil P2 (50 m en aval du piézomètre d'injection Pz3bis) lors de l'injection de la solution salée du 30 juin 2015 dans Pz3bis	.41
Illustration 29 -	Coupe hydrogéologique du site d'étude	42
Illustration 30 -	Installation de jalons dans le fontis principal (F1) : à gauche jalons J2, J3, J4 ; à droite jalons J5 & J6	45
Illustration 31 -	Levé topographique du fontis principal (en haut) et des affaissements secondaires (en bas) avec emplacements des jalons et des capteurs de déformation (ronds rouges)	.46
Illustration 32 -	En haut : Evolution de la topographie du fontis selon le grand axe jalonné par J2, J3, J4, J5n. En bas : évolution de la topographie des fontis secondaires jalonnés par Jb, Jc, Jd, Je	.48
Illustration 33 -	Variations piézométriques enregistrées sur le site expérimental et niveaux journaliers de la Loire à Orléans (station Pont-Royal). Les précipitations journalières de la station d'Orléans-Bricy sont présentées dans le graphique supérieur (pas de données après Septembre 2015)	.50
Illustration 34 -	Zoom sur la période d'Octobre 2014 à Avril 2015 (hautes eaux). Un déphasage entre alluvions (Pz2bis) et calcaires (Pz1 & Pz3bis) apparaît en décrue	50
Illustration 35 -	Chroniques de température (°C) dans les trois piézomètres et cote piézométrique (mNGF) dans Pz2bis	.52
Illustration 36 -	Chroniques de conductivité (µS/cm) dans les piézomètres et cote piézométrique dans Pz2bis. Les valeurs mesurées par la sonde Pz3bis à partir du 01/07/2015 sont erronées	.53
Illustration 37 -	Evolution de la conductivité entre la Loire (station d'alerte Lyonnaise), les conduits karstiques (Pz3bis) et la source du Bouillon (sonde ISTO)	.54
Illustration 38 -	Chronique de turbidité dans le conduit karstique (Pz1) ; les données enregistrées sur Pz3bis sont très bruitées et ne sont pas montrées	55
Illustration 39 -	Evolution de la turbidité au Bouillon	55
Illustration 40 -	Diagramme de Piper montrant les caractéristiques chimiques des différents points d'eau prélevés	.57
Illustration 41 -	Comparaisons des résultats de DRX sur les MES en Loire	59
Illustration 42 -	Différence de charge entre nappe alluviale (Pz2bis) et calcaire (Pz1)	61
Illustration 43 -	Localisation des fontis datés et information sur les conditions hydrologiques lors de leur apparition	.64
Illustration 44 -	Chronique du niveau de la Loire à Orléans Pont Royal et apparition de fontis sur la période 2010-2015	.64

Illustration 45 -	Fluctuations piézométriques maximales simulées dans la couche des alluvions sur une grille de 250 x 250 m	66
Illustration 46 -	Carte montrant la répartition spatiale du ratio entre les épaisseurs d'alluvions saturées sur les épaisseurs d'alluvions non saturées calculé sur les piézométries modélisées en situation de crue, le MNT et le modèle géométrique des alluvions de Martin & Noyer (2003)	66
Illustration 47 -	Carte montrant les épaisseurs non saturées d'alluvions en période de crue calculées à partir de la piézométrie simulée par Martin & Noyer (2003) et le MNT	67
Illustration 48 -	Coupe du modèle numérique maillé réalisé sous MARTHE et comprenant trois couches d'égale épaisseur (notez l'exagération verticale)	69
Illustration 49 -	Propagation de l'onde de pression d'une crue de la Loire sur les piézométres simulés pour deux valeurs de perméabilité de la couche 3 (calcaires karstifiés) : 0.1 m/s (scénario de base) et 1 m/s. Pour le scénario le plus perméable, un déphasage apparait également sur les triplets de piézomètres intermédiaire et aval	70
Illustration 50 -	Simulation du rôle d'une couche intermédiaire plus perméable (perméabilité 1x10-3 m/s) correspondant aux niveaux piézométriques simulés en couleurs ; pour comparaison le scénario précédent (perméabilité couche 3 = 1 m/s) est représenté en gris	71
Illustration 51 -	Simuation du rôle d'une couche intermédiaire peu perméable (K=1x10-7 m/s) montrant un déphasage pouvant atteindre un mètre sur le triplet de piézomètres amont ; les courbes en traitillés représentent les résultats du scénario où la couche intermédiaire est perforée de cheminées karstiques à proximité des piézomètres ; ces zones à fortes perméabilités ont pour effet de réduire (un peu) le déphasage	71
Illustration 52 -	Evolution piézométrique liée à une recharge de 10 mm/jour sur 5 jours (jours 20-24) pour deux scénarios : le scénario de base (perméabilité de la couche intermédiaire 1×10^{-5} m/s) en traits pleins et le scénario à couche intermédiaire peu perméable $(1 \times 10^{-7} \text{ m/s})$ en traitillés. Piézomètres dans la couche 1 en bleu, dans la couche 2 en rouge sombre et dans la couche 3 en vert	72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Localisation des points de prélèvements (coordonnées en WGS 84)	. 31
Tableau 2 : Résultats des traçages de septembre 2014 sur le site d'étude	. 36
Tableau 3 : Indice de saturation en calcite aux points de prélévement	.62
Tableau 4 : Concentrations en calcium aux points de prélèvement	.63

Liste des annexes

Annexe 1	Liste des fontis récents apparus dans le val d'Orléans (2010-2015)	83
Annexe 2	Levés géophysiques (tomographie électrique & sismique) sur le site expérimental de Jargeau/Darvoy	87
Annexe 3	Logs géologique et technique des forages	97
Annexe 4	Descriptif des opérations de traçage	. 103
Annexe 5	Résultats des suivis hydrogéochimiques de terrain	. 107
Annexe 6	Monitoring géophysique du traceur salin injecté dans Pz3bis	. 111
Annexe 7	Diagrammes de Schoeller	. 115
Annexe 8	Analyse bibliographique des paramètres hydrodynamiques des nappes du Val d'Orléans	. 119

<u>Note</u> :

Cette étude a bénéficié de la collaboration de plusieurs personnes ayant apporté un soutien technique et/ou logistique précieux, nous tenons à remercier en particulier Odile de Chalus, Denis Trassebot, Gilbert Delahaye, Philippe Penhoud (ISTO), l'Orléanaise des Eaux et la Ville d'Orléans, Jacques Munerot, Olivier Cantaloube, Philippe Boismoreau (association Spéléologie Subaquatique Loiret), les Municipalités de Jargeau et Darvoy, Gwladys Ledocq, Marine Boulanger, Mathis Neimard (élèves-ingénieurs Polytech'Orléans), et la Ligérienne des granulats.

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS

Cette étude s'inscrit dans le cadre des projets de recherche innovants cofinancés par le Conseil Général du Loiret (réponse à l'AAP projets innovants 2013). Elle a été réalisée dans le cadre d'un partenariat entre trois organismes de recherche (BRGM, CETRAHE-Université d'Orléans, ISTO) et une PME (DSA Technologies). Ce rapport final présente les résultats scientifiques principaux de l'étude réalisée sur deux ans (février 2014-février 2016). En outre, des recommandations pratiques et les perspectives économiques locales sont également présentées.

L'apparition de fontis dans le Val d'Orléans est un phénomène récurrent (Illustration 1) qui peut avoir des conséquences économiques et sociétales significatives (p.ex. villa à St-Pryvé en 2010 - Illustration 2, chaussée de l'autoroute A71 en novembre 2012, etc.). L'occurrence de fontis sous les digues de Loire fait craindre une déstabilisation/rupture locale de celles-ci avec les risques d'inondation qui pourraient en découler. Plusieurs mécanismes d'instabilité des digues pouvant être causés par les karsts sous-jacents ont été étudiés par Gombert et al. (2014) dans le contexte du Val d'Orléans.

L'objectif central du projet est d'améliorer la compréhension des processus physiques (relations entre charges hydrauliques rivière/alluvial/karst et flux de matière dans le karst, seuils hydrauliques à partir desquels le soutirage/suffosion est actif, quantification des flux de matière dans les conduits et origine de la matière) menant à l'apparition de fontis. Cette compréhension doit permettre de dégager des pistes de développement d'une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis à l'échelle locale dans une perspective de gestion du risque. Dans ce cadre, le développement de capteurs de déformation bas coût permettant la télétransmission des données a été réalisé par l'Entreprise partenaire DSA Technologies. Une analyse bibliographique montre que très peu de méthodes de surveillance/prévisions existent à l'heure actuelle : dans le cas où les niveaux de la nappe karstigue sont un élément déclencheur d'effondrements, un suivi piézométrique peut être mis en place (p.ex., Lei et al. 2002, Yao et al. 2007). Dans les autres cas (autres facteurs déclencheurs), l'interprétation de sondages géotechniques (pénétromètres) dans la couverture peut servir à l'élaboration de cartes prédictives (Khomenko 2008); des études récentes montrent les potentialités d'un suivi par fibre optique dans la couverture pour anticiper l'apparition de fontis (Lanticq et al. 2009, Jiang et al. 2006, Zhang et al. 2009, Meng et al. 2013). Un exemple de surveillance par mesures radar des déformations de surface (GB-InSAR) est donné par Intrieri et al. (2015). On peut également mentionner le monitoring nano-sismique testé par Wust-Bloch & Joswig (2006) pour la prévision des fontis dans les karsts de sel de la mer Morte.

Dans cette perspective de compréhension des processus et de surveillance, le projet se focalise sur la mise en place d'un site expérimental permettant de caractériser en détail le contexte géologique et hydrogéologique et de tester et évaluer le suivi de différents paramètres.

Des informations plus détaillées sur le déroulement de l'année 1 du projet (organisation du projet, choix du site expérimental, conception du suivi du site) sont disponibles dans le rapport intermédiaire rédigé en fin d'année 1 (Perrin et al. 2015a).



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



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

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

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

1) le soutirage/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 celleci jusqu'en surface pour former un fontis (Illustration 3). 2) la rupture du toit calcaire d'un conduit naturel et l'effondrement des terrains meubles susjacent (Illustration 4).

L'aléa des effondrements liés au karst est en général approché par la combinaison de deux facteurs : la susceptibilité de présence d'une cavité karstique et la susceptibilité d'effondrement au droit d'une cavité potentiellement existante (Donsimoni *et al.* 2008, Nachbaur & Rohmer 2011). La qualification de l'intensité du désordre en surface (dimensions du fontis, pentes de l'affaissement) complète l'évaluation de l'aléa. A l'échelle du Val, l'aléa effondrement karstique est relativement élevé puisque les calcaires de Beauce sont intensément karstifiés et la couverture alluviale ne peut stopper la propagation d'une cloche de fontis. Une analyse statistique des critères explicatifs de l'occurrence de fontis a montré le rôle prépondérant de la typologie du karst (le karst sous couverture étant le plus sensible), de la présence et l'épaisseur d'une couche peu perméable entre alluvions et calcaires, de l'épaisseur saturée des alluvions et de la distance aux cours d'eau (Perrin et al. 2014, 2015b).

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

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



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



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

Les fontis se manifestent régulièrement dans le Val d'Orléans et à proximité immédiate (glacis d'Olivet). Un recensement des fontis survenus entre 2010 et 2015 permet de dénombrer 33 occurrences (Annexe 1) sur la base de différentes sources d'information (observations dans le cadre du projet iFontis, base de données Georisques, CEREMA-Blois/INERIS, Spéléologues, communications personnelles). Ce recensement n'est certainement pas exhaustif. Ces 33 occurrences correspondent à 24 localisations puisque en quatre endroits deux fontis sont côte à côte et en un endroit (amont du pont de Jargeau) on dénombre 6 fontis à proximité immédiate (Illustration 5). Trois fontis sont apparus sur le glacis d'Olivet dans un contexte géologique un peu différent et le reste des occurrences correspond au contexte de l'étude, c'est-à-dire le val d'Orléans. Les années 2012 et 2014 ne comptent que 1 fontis chacune alors que les autres années le nombre total est compris entre 5 et 15 (année 2013 comprenant 6 fontis sur le même site).



Illustration 5 - Localisation des 27 fontis et 1 groupe de 6 fontis (amont du pont de Jargeau) apparus sur la période 2010-2015 portés à notre connaissance

Une recherche bibliographique a permis d'identifier l'étude de Newton (1987) pouvant apporter un éclairage sur les processus pouvant expliquer l'occurrence de fontis dans le Val d'Orléans : cette étude porte sur les karsts sous couverture de l'Est des Etats-Unis et décrit de manière conceptuelle l'influence d'un battement de nappe à l'interface couverture-karst sur le processus de soutirage/suffosion (Illustration 6), situation courante dans le Val d'Orléans.



Illustration 6 – Processus de soutirage/suffosion par battement de la nappe karstique au niveau de l'interface karst-couverture envisagé par Newton (1987) ; les schémas décrivent une séquence temporelle allant du haut à gauche jusqu'en bas à droite avec deux battements de nappe successifs. Un tel processus semble possible dans certains secteurs du Val

A titre d'information, un processus d'apparition possible des fontis sur le glacis d'Olivet¹ est illustré par le schéma conceptuel de White & White (1986) développé pour un contexte karstique de Pennsylvanie caractérisé par une nappe perchée temporaire dans une couverture coiffant un calcaire karstifié non saturé dans sa partie sommitale (Illustration 7).

¹ Ce contexte géologique n'est pas directement abordé dans le cadre de notre étude



Figure 2. Sketch showing conditions for suffosional sinkhole formation. Saturation of soil during period of storm runoff provides the local "water table," while the open fractures provide the drain with subsequent drawdown and soil transport.

Figure 3. Sketch showing the evolution of a suffosional sinkhole. (a) Initial stage of void formation near dominent fracture inlet. (b) Shortly before collapse a shear zone develops between the void and the surface. (c) The collapse sink in which the soil plug falls, masking the bedrock inlets.

Illustration 7 - Schéma conceptuel d'une montée de cloche de fontis dans une couverture meuble coiffant un calcaire karstifié non saturé dans sa partie supérieure. Ce schéma pourrait correspondre à un mode d'apparition de fontis sur le glacis d'Olivet (d'après White & White, 1986)

Par rapport aux schémas conceptuels présentés ci-dessus, qui sont basés sur le soutirage/suffosion des matériaux de couverture vers le karst, l'autre processus d'apparition de fontis est la rupture du toit calcaire (aussi décrit comme une « rupture de banc raide »). Ce processus est généralement mis de côté dans les études sur les effondrements karstiques en contexte carbonaté, car la dissolution des carbonates et l'évolution des vides en résultant est un phénomène très lent à l'échelle centennale (Waltham et al. 2005) ; de fait les ruptures de toit et l'apparition de dolines d'effondrement se produisent sur des échelles de temps longs.

De fait, l'étude iFontis se focalise sur les processus de soutirage/suffosion menant à l'apparition de fontis dans le contexte géologique du Val d'Orléans.

1.3. CHOIX DU SITE EXPERIMENTAL

Après analyse de plusieurs sites potentiels (cf. rapport intermédiaire, Perrin et al. 2015), le site expérimental a été installé à l'ouest de Jargeau, sur et à proximité de la digue et à environ 200 m de la Loire (Illustration 10). Un fontis de taille significative (10x5 m, fontis F1, Illustration 10 & Illustration 10) empiète sur le pied de digue côté Loire : sa présence est attestée sur la carte de Desprez (1976) où il est cartographié comme « doline », sa partie nord s'est cependant réactivée en automne 2013 (constat lors d'une visite de site). En outre, un nouveau fontis (F2) est apparu en décembre 2013 dans un champ à proximité. Il semblait donc possible, en début de projet, que des mouvements de terrain soient décelables sur la durée du projet. A proximité de ce deuxième fontis, un autre fontis (F3), désormais rebouché, était apparu en novembre 2008 (Illustration 9).



Illustration 8 – Carte indiquant les fontis connus et les forages dans les environs du site expérimental de Jargeau/Darvoy



Illustration 9 – Photos des fontis apparus récemment à proximité immédiate du site de Jargeau/Darvoy : en haut fontis en pied de digue s'étant réactivé à l'automne 2013 (F1), en bas à gauche fontis apparu en Décembre 2013 (F2), en bas à droite fontis apparu en Novembre 2008 (F3, document SSL)

2. Caractérisation du site expérimental

2.1. GEOPHYSIQUE ET FORAGES

2.1.1. Profils géophysiques

Trois panneaux électriques de 315 m avec un espacement entre électrodes de 5 m (acquisition en dispositif dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger) ont été réalisés le 17/02/2014 afin de définir les emplacements les plus favorables pour l'implantation des piézomètres du site expérimental (2 piézomètres au calcaire et 1 piézomètre aux alluvions). Les résultats détaillés sont présentés Annexe 2 et dans Perrin et al. (2015).

2.1.2. Forages des piézomètres

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

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

La localisation des forages est présentée par les cartes et image suivantes (Illustration 10). Les forages ont été réalisés avec le système ODEX de tubage à l'avancement dans la partie alluvions puis au marteau fond de trou dans la partie calcaire (Illustration 11).

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

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



Illustration 10 – Carte de localisation des ouvrages finalisés (Pz1, Pz2bis et Pz3bis) et comblés (Pz2 et Pz3) (Source : IGN – extrait de carte au 1/25000 au-dessus, photo aérienne – BD Carto en-dessus)



Illustration 11 – Réalisation du forage Pz1 en sommet de digue

Le tableau ci-dessous récapitule les principales informations sur les trois piézomètres réalisés (coordonnées, profondeur, tubages, niveau statique). Le log géologique et technique des forages peut être consulté à l'Annexe 3.

	Pz1 (calcaire)	Pz2bis (alluvions)	Pz3bis (calcaire)
N°BSS	03984X0596	03984X0597	03984X0598
Coordonnées (Lambert93)	X= 633096.38	X= 633098.33	X= 633095.62
	Y= 6752426.92	Y= 6752394.30	Y= 6752391.70
Altitude sol ² (m)	106,25	101,07	101,10
Profondeur finale (m/sol)	26,80 m/sol (le fond s'est rebouché suite à effondrement)	8,08 m/sol	25,30 m/sol
Hauteur du casing (m)	0,55	0,95	0,90
Profondeur finale (m/tube)	27,30 m/réf	9,07 m/réf	26,20 m/réf
Profondeur forée (m/sol)	31 m	8,50 m	25,35 m
Niveau statique	10,84 m/réf	6,55 m/réf	
Le 11/07/2014	10,29 m/sol	5,60 m/sol	
Niveau statique le 03/09/2014	11,30 m/réf	6,47 m/réf	6,53 m/réf
	10,75 m/sol	5,52 m/sol	5,63 m/sol
Altitude nappe le 03/09/2014	95,50	95,55	95,47
Partie tubée	0-16,60 m	0-4,90 m	0-11,7 m/sol

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

Sur<u>Pz1</u> :

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

Sur Pz2bis :

• Gamma Naturel.

² Nivellement avec rugby 100 (Leica) et référence altitude 101,10 m Pz3bis issu du MNT Lidar DREAL ; l'altitude sol correspond à la cote NGF au niveau du sol

Sur le forage agricole à la sortie de Darvoy (n° BSS 03984X0017) :

- Gamma naturel.
- Inspection vidéo.

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

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

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

2.2. CAMPAGNE PIEZOMETRIQUE

Desprez (1967) a réalisé une carte piézométrique de l'ensemble du Val d'Orléans pour la nappe des Calcaires de Beauce. Cette carte a permis de proposer des axes de drainage karstique préférentiels dans l'ensemble du Val (Illustration 12).



Illustration 12 - Zoom sur la carte piézomètrique de Desprez et les axes de drainages préférentiels (Desprez, 1967)

Une campagne piézométrique à proximité du site d'étude sur les communes de Darvoy et Jargeau a été réalisée les 9 et 10 juin 2015 et a permis d'obtenir une vingtaine de points de mesure (Illustration 13). La principale difficulté rencontrée a été la faible quantité de forages agricoles ou privés dans la zone investiguée, de plus, la période d'étiage de la nappe au moment de la campagne a impliqué le tarissement d'un nombre significatif des puits visités. Les données altimétriques des points de mesure ont été récupérées depuis le MNT Lidar du Val d'Orléans (mailles de 1 m²). La carte piézométrique obtenue (Illustration 13) permet de déterminer un gradient hydraulique de la nappe d'environ 0,05 % de l'est vers l'ouest ; par contre elle ne permet pas de définir d'axes de drainage préférentiel dans la nappe. La faible quantité de points de mesure ainsi que la précision des cotes piézométriques peuvent en être la cause.



Illustration 13 - Esquisse piézomètrique autour de Jargeau début juin 2015

2.3. TESTS HYDRAULIQUES

Des tests hydrauliques ont été réalisés afin de caractériser les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, connectivité) des nappes au droit du site expérimental.

2.3.1. Pompage d'essai sur Pz1

Un pompage d'essai à débit quasi-constant sur Pz1 (pompage de 40 m³/h) avec suivi piézométrique sur Pz2bis et Pz3bis, a été réalisé entre le 10 et le 13 septembre 2014.

Le test a débuté à 10h38 le 10/09 à un débit constant de 35 m³/h ; le rabattement induit par les pertes de charge quadratiques atteint 54 cm sur Pz1 (Illustration 14). Le pompage a dû être interrompu à 20h à cause de fuites importantes en tête d'ouvrage (détérioration d'un joint au raccord de tuyaux). Aucun rabattement n'a été mesuré sur Pz2bis et Pz3bis.

Il a repris le 11/09 dès 10h pour se dérouler normalement jusqu'au 13/09 à 10h30, soit une durée totale de pompage de 48h30. Le débit stabilisé a été de 40 m³/h et le rabattement sur Pz1 de 1 m. Aucun rabattement n'a été mesuré sur Pz2bis et Pz3bis. Vers 23h le 11/09, les niveaux piézométriques ont commencé à remonter sur les piézomètres (Pz2bis et Pz3bis) et également sur le forage pompé Pz1. Cette remontée des niveaux s'est poursuivie jusqu'à la fin du pompage et au-delà. En fin de pompage, elle a atteint 42 cm sur tous les ouvrages. Cette remontée est attribuée à la montée du niveau de la Loire qui s'est produite en parallèle (données DREAL).



Illustration 14 - Résultats obtenus lors de l'essai de pompage (débits et niveaux d'eau observés)

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

Le débit de pompage décroit durant les 500 premières minutes pour se stabiliser autour de 40 m³/h. Une correction est apportée également au débit en début d'essai par interpolation entre les valeurs mesurées (Illustration 15).



Illustration 15 - Interprétation du pompage d'essai à l'aide du logiciel Ouaip (BRGM)

Les résultats du pompage d'essai montrent une très forte transmissivité (0,2 m²/s). Les pertes de charges quadratiques, bien que relativement faibles, sont responsables de 90 % du rabattement. Ce phénomène est typique des captages d'eau dans les aquifères karstiques, où la perméabilité de l'aquifère est bien plus importante que celle du dispositif de captage (crépine et pompe). Le coefficient d'emmagasinement ne peut être estimé par cet essai.

2.3.2. Slug test sur Pz2bis

Un test par choc hydraulique (« slug test ») a été réalisé le 1 septembre 2015 au niveau du forage aux alluvions Pz2bis afin de déterminer sa perméabilité. Ce test consiste à produire un choc hydraulique dans un forage, puis à suivre l'évolution du niveau d'eau dans le temps. Cet essai est particulièrement adapté à l'évaluation de la perméabilité des milieux aquifères faiblement perméables. De plus, il est très facile à mettre en œuvre, il ne nécessite que peu de matériel et est réalisable rapidement (Illustration 16).



Illustration 16 - Réalisation du slug test

Le choc hydraulique s'est déroulé durant la période d'étiage, à une période où le niveau d'eau dans le puits était bas (94,25 m NGF). Seule la base des alluvions (1,5 m) est saturée en eau. Environ 18 L d'eau ont été ajoutés de manière brutale dans le puits afin d'observer le retour à la normale du niveau de la nappe, le test a été répété à trois reprises. Le niveau d'eau dans le piézomètre est suivi à l'aide d'une sonde DIVER qui enregistre les données toutes les 10 secondes (Illustration 17).



Illustration 17 - Variation du niveau d'eau dans Pz2bis durant le Slug Test

La méthode d'analyse du Slug Test est celle de Bouwer et Rice (1976). La perméabilité moyenne obtenue après les trois essais est d'environ 1,45.10⁻⁶ m/s. Cette valeur correspond à des argiles fines alors que les alluvions du Val sont majoritairement composées de sables et de graviers. Cette valeur relativement faible peut être due à l'hétérogénéité supposée des terrains ainsi qu'à la faible dimension du terrain investigué (i.e., mesure pouvant être peu représentative d'un volume d'alluvions plus important). En effet, seul le voisinage immédiat du forage entre en compte dans cet essai, les hétérogénéités dans les alluvions peuvent perturber les résultats d'autant plus en étant en période d'étiage. Il serait intéressant de réaliser le même test dans une période de haut niveau de la nappe alluviale, afin de comparer avec la valeur de perméabilité obtenue lors de cet essai.

2.4. ESSAIS DE TRAÇAGE

2.4.1. Traçages au cours du pompage d'essai

Quatre opérations de traçage ont été réalisées durant le pompage dans le but d'apporter des connaissances sur l'organisation des conduits karstiques autour de la zone d'étude, ainsi que de vérifier la relation entre le fontis et l'axe principal de drainage dans le Val. Certaines injections ont dû être répétées en raison de l'interruption accidentelle du pompage, d'autres pour adapter les quantités de traceurs aux investigations menées. Le descriptif complet de ces opérations est donné dans l'Annexe 4.

En chaque point d'injection et de suivi, des échantillons d'eau ont été prélevés immédiatement avant les injections (ou le démarrage du suivi), de façon à déterminer les concentrations naturelles en traceurs. Ces prélèvements ont permis de réaliser une analyse des matières en suspension (MES) et des principaux ions dissous, dont les résultats sont reportés dans l'Annexe 5.

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

Points d'injection

Quatre points ont été tracés avec quatre traceurs différents :

- le fontis (F1), pour vérifier sa relation avec le drain principal et l'exutoire principal du système (source du Bouillon), ainsi qu'avec les nappes. Traceur utilisé : uranine,
- des pertes de la Loire en amont du site (aval de la plage de Jargeau) pour vérifier leur relation avec le fontis. Traceur utilisé : naphtionate de sodium,
- Pz2bis (en radial convergent). Traceur utilisé : chlorures (sous forme de NaCl),
- Pz3bis (en radial convergent). Traceur utilisé : sulforhodamine B.

Points de surveillance et mode de suivi

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

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

Déroulement des injections et quantités injectés

Fontis

Trois injections avec des quantités croissantes d'uranine ont été réalisées à la base du fontis pendant l'essai de pompage. En raison de la très courte distance entre le fontis et le forage Pz1, seule une quantité de 10 g d'uranine a été initialement injectée (10/09/14), pour éviter une éventuelle saturation des appareils de suivi ; aucune trace de traceur n'a été retrouvée à l'exhaure du pompage. L'opération a été répétée avec une quantité de 99 g d'uranine (11/09/14), avec le même résultat (pas d'uranine détectée). Pour vérifier la liaison fontis-Bouillon, une 3^{ème} injection (13/09/14 à 10h10) a été effectuée avec 891 g d'uranine ; malgré cette grande quantité de traceur, l'uranine n'a été retrouvée ni dans Pz1 (suivi jusqu'à 16h45), ni dans Pz3bis (suivi jusqu'à 17h), ni à la source du Bouillon (suivi jusqu'au 07/10/14).

Lors des trois injections le traceur a été chassé rapidement en utilisant l'eau d'exhaure afin d'optimiser les conditions d'injection (2-3 m³ d'eau de chasse). Une vidéo de l'injection du 13/09 est visible à l'adresse : <u>https://www.youtube.com/watch?v=QPsEKussOW0</u>.

Pz2bis

10 g de NaCl ont été injectés le 10/09/14 au toit de la nappe (5.8 m sous la surface) le 10/09/14 à 11h20. Une vidéo de l'injection est visible à l'adresse : https://www.youtube.com/watch?v=VM46ZUpkH1M.

• Pz3bis

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

• Pertes de la Loire à Jargeau

1 kg de naphtionate de sodium a été initialement injecté le 10/09/14 dans une perte active en Loire (N 47.87037°; E 2.11518°). L'interruption du forage a nécessité de renouveler cette injection le 12/09. La montée de la Loire entre temps ayant rendu cette première perte inaccessible, la seconde injection (2 kg de naphtionate de sodium) a été réalisée dans une autre perte située à proximité (N 47.87023°; E 2.11477°, dans un bras mort remis en activité par la montée des eaux). Les deux injections ont donné des résultats comparables, avec du traceur retrouvé à la fois au forage Pz1 et au piézomètre Pz3bis. Les vidéos des deux injections en Loire sont visibles aux adresses suivantes :

https://www.youtube.com/watch?v=agWoKs69CcE, https://www.youtube.com/watch?v=PVmm2RRAcQE

Résultats complets et interprétation

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

Les traçages réalisés à partir de ces deux ouvrages (NaCl au Pz2bis et sulforhodamine B au Pz3bis) n'ont donné lieu à aucune restitution de traceur à l'exhaure du forage, attestant l'absence de liaison hydraulique directe entre les points considérés (Annexe 4). La décroissance lente des concentrations des traceurs aux deux points d'injection (Illustration 18 & Illustration 19) est cohérente avec l'absence de connexion directe de ces points avec le forage, puisqu'elles montrent que les écoulements d'eau ne sont pas ou très peu affectés par le pompage.



Illustration 18 - Courbe de décroissance des concentrations en chlorures au piézomètre Pz2bis (suivi sonde de conductivité située vers 7.5 m sous la surface)



Illustration 19 - Courbe de décroissance des concentrations en sulforhodamine B au piézomètre Pz3bis (suivi fluorimètre de terrain GGUN FL-24)

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



Illustration 20 - Courbes de restitution de naphtionate de sodium à l'exhaure du Pz1 (courbe verte) et au piézomètre Pz3bis (courbe marron)

Ces résultats montrent que les conduits karstiques recoupés par le forage Pz1 et le piézomètre au calcaire Pz3bis se situent bien sur l'axe principal de drainage pertes-Bouillon. Toutefois, les vitesses de transit et les formes des courbes de restitution, différentes aux deux points (Illustration 20), et l'absence de liaison hydraulique directe entre ces 2 points, semblent indiquer que le traceur suit des cheminements différents depuis l'injection vers les deux forages.

Les résultats des analyses réalisées sur les prélèvements avant injection ou avant démarrage du suivi aux cinq points étudiés (perte en Loire, exhaure du forage Pz1, Pz2bis, Pz3bis et source du Bouillon) sont cohérents avec les informations tirées des traçages. La composition des eaux à l'exhaure du forage est proche de celles de la Loire et du Bouillon, et souvent intermédiaire entre les deux, notamment pour les paramètres discriminants des masses d'eau dans le Val d'Orléans que sont le calcium, le magnésium et les nitrates dissous, ainsi que les MES, traduisant que ces eaux sont majoritairement des eaux de circulation dans les conduits karstiques, tandis que les valeurs retrouvées aux piézomètres Pz2bis et Pz3bis sont à la fois distinctes des trois premières, et distinctes d'un piézomètre à l'autre, traduisant l'influence dominante des eaux de nappe, alluviale, et des calcaires de Beauce, respectivement (Annexe 5).

Enfin, la quantité de 890 g d'uranine injectée dans le fontis lors de la dernière opération de traçage de septembre 2014, n'a pas été suffisante pour démontrer la connexion du fontis avec la source du Bouillon, et donc sa communication avec un conduit karstique relié à l'axe principal de drainage pertes-Bouillon.

2.4.2. Traçage fontis / Bouillon du 01/07/2015

Le traçage fontis-Bouillon réalisé en septembre 2014 (2.4.1) n'ayant rien donné avec une quantité de 890 grammes d'uranine, il a été décidé de renouveler l'expérience le 1^{er} juillet 2015 avec 3 kilogrammes de traceur fluorescent. Cette quantité plus importante a pour but d'améliorer les chances de démontrer une connexion directe entre le fontis et l'exutoire du système.

Mise en place du traçage

L'injection du traceur dans le fontis s'est déroulée le 1^{er} juillet 2015 à 13h55, l'opération a pris environ 5 minutes puis une vingtaine de minutes pour le rinçage du bidon (afin d'assurer l'injection de la quantité maximale de traceur). La chasse du traceur a été assurée par l'injection dans le fontis d'environ 3 m³ d'eau pompée au forage Pz1, pendant 1h30.

Suivi du traçage

Afin de vérifier toutes les relations hydrauliques possibles, une surveillance a été mise en place en quatre points (Tableau 1).

	X (WGS 84)	Y (WGS 84)
Pz1 (conduit karstique)	2.10515	47.86882
Pz2bis (alluvions)	2.10515	47.86853
Piézomètre Ligérienne (alluvions)	2.08637	47.86627
Bouillon (exutoire du système karstique)	1.93725	47.85034

Tableau 1 : Localisation des points de prélèvements (coordonnées en WGS 84)

La surveillance au forage Pz1 a été assurée par un fluorimètre de terrain, qui a été laissé en place jusqu'au 2 juillet en fin de journée pour être remplacé par un fluocapteur (au charbon actif). Le fluocapteur a été récupéré le 16 juillet, soit deux semaines après l'injection.

La surveillance au piézomètre Pz2bis a été menée à l'aide du fluorimètre de terrain le 16 juillet, cela afin de rechercher la présence d'uranine dans la nappe alluviale à proximité du fontis. Un autre fluocapteur a été placé à 1,5 km en aval du fontis dans un forage aux alluvions appartenant à la Ligérienne des granulats ; il y a été laissé 2 mois.

A la source du Bouillon, un préleveur automatique a été installé à partir du 3 juillet à 14 heures. Le préleveur a été relevé le 9 juillet à 9h30, le 15 juillet à 9h30 puis récupéré définitivement le 29 juillet. Le pas de temps de prélèvement était toutes les 6 heures entre le 3 et le 15 juillet, puis toutes les 12 heures du 15 au 27 juillet. De plus, entre le 3 et le 15 juillet, un fluorimètre de terrain a été mis en place à côté du préleveur automatique afin d'avoir un pas de mesure plus fin (toutes les 5 minutes).

Analyses et résultats

Les analyses de traceurs fluorescents ont été effectuées à CETRAHE. Les échantillons prélevés au Bouillon ne présentent aucun signe de présence de traceur.

La mesure de fluorescence réalisée dans le forage Pz2bis montre également une absence de traceur. Aucun des fluocapteurs installés lors du traçage n'a présenté de traces d'uranine après analyse au laboratoire.

Bilan du traçage

Les résultats obtenus lors de ce traçage montrent qu'il n'y a pas eu de restitution de traceur dans les forages alentour ainsi qu'à la source du Bouillon. Cela signifie que le traceur injecté dans le fontis n'a pas rejoint les drains karstiques sur la durée de la surveillance (29 jours). Il n'y a donc pas de liaison rapide entre le fontis et le réseau karstique.

Le traceur est donc stocké au moins temporairement dans des volumes poreux au-dessus des drains karstiques, c'est-à-dire dans les alluvions saturées ou au toit du calcaire altéré/karstifié.

Même s'il n'y a pas eu restitution de traceur dans les deux points d'observation de la nappe des alluvions (Pz2bis et forage de la Ligérienne), on ne peut pas conclure à l'absence de traceur dans la nappe alluviale car ces deux points ne sont pas situés à l'aval immédiat du point d'injection.

2.4.3. Traçage Pz1 - Pz3bis du 01/09/2015

Un traçage a été réalisé le 1^{er} septembre 2015 afin de vérifier que les conduits karstiques au droit de Pz1 et de Pz3bis sont bien distincts. Dix grammes d'uranine dissous dans environ 50 L ont été injectés au niveau du conduit karstique de Pz1 (Illustration 21). Le traçage a été suivi à l'aide d'un fluorimètre de terrain, au pas de temps de 10 secondes, placé au niveau du conduit karstique de Pz3bis. Le fluorimètre a enregistré des données durant les deux heures qui ont suivi l'injection. Compte tenu de la faible distance entre les deux forages (environ 35 m) et la vitesse de circulation élevée dans le karst, si Pz3bis se trouvait en aval du conduit de Pz1, la restitution du traceur serait de l'ordre d'une vingtaine de minutes.

Or, aucune trace d'uranine n'a été détectée par le fluorimètre. Ce traçage confirme donc la présence de deux conduits karstiques distincts au droit des forages calcaires. En effet, le traçage de septembre 2014 entre Pz3bis et Pz1 avait montré que Pz3bis ne pouvait pas être en amont de Pz1.



Illustration 21 - Injection d'uranine dans Pz1 le 1^{er} Septembre 2015

2.5. DIAGRAPHIES SUR PZ1 ET PZ3BIS

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

Illustration 22).

Sur Pz3bis on observe également une anomalie thermique chaude en face du conduit et on voit que le traceur injecté 33 heures auparavant en sommet de nappe (sulforhodamine B) est resté essentiellement piégé dans la colonne d'eau au-dessus du conduit (Illustration 23). Cela illustre bien l'absence d'influence du pompage sur le piézomètre Pz3bis. Si le piézomètre avait été influencé, la masse du traceur aurait été dirigée rapidement vers le forage en pompage (Pz1).



Illustration 22 - Diagraphies de température et de turbidité sur la partie trou nu de Pz1 (réalisées le 13/09/2014 16h00-16h40)


Illustration 23 – Diagraphies de température et de sulforhodamine sur la partie trou nu de Pz3bis (réalisées le 11/09/2014 18h45-19h15)

2.6. CARTOGRAPHIE DES CONDUITS KARSTIQUES PAR GEOPHYSIQUE

L'emplacement des conduits karstiques dans le Val d'Orléans n'est que très peu connu alors qu'il s'agit des zones les plus susceptibles d'entraîner des risques de fontis ; ainsi un essai de détection d'un drain karstique a été entrepris. L'opération a consisté en un suivi par géophysique (résistivité électrique) durant une injection d'eau salée très conductrice dans le conduit karstique recoupé par le piézomètre Pz3bis. L'acquisition de profils géophysiques avant, pendant et après l'injection devrait permettre la détection du passage de la saumure dans le conduit et ainsi déterminer son emplacement.

Cette opération a été réalisée à deux reprises, le 30 juin et le 1^{er} juillet 2015. La deuxième journée a permis aux géophysiciens de tester une nouvelle méthode d'acquisition.

2.6.1. Préparation de l'opération

Avant la réalisation de l'opération, la connaissance du débit de l'eau dans le conduit est nécessaire pour connaître la concentration en sel nécessaire dans l'eau d'injection pour permettre une détection.

Estimation du débit

Les opérations de traçages entre les pertes en Loire et la source du Loiret montrent une vitesse moyenne de 150 m/h. Dans la partie la plus aval du Val d'Orléans, les vitesses peuvent atteindre les 300 m/h tandis qu'aux alentours de Sandillon elles sont comprises entre 111 et 150 m/h. Cependant, il s'agit d'une vitesse minimale calculée sur une longueur d'écoulement rectiligne faisant abstraction de la tortuosité des conduits karstiques. La tortuosité des conduits karstiques a fait l'objet d'études récentes (Fournillon, 2012 ; Worthington, 2014). L'analyse de nombreux systèmes karstiques à travers le monde a permis d'obtenir un coefficient de tortuosité médian de 1,44 ; avec 90 % des coefficients compris entre 1,15 et 2 (Worthington, 2014). Ainsi la vitesse rectiligne estimée dans le Val d'Orléans entre 100 et 150 m/h correspondrait à une vitesse réelle d'écoulement dans les conduits comprise entre 115 et 300 m/h.

Le traçage entre les pertes en Loire et les piézomètres Pz1 et Pz3bis (2.4.1) a montré une vitesse d'écoulement apparente comprise entre 80 et 172 m/h au niveau de Pz3bis (Tableau 2). En faisant l'hypothèse d'une section d'écoulement d'environ 1 m², le débit moyen dans le conduit est estimé à 150 m³/h.

	Première arrivée du traceur (heures après injection)	Temps au pic de concentration (heures après	Distance à la perte	Vitesse 1ère arrivée	Vitesse au pic de concentration
Pz1	3h20	6h00	739 m	222 m/h	123 m/h
Pz3bis	4h20	9h00	747 m	172 m/h	83 m/h

Tableau 2 : Résultats des traçages de septembre 2014 sur le site d'étude

D'après des modèles géophysiques préliminaires, l'anomalie de conductivité dans le conduit produite par le traceur salin doit être de + 20 % par rapport à la valeur initiale pour être détectée sur les profils géophysiques. Avant injection, l'eau à une valeur d'environ 350 μ S/cm, il faut donc obtenir une conductivité supérieure à 420 μ S/cm pour permettre la détection.

Le débit d'injection envisagé est au minimum de 2 m³/h, il existera donc un facteur de dilution au maximum de 75 pour l'eau qui sera injectée dans le conduit (environ 150 m³/h dans le conduit). Cela permet d'estimer la conductivité minimale de l'eau à injecter à environ 31,5 mS/cm.

Pour calculer la quantité de sel correspondant à une telle conductivité, une gamme d'étalonnage entre la conductivité et la concentration en sel a été réalisée au laboratoire (Illustration 24). La conductivité nécessaire correspond donc à une concentration en NaCl de 18,83 g/L.



Illustration 24 - Gamme étalonnage, conductivité/concentration en NaCl

2.6.2. Déroulement de l'opération

Les profils géophysiques réalisés se situent à 15 et environ 50 m à l'ouest du forage Pz3bis servant à l'injection (Illustration 25), donc en aval de l'injection ; ils sont composés chacun de 96 électrodes séparées de 2,50 mètres (cf. Annexe 6). Une électrode permettant l'envoi de courant dans l'eau salée du conduit karstique a été installée dans le forage afin d'optimiser la visibilité sur les profils de résistivités du sous-sol (méthode de mise à la masse). La méthode utilisée est celle des dipôles-dipôles. Des acquisitions sont réalisées en alternance sur les deux profils toutes les 7 minutes (contrainte technique de l'acquisition).



Illustration 25 - Localisation des profils géophysiques

L'eau salée est préparée dans une piscine hors-sol d'environ 6 m³ remplie avec de l'eau issue du forage Pz3bis à laquelle sont ajoutés des sacs de sel de déneigement (Illustration 26). Quelques dizaines de minutes sont consacrés à l'homogénéisation de la solution après remplissage de la piscine et introduction de toute la masse de sel prévue.



Illustration 26 - Préparation du dispositif d'injection

Première injection

Lors de l'opération du 30 juin 2015, la piscine a été remplie à un débit d'environ 1,5 m³/h pendant 3h45 (volume total d'environ 5,6 m³). Au total, 160 kg de NaCl ont été dilués dans l'eau donnant une conductivité finale de 46,5 mS/cm (mesurée avec un conductimètre de terrain).

L'injection s'est déroulée durant 2 heures à un débit moyen de 2,8 m³/h (donnant une conductivité dans le conduit de l'ordre de 700 μ S/cm en faisant l'hypothèse d'une dilution parfaite). L'acquisition des profils électriques a commencé une demi-heure avant le début de l'injection et s'est poursuivie jusqu'à 1 heure après la fin de celle-ci.

Deuxième injection

La deuxième injection s'est déroulée le 01 juillet ; le remplissage de la piscine a duré 3h45 avec un débit légèrement plus important que la veille (volume total d'environ 6,3 m³). La dilution de 175 kg de NaCl dans l'eau a permis l'obtention d'une conductivité moyenne de 45,3 mS/cm. L'injection de la solution salée a duré 1h34 à un débit moyen d'environ 4 m³/h.

2.6.3. Analyses et résultats

Résultats du monitoring sur le panneau électrique P1 (15 m en aval)

Les 2 premières acquisitions T00 et T0 réalisées avant injection montrent par différence la présence de 2 anomalies de faible amplitude (2 à 3 %) qui seraient en parfaite corrélation d'une part avec le conduit karstique intersecté par Pz3bis et d'autre part avec le conduit karstique correspondant au fontis situé en pied de digue à proximité de Pz1.

Sur les 4 acquisitions suivantes (T1 à T4) réalisées pendant l'injection, on ne voit pas d'évolution significative des 2 anomalies mises en évidence avant injection (Illustration 27). Au niveau de l'acquisition T5, réalisée à la fin de l'injection, l'anomalie centrée sur le conduit karstique de Pz3bis est caractérisée par une amplitude plus importante (> 5%) et une extension également plus importante (Illustration 27). Elle pourrait marquer le passage du panache salé. Les acquisitions réalisées après la fin de l'injection (T7 et T8) montrent un retour à la normale assez rapide (c'est-à-dire une anomalie du même type qu'au niveau de T0).



Illustration 27 – Variations de la résistivité électrique enregistrée sur le profil P1 (15 m en aval du piézomètre d'injection Pz3bis) lors de l'injection de la solution salée du 30 juin 2015

Résultats du monitoring sur le panneau P2 (50 m en aval)

Sur le panneau P2, situé à 50 m en aval du point d'injection, aucune anomalie significative n'a été mise en évidence (Illustration 28).



Illustration 28 - Variations de la résistivité électrique enregistrée sur le profil P2 (50 m en aval du piézomètre d'injection Pz3bis) lors de l'injection de la solution salée du 30 juin 2015 dans Pz3bis

2.7. SYNTHESE

L'ensemble des investigations menées sur le terrain a permis d'améliorer la connaissance du système hydrogéologique au niveau du site expérimental :

- La réalisation de la carte piézométrique 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.
- Le pompage d'essai réalisé dans le forage Pz1 a montré la très forte transmissivité des calcaires dans la zone karstique (0,2 m²/s), ce qui est cohérent avec le fait d'avoir atteint le conduit karstique. L'essai hydraulique visant à caractériser la nappe alluviale (slug test sur Pz2bis) a montré que les alluvions ont une faible perméabilité (1,45.10⁻⁶m/s) au niveau du site expérimental.
- Les opérations de traçages menées sur le site d'étude, ont servi à mettre en évidence la connexion directe entre des pertes en Loire à Jargeau et les conduits karstiques au niveau de Pz1 et Pz3bis. Elles ont également montré l'absence de connexion rapide entre le fontis et les conduits. La présence de deux conduits karstiques distincts au droit des forages Pz1 et Pz3bis a également été démontrée à partir des traçages.
- En étiage, le niveau de la Loire est perché de 2,2 m par rapport aux niveaux piézométriques mesurés dans les nappes alluviale et karstique.
- Les fluctuations de nappe atteignent une amplitude maximale de 3,4 m (cf. section 4.2).

Ces résultats, associés aux investigations géophysiques et aux coupes géologiques des forages, permettent de proposer la coupe hydrogéologique de l'Illustration 29. Il apparait qu'en période d'étiage, il est possible qu'une partie des formations alluviales soit désaturée ; en outre en période de hautes eaux, la zone non saturée entre le fond du fontis et le toit de la nappe alluviale ne fait plus qu'environ 2,5 m d'épaisseur.



Illustration 29 – Coupe hydrogéologique du site d'étude

3. Equipement du site

L'objectif du suivi de site est de mesurer de manière concomitante des paramètres physicochimiques dans les eaux souterraines (nappe alluviale et nappe karstique) et des paramètres indicateurs de mouvements de sol en surface. Pour ce faire, il a été choisi d'installer des capteurs dans les trois piézomètres et de réaliser des mesures des déformations à la surface du sol au niveau du fontis actif (nivellement, inclinomètres & accéléromètres).

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

- Un suivi de paramètres physico-chimiques (turbidité, conductivité, température) afin d'obtenir des informations sur les flux de matières en suspension (turbidité) et sur les interactions entre infiltration de la Loire, infiltration diffuse depuis la surface du sol, échanges entre nappe alluviale et nappe karstique (traceurs naturels conductivité et température).
- L'évolution des différences de charge hydraulique entre Loire, aquifère alluvial et aquifère karstique permettra de voir si l'apparition de fontis se corrèle avec certains seuils ou la répétition de certains écarts de charge par exemple.

3.1. INSTRUMENTATION DES PIEZOMETRES

Début septembre 2014, les piézomètres ont été équipés des capteurs de niveau, conductivité/température et de turbidité. Sur Pz1, étant donné la localisation en bordure de digue, l'acquisiteur a été placé au-dessus de la tête de forage, dans un coffret sécurisé. Le second acquisiteur récupère les données à la fois de Pz2bis et Pz3bis. Les forages étant situés dans un champ, il a été décidé d'enterrer l'acquisiteur, cette configuration ne gênant aucunement la transmission des données.

Les capteurs de niveau utilisés sont des sondes de pression hydrostatique de marque Vega, communiquant en mode HART pour une transmission numérique des données vers l'acquisiteur.

Les capteurs de conductivité/salinité et ceux de turbidité sont des capteurs numériques (communication Modbus RS-485) de marque Ponsel Mesure. Les technologies utilisées sont pour la conductivité le montage à 4 électrodes (2 graphite, 2 platine) et pour la turbidité la néphélométrie (infra-rouge à fibre optique). Tous les capteurs fournissent la mesure associée de température.

Les données acquises sont transférées automatiquement une fois par jour par télétransmission vers un serveur situé dans un datacenter sécurisé. La plate-forme de restitution, SIDEV (opérée et maintenue par DSA, <u>http://ifontis.brgm.sidev.org</u>), offre plusieurs fonctionnalités pour la visualisation et l'export des données :

- carte de localisation des forages avec affichage des dernières valeurs,
- fiches descriptives des stations avec coordonnées, matériel en place, vidéos, photos, tableaux récapitulatifs des forages, etc.,
- grapheur pour la création de profils de courbes,

- historique des variables avec export,
- interface de saisie manuelle pour la saisie des mesures ponctuelles.

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

Des visites de site mensuelles permettent une mesure manuelle des niveaux d'eau dans les trois piézomètres qui sont ensuite comparées avec les mesures automatiques pour correction de dérive instrumentale possible.

3.2. INSTRUMENTATION DU FONTIS

Des jalons ont été installés dans l'axe du fontis. Au total 6 jalons métalliques (J1-J6) d'une longueur de 1 m ont été installés le 26 juin 2014 en réalisant un trou à la tarière d'1 m de profondeur et en cimentant l'espace annulaire entre le jalon et le trou (Illustration 30). Les deux jalons situés dans la partie la plus profonde (J5, J6) ont été recouverts de sédiments suite à l'essai de pompage du mois de septembre et ont été remplacés par un nouveau jalon métallique (J5n) enfoncé dans le sol (pas de cimentation). En outre le 18 décembre 2014, 5 jalons métalliques d'une longueur de 1 m ont été ajoutés au sud-ouest du fontis dans un secteur où deux petites dépressions sont visibles. Ces jalons (Ja-Je) ont été simplement enfoncés dans le sol. L'emplacement des jalons est indiqué à l'Illustration 31.

Les capteurs de déformation ont été développés au cours du projet puis mis sur site progressivement à partir de la fin de l'année 2015. L'inclinaison est observée via un gyroscope 3 axes et un accéléromètre indique la vitesse de déplacement. Une quinzaine de capteurs, insérés dans des boîtiers étanches de dimension compacte (110x85x37mm) ont été mis en place dans et autour du fontis.

Les capteurs offrent une autonomie de plusieurs mois pour des mesures effectuées toutes les 10 minutes, hors communication NFC (récupération des données). La mémoire glissante permet un enregistrement de plus de 16 000 mesures. Une fréquence de 10 minutes correspond à 110 jours d'acquisition.



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





Illustration 31 – Levé topographique du fontis principal (en haut) et des affaissements secondaires (en bas) avec emplacements des jalons et des capteurs de déformation (ronds rouges)

4. Résultats des suivis du site expérimental

4.1. SUIVI DES DEFORMATIONS

4.1.1. Nivellements

Afin de suivre l'évolution de la topographie du fontis, et de voir les déformations subies par celui-ci, des mesures de nivellement ont été effectués tous les mois sur le site d'étude à partir de Septembre 2014. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un Rugby 100 de marque Leica, ainsi que d'une mire graduée. Les mesures sont réalisées sans déplacer l'appareil ce qui permet d'avoir une précision élevée dans l'ensemble des mesures. Cette précision est de plus ou moins 1,5 mm d'après la notice technique. La mire est positionnée successivement sur les jalons scellés dans le sol du fontis (Illustration 31).

Les mesures effectuées chaque mois ont ensuite été comparées au premier nivellement réalisé (03/09/2014) qui est considéré comme le nivellement de référence. Les déplacements des jalons mesurés tout au long du suivi du site sont très faibles (inférieurs à 3 mm pour J2, J3, J4 et jusqu'à 8 mm pour J5n) (Illustration 32). Les variations observées sur les trois premiers jalons sont imputables à l'incertitude sur la mesure (précision moindre en conditions de terrain que celle annoncée dans la notice) ; la baisse progressive observée au point bas du fontis sur J5n pourrait indiquer un phénomène naturel d'approfondissement lent.

Les jalons Jb à Je installés dans les petites dépressions secondaires à l'ouest du fontis principal (Illustration 31) présentent deux comportements distincts (Illustration 32) : les jalons Jd et Je (installés chacun dans deux dépressions) n'ont pas bougé alors que les jalons Jb et Jc (installés dans la même dépression) indiquent un approfondissement de l'ordre de 3 cm (Jb) et 1 cm (Jc). Ce léger approfondissement a également été observé visuellement sur site. L'approfondissement sur Jb s'est fait entre le 5 mai et le 2 juin 2015 ; celui sur Jc entre le 2 et le 30 juin 2015. Cette période correspond à la décrue de la Loire et la baisse concomitante des niveaux piézométriques.





Illustration 32 – En haut : Evolution de la topographie du fontis selon le grand axe jalonné par J2, J3, J4, J5n. En bas : évolution de la topographie des fontis secondaires jalonnés par Jb, Jc, Jd, Je

4.1.2. Capteurs de déformation

Le développement et le test des capteurs se sont déroulés sur une large partie du projet et les capteurs n'ont pu être installés sur site qu'après leur validation, soit progressivement à partir de la fin de l'année 2015. Les chroniques mesurées ne sont donc pas encore disponibles.

4.2. SUIVI DES NAPPES ALLUVIALE ET CALCAIRE

Les sondes de mesure et centrales d'acquisition automatiques situées dans chacun des forages du site d'étude enregistrent des données en continu depuis le début septembre 2014. Les données de niveau, conductivité et température sont acquises toutes les 15 minutes, les données de turbidité toutes les 5 minutes.

D'autres chroniques caractérisant l'hydrologie de la région ont pu être récupérées. Les données du niveau de la Loire à Orléans depuis 1965 et à Gien depuis 1984 provenant de la banque hydro (<u>http://www.hydro.eaufrance.fr</u>), les données de la station d'alerte de la qualité de l'eau à Orléans depuis 2014 issues des données de l'Orléanaise des eaux (données fournies par la Ville d'Orléans), ainsi que les données de température et conductivité au niveau de la source du Bouillon entre mars 2014 et mars 2015 provenant d'un suivi de l'ISTO. Ces chroniques permettent de compléter les données acquises sur le site de Jargeau.

4.2.1. Niveaux d'eau

Variations des niveaux

L'altitude du niveau des nappes alluviale et calcaire est acquise par les sondes automatiques des forages Pz1, Pz2bis et Pz3bis depuis septembre 2014. Les résultats du suivi piézométrique (Illustration 33) montrent des variations piézométriques pluri-métriques à l'échelle saisonnière et métrique à l'échelle d'une crue ; ces variations sont similaires dans la nappe des alluvions et la nappe karstique. Elles sont synchrones des fluctuations de niveaux d'eau mesurés sur la Loire (Illustration 33). Toutefois l'amplitude des variations semble plus importante dans les piézomètres ; cette différence peut être partiellement due au fait que les niveaux de Loire sont mesurés 15 km en aval du site expérimental ; on ne peut donc pas exclure que les fluctuations de Loire au droit du site soient plus importantes.

En période de décrue, un déphasage est visible entre les nappes alluviale et calcaire sur la période hivernale 2014-2015 (Illustration 34). Ce déphasage peut s'expliquer par la différence de diffusivité entre les deux nappes. Ce déphasage n'est plus détectable à partir du printemps 2015 ; cela peut être dû à des niveaux de nappe plus bas ou éventuellement à un changement du comportement du piézomètre aux alluvions Pz2bis suite à des prélèvements par pompage (développement de l'ouvrage résultant en une meilleure connectivité hydraulique).



Illustration 33 - Variations piézométriques enregistrées sur le site expérimental et niveaux journaliers de la Loire à Orléans (station Pont-Royal). Les précipitations journalières de la station d'Orléans-Bricy sont présentées dans le graphique supérieur (pas de données après Septembre 2015)



Illustration 34 - Zoom sur la période d'Octobre 2014 à Avril 2015 (hautes eaux). Un déphasage entre alluvions (Pz2bis) et calcaires (Pz1 & Pz3bis) apparaît en décrue

Nivellement Loire/site d'étude

Un nivellement a été effectué entre la tête de puits du forage Pz1 et la Loire situé à environ 250 mètres plein Nord (mesure du niveau au point X : 633110 ; Y : 6752620). Les mesures ont été réalisées vers 11 heures dans la journée du 30 juin 2015. Ces mesures montrent que le niveau de la Loire se situe 9,73 m plus bas que la tête de forage, celle-ci se trouvant à 106,80 m NGF, soit une altitude de 97,07 m NGF. Dans le même temps, une mesure dans Pz1 a donné une cote piézométrique à 94,85 m NGF, soit un niveau 2,2 m plus bas que celui de la Loire.

A la fin du mois de juin (période d'étiage), la Loire était perchée de 2,2 m au-dessus de la nappe. Il serait intéressant d'effectuer cette mesure à différentes périodes de l'année afin d'observer les variations de différences de niveaux entre nappe et rivière.

D'après les chroniques piézométriques et la chronique du niveau de la Loire, la Loire est en permanence perchée par rapport à la nappe au niveau de Jargeau. Durant la période de crue de l'hiver 2014-2015, l'écart entre les niveaux d'eau est d'environ 1 m, avec la Loire perchée par rapport à la nappe. Il semble donc que l'écart entre les deux niveaux se réduise en période de hautes eaux.

4.2.2. Température

Dans la nappe alluviale, la température de l'eau mesurée sur Pz2bis présente une faible variation saisonnière avec au minimum 11,8°C à la fin de l'hiver et 14°C début décembre (Illustration 35). Les changements de température se font de manière progressive, hormis en période de crue. Durant les crues automnales, la température de la nappe diminue tandis que pendant les crues hivernales et printanières, celle-ci augmente.

L'amplitude saisonnière observée dans le karst est beaucoup plus importante (Illustration 35). En effet, la température a varié entre 7°C et 22°C durant la période de mesure. Avant début avril, les sondes de Pz1 étaient situées au-dessus du conduit karstique (forage en trou nu avec une obstruction partielle au niveau du conduit ne permettant pas le bon positionnement des sondes). Les observations avant cette date ne correspondent donc pas avec celles dans Pz3bis (qui elles correspondent à l'eau des conduits karstiques). Les données de Pz1 sont plutôt représentatives de la température des eaux des calcaires de Pithiviers au-dessus des conduits, à l'exception des périodes de crues où la température s'équilibre avec celle des conduits. A partir de fin novembre 2015, la température mesurée sur Pz3bis s'écarte de celle mesurée sur Pz1 sans aucune intervention sur le terrain. Cet écart est inexpliqué à ce jour ; la poursuite du suivi pourra apporter un éclairage à ce sujet.

A titre de comparaison, les variations saisonnières de température à la source du Bouillon durant la même période sont de 9°C (de 9 à 18°C) et de 26°C (de 4 à 30°C) en Loire au niveau de Jargeau. Ces variations ont donc tendance à diminuer entre la Loire, les conduits karstiques au niveau du site expérimental et la résurgence du système au Bouillon.



Illustration 35 - Chroniques de température (°C) dans les trois piézomètres et cote piézométrique (mNGF) dans Pz2bis

4.2.3. Conductivité

La conductivité de la nappe alluviale mesurée dans Pz2bis est d'environ 600 μ S/cm avec une variation entre 450 μ S/cm en période hivernale et 700 μ S/cm durant la période d'étiage (Illustration 36). Celle de la nappe karstique mesurée dans Pz1 et Pz3bis se situe aux alentours de 300 μ S/cm avec des fluctuations entre 220 et 400 μ S/cm suivant la saison (à noter que la sonde de conductivité de Pz3bis donne des mesures erronées suite à une opération de calibration le 01/07/2015). Deux comportements sont visibles sur Pz1 correspondant au changement de positionnement de la sonde tel que décrit précédemment : avant début avril 2015, la conductivité baisse brusquement à chaque crue pour atteindre les valeurs mesurées dans Pz3bis qui sont représentatives de l'eau des conduits ; à partir de début avril, la conductivité est similaire à celle mesurée dans Pz3bis.

Dans la nappe alluviale (mesures sur Pz2bis), la conductivité augmente très rapidement durant les crues, ce comportement peut s'expliquer par une minéralisation plus importante de l'eau d'infiltration qui se charge en traversant la zone non saturée. A l'inverse, dans les conduits karstiques, une crue provoque une diminution de la conductivité.

La conductivité en Loire est inférieure à celles mesurées dans les conduits alors que les conductivités mesurées à la source du Bouillon sont supérieures à celles mesurées dans les conduits au niveau du site (Illustration 37). Un déphasage de 4 jours, mesurés sur un pic de dilution (période de crue), est visible entre les chroniques en Loire et au Bouillon. Plus de la moitié de l'augmentation de conductivité se produit sur 750 m, entre les pertes de Loire et le site expérimental. Ces mesures traduisent l'augmentation de la minéralisation de l'eau circulant dans le karst entre les pertes en Loire et la source du Bouillon.



Illustration 36 - Chroniques de conductivité (µS/cm) dans les piézomètres et cote piézométrique dans Pz2bis. Les valeurs mesurées par la sonde Pz3bis à partir du 01/07/2015 sont erronées



Illustration 37 - Evolution de la conductivité entre la Loire (station d'alerte Lyonnaise), les conduits karstiques (Pz3bis) et la source du Bouillon (sonde ISTO)

4.2.4. Turbidité

La turbidité désigne la capacité de l'eau à diffuser ou absorber la lumière, elle est principalement due à la présence de matière en suspension (MES) ou de colloïdes dans l'eau. Elle est mesurée en unité NTU et nécessite une calibration pour l'exprimer en fonction des MES (mg/L). A ce jour, la quantité de points de mesures où les MES ont été quantifiées ne permet pas d'établir une droite de calibration entre la turbidité et les MES.

Au niveau du forage Pz1, les données sont disponibles depuis le mois de septembre 2014 tandis qu'au niveau de Pz3bis elles le sont depuis début avril 2015 car auparavant la sonde de mesure n'était pas correctement positionnée. La sonde située dans Pz1 n'étant pas alignée avec le conduit karstique avant le mois d'avril 2015, seules les données à partir de cette date sont représentatives des MES circulant dans le conduit karstique (Illustration 38). Les données de turbidité mesurées dans Pz3bis sont très bruitées ; cela peut être dû à l'influence du conduit colmaté recoupé sous le conduit karstique actif lors du forage.

Malgré un signal généralement bruité, les chroniques sur Pz1 montrent une augmentation systématique de la turbidité lors des crues (Illustration 38). Cette augmentation pourrait être causée par l'arrivée de la Loire qui est plus turbide lors de ces évènements.



Illustration 38 - Chronique de turbidité dans le conduit karstique (Pz1) ; les données enregistrées sur Pz3bis sont très bruitées et ne sont pas montrées

L'analyse des variations de la turbidité mesurées à la source du Bouillon et sur Pz1 et Pz3bis ne présente pas de corrélation particulière. La turbidité au Bouillon montre d'importantes fluctuations journalières avec un maximum à 17-18 h et un minimum vers 7 h (Illustration 39) qui sont probablement dues à la prolifération d'organismes photosynthétiques constatée lors de nos visites sur site. Le maximum de turbidité correspond au moment où la luminosité et la température extérieure commencent à diminuer.



Illustration 39 - Evolution de la turbidité au Bouillon

4.3. SUIVI HYDROCHIMIQUE

Une visite à fréquence mensuelle entre mai et septembre 2015 (5 campagnes) a permis le prélèvement et l'analyse de l'eau sur le site d'étude ainsi qu'en amont et en aval de ce dernier.

Le point de prélèvement amont se situe en Loire, à proximité de la plage de Jargeau, et en amont immédiat des pertes du fleuve (coordonnées : 47,8690°N, 2,1216°E). Le point aval correspond à la source du Bouillon. Les mesures sur le site ont été effectuées dans les piézomètres Pz1 et Pz3bis au niveau des conduits karstiques ainsi que dans le piézomètre aux alluvions Pz2bis.

Ces cinq campagnes d'analyses et de prélèvements ont eu lieu durant le stage ingénieur de Sylvain Pasquier, les 5 mai, 2 juin, 26 au 30 juin, 29 juillet, et 31 août au 1^{er} septembre 2015. Elles ont été complétées par une campagne similaire le 28 janvier 2016, ainsi que par les analyses réalisées lors de la campagne de traçage de septembre 2014 (2.4.1).

Les échantillons prélevés (500 mL en chaque point, dans des flacons en verre remplis à ras bord par le fond), ont été conservés au froid et à l'obscurité, puis analysés dans la plupart des cas dans les 24 h après leur prélèvement. Les résultats complets sont présentés dans l'Annexe 5.

4.3.1. Paramètres physico-chimiques mesurés dans la Loire, le karst et la source du Bouillon

Les mesures in-situ ont permis de mesurer quatre paramètres (température, conductivité, pH, O₂ dissous ; Annexe 5).

Entre mai et septembre 2015, le pH en Loire a été caractérisé par deux gammes de valeurs, celui correspondant à la période de crue de début mai avec un pH de 7,55 et la période d'étiage où il a varié entre 8,45 et 8,75. Dans les conduits karstiques, les valeurs étaient très proches avec une moyenne de 7,55 dans Pz1 et de 7,46 dans Pz3bis. La nappe alluviale présentait des valeurs de pH plus faibles, entre 6,94 et 7,38 et une moyenne de 7,15. Au niveau de la source du Bouillon, les valeurs de pH sont restées extrêmement stables avec une moyenne de 7,56 (valeurs comprises entre 7,50 et 7,59).

Le pH mesuré en Loire dépend fortement de l'activité photosynthétique, comme le montre par exemple la valeur de 8,71 mesurée le 30 juin, associée à une teneur en O₂ dissous de 135 %, à la présence d'un biofilm dominé par des diatomées et à un fort ensoleillement. Dans ces conditions, le pH varie très fortement entre la Loire et les conduits karstiques suivis, puis reste relativement stable entre Pz1 et Pz3bis et la source du Bouillon. Pendant la période de crue de mai 2015, le pH était remarquablement stable de l'entrée à l'exutoire du système.

La conductivité en Loire se caractérisait par une valeur de 201 μ S/cm pendant la période de crue de mai 2015 et a été comprise entre 277 et 310 μ S/cm durant l'étiage. Dans la nappe alluviale, les valeurs mesurées ont présenté de fortes valeurs et une faible variabilité (616-626 μ S/cm), à l'exception de la mesure du 29 juillet, encore supérieure. La conductivité dans les conduits karstiques est en moyenne de 335 μ S/cm avec des valeurs plus faibles durant la période de crue. A la résurgence du système (Bouillon), la conductivité est similaire à celle des conduits au droit du site d'étude à Jargeau.

Lors de la dernière campagne de terrain du 28 janvier 2016, aux conditions hivernales peu marquées, les valeurs de tous ces paramètres en Loire étaient intermédiaires entre les valeurs de crue et d'étiage des campagnes de 2015.

Ces valeurs correspondent aux valeurs provenant des sondes automatiques, et marquent bien un enrichissement en minéraux entre l'eau de la Loire, les conduits karstiques au niveau du site expérimental et la source du Bouillon. La quasi-totalité de l'augmentation de la conductivité et par conséquent minéralisation se produit entre les pertes en Loire et les conduits karstiques sur le site d'étude de Jargeau. En seulement 800 mètres de parcours souterrain la conductivité de l'eau change plus que durant la dizaine de kilomètres entre les piézomètres et la source du Bouillon.

Comme observé dans les chroniques de température en Loire, dans les forages et au Bouillon, les variations de températures correspondent à des variations saisonnières. L'amplitude des variations est plus importante en Loire qu'au niveau du karst et de la source du Bouillon, en raison d'une mise à l'équilibre progressive avec l'eau de la nappe calcaire.

4.3.2. Eléments majeurs

Les analyses réalisées sur les prélèvements ont permis de déterminer les teneurs en éléments majeurs dissous dans l'eau (Annexe 5). Une représentation en diagramme de Piper (Illustration 40) montre la signature chimique des différents points d'eau échantillonnés : les eaux de la nappe alluviale (Pz2bis) se distinguent des eaux du karst (Pz1, Pz3bis, Bouillon) qui sont très similaires ; en outre les eaux de la Loire sont proches de celles du karst montrant la très grande influence de la Loire sur la nappe karstique. Toutes ces eaux présentent un faciès hydrochimique de type bicarbonaté-calcique.

Une représentation des données hydrochimiques en diagramme de Schoeller (Annexe 7) met également en évidence ces signatures géochimiques différentes.



Illustration 40 - Diagramme de Piper montrant les caractéristiques chimiques des différents points d'eau prélevés

La nappe alluviale présente, sur la période de mesure, une très faible variabilité en ions majeurs (Annexes 5 & 7). Seule une légère hausse en sodium/potassium est apparue lors d'une mesure (2 juin 2015). La chimie de cette nappe se distingue nettement de celle de la nappe karstique (Illustration 40).

La chimie des eaux de la nappe karstique est influencée par les crues (Annexes 5 & 7) avec notamment un effet de dilution et par une évolution des ions Ca et HCO_3 depuis la Loire jusqu'à la source du Bouillon en passant par les piézomètres Pz1 et Pz3bis par l'effet des processus de dissolution (voir 5.1.3).

4.4. ANALYSES MINERALOGIQUES

Les échantillons provenant des cuttings des forages ainsi que des matières en suspension provenant des prélèvements d'eau sur 3 sites (Loire, Pz1 et Pz2bis) ont été analysés par diffractométrie des rayons X afin de connaître leur minéralogie. L'objectif de ces analyses était d'identifier des traceurs minéralogiques pouvant permettre de préciser la provenance des matières en suspension circulant dans les conduits karstiques (origine fluviale ou alluviale par soutirage/suffosion). L'eau du Bouillon étant très peu chargée (< 1 mg/L) pendant toute la période d'étude, la quantité de MES récupérée n'a pas été suffisante pour effectuer les mêmes analyses à l'exutoire du système.

4.4.1. Préparation des échantillons et analyses

Les échantillons provenant des cuttings de forage, après avoir été séchés, ont subi un premier broyage à l'aide d'un vibro-broyeur à disques oscillants de marque Aurec.

Les échantillons de matières en suspension contenues dans l'eau de la Loire et des forages Pz1 et Pz2bis, ont été récupérés suite à la filtration de plusieurs dizaines de litres d'eau. L'eau du Bouillon étant très peu turbide (< 1 mg/L), la quantité récupérée n'a pas été suffisante pour effectuer les analyses. Les MES présentes dans l'eau ont pu être analysées seulement lors de deux campagnes de terrain, à la fin du mois de juillet et au début du mois de septembre 2015.

L'ensemble des échantillons a subi un broyage fin dans un mortier en agate afin d'uniformiser la granulométrie des poudres.

L'analyse de la minéralogie a été réalisée dans un diffractomètre INEL avec un montage en transmission (géométrie Debye-Scherrer). Les différentes phases minérales ont été obtenues à partir des fichiers ICDD-PDF de 1997. Ce type de montage permet de connaître précisément la composition des matières minérales mais il ne permet pas de connaître la proportion de chaque phase minérale.

4.4.2. Résultats

L'ensemble des résultats obtenus sont présentés dans le mémoire de stage de Pasquier (2015).

Les cuttings du forage Pz2bis dans les alluvions ont été analysés entre 4 et 9 m de profondeur par rapport au sol. Entre 4 et 6 m, la minéralogie des alluvions est constituée presque exclusivement de quartz (présence d'albite et d'orthose également). Sur l'échantillon inférieur (entre 6 et 7 m) il faut noter une faible présence de calcite. Au niveau des deux derniers échantillons, la calcite a la même intensité que le quartz dans les diffractogrammes. Cela traduit une forte présence de calcaire dans les deux derniers mètres des alluvions au droit de Pz2.

Cette zone riche en calcaire est interprétée comme étant le début de la zone d'altération des calcaires (toit de la zone épikarstique).

L'échantillon provenant des alluvions au droit du forage Pz3bis (entre 8 et 9 m par rapport au sol), montre une minéralogie similaire au troisième échantillon de Pz2 (entre 6 et 7 m), c'est-àdire, une majorité de quartz avec une faible présence de calcite. Ce résultat implique une forte variabilité du niveau du toit des calcaires, en effet, les deux forages sont séparés de seulement 5 m et présentent la même minéralogie à 2 m de profondeur de différence.

Les matières en suspension en Loire sont majoritairement constituées de quartz et de calcite (Illustration 41). Des argiles sont également présentes (chlorite) mais cette méthode d'analyse ne permet pas d'identifier précisément la minéralogie des argiles.



Illustration 41 - Comparaisons des résultats de DRX sur les MES en Loire

Les MES issues de la nappe alluviale (Pz2bis) sont majoritairement composées de calcite et de quartz, au même titre que les MES provenant du conduit karstique Pz1. Seuls les pics concernant les argiles sont différents, sans qu'il soit possible de savoir avec certitude de quel type d'argile il s'agit.

Ces résultats peu discriminants, ainsi que l'impossibilité d'analyser les MES à l'exutoire du système (Bouillon) pendant la période d'étude, ne permettent donc pas d'en déduire si des processus de soutirage/suffosion pourraient contribuer à la charge particulaire des eaux des conduits karstiques et à l'apparition de fontis dans le Val.

5. Interprétation des résultats et implications pour la gestion du risque d'effondrement

5.1. INTERPRETATION DES MESURES DE SITE

5.1.1. Charges hydrauliques

A la suite des périodes de crues, un déphasage est visible entre les variations de charges des nappes alluviales et des calcaires (Illustration 42). Ce déphasage peut s'expliquer par la différence de diffusivité entre les deux nappes. Ce déphasage n'est plus détectable à partir du printemps 2015 ; cela peut être dû à des niveaux de nappe plus bas ou éventuellement à un changement du comportement du piézomètre aux alluvions Pz2bis suite à des prélèvements par pompage. La charge plus importante dans la nappe alluviale pendant les périodes de décrue est un élément pouvant favoriser le soutirage/suffosion d'alluvions vers le karst. En effet, le différentiel de charge entre les deux nappes oriente les écoulements de la nappe alluviale vers la nappe calcaire permettant l'entraînement de matières en suspension issues de la couverture. Cette érosion interne peut permettre l'évolution progressive d'une cloche de fontis à la base des alluvions.



Illustration 42 - Différence de charge entre nappe alluviale (Pz2bis) et calcaire (Pz1)

5.1.2. Paramètres physico-chimiques

La mesure des paramètres physico-chimiques a permis de bien démontrer l'alimentation prédominante des conduits karstiques recoupés par Pz1 et Pz3bis par les pertes de Loire avec un fort marquage saisonnier des températures et des valeurs de conductivité bien inférieures à celles mesurées aux alluvions dans Pz2bis.

Les chroniques de turbidité sont fragmentaires à ce stade et ne permettent pas une analyse détaillée ; cependant il semble que des pics de turbidité dans les conduits karstiques sont associés aux crues de la Loire et donc que la turbidité est essentiellement d'origine fluviale.

5.1.3. Dissolution des calcaires

Saturation en calcite

L'indice de saturation en carbonate de calcium a été calculé à l'aide du logiciel Diagramme (code Phreeq). Un indice de saturation en calcite inférieur à -0,5 caractérise une eau soussaturée en carbonate de calcium. Une telle eau a tendance à dissoudre le calcaire. Un indice de saturation proche de 0 signifie que l'eau est à l'équilibre avec le CaCO₃. Un indice de saturation supérieur à 0,5 met en évidence une sursaturation en carbonate de calcium dans l'eau et par conséquent une tendance à la précipitation de calcite.

Cet indice a pu être calculé pour cinq campagnes de prélèvements (Tableau 3).

Is Calcite	mai-15	début juin-15	fin juin-15	juil-15	janv-16
Loire Jargeau	-0,48	0,96	0,94	0,89	-0,29
Pz1	-0,28	-0,10	0,20	-0,08	-0,14
Pz2bis	0,04	-0,03	0,07	-0,05	-0,21
Pz3bis	-0,23	-0,02	-0,12	-0,12	-0,31
Bouillon surface	-0,25	-0,12	-0,06	-0,09	-0,07

Les valeurs indiquent une sursaturation en calcite dans la Loire qui peut être assez importante, à l'exception des périodes de crue où l'eau devient sous-saturée. L'eau du Bouillon était à l'équilibre à l'exception de la crue de mai 2015 où il y avait une légère sous-saturation en calcite. Dans les alluvions, la période légèrement sous-saturée a été celle de janvier 2016. Dans les conduits karstiques recoupés par les piézomètres Pz1 et Pz3bis, la situation a été plus contrastée, variant de la saturation à l'étiage à la légère sous-saturation en période de crue pour Pz3bis, mais avec en plus une période de légère sursaturation en Pz1 en juillet 2015.

Ces résultats indiquent globalement que l'eau est plus agressive pour le calcaire en période de crue, et qu'il y aurait une tendance à la précipitation au début de l'entrée de l'eau dans le karst en période estivale (étiage). Toutefois, de nombreuses réactions entrent en jeu lors du passage de l'eau de la Loire au karst. En effet, la charge organique présente dans les eaux de la Loire permet une oxydation de celle-ci, provoquant la libération de CO₂ et donc une baisse du pH qui provoque la dissolution des calcaires (Alberic & Lepiller 1998).

Enrichissement en calcium

Afin de quantifier la dissolution du calcaire dans les conduits karstiques du Val d'Orléans, une analyse portant sur la variation de la quantité de calcium dans l'eau a été réalisée.

Les concentrations en calcium augmentent entre la Loire et les conduits karstiques au niveau du site de Jargeau (Tableau 4). L'enrichissement en calcium se produit essentiellement entre la Loire et les piézomètres Pz1 et Pz3bis.

Ca ²⁺ (mmol/L)	sept-14	mai-15	début juin-15	fin juin-15	juil-15	janv-16
Loire Jargeau	0,94	0,82	1,16	0,97	0,93	0,84
Pz1	1,23	1,06	1,53	2,06	1,19	1,13
Pz3bis	1,66	1,43	1,76	1,13	1,10	1,40
Bouillon surface	1,21	1,07	1,39	1,13	1,38	1,04

Tableau 4 : Concentrations en calcium aux points de prélèvement

A partir de cette augmentation en calcium, il est possible de faire une première estimation de la vitesse d'évolution du diamètre des conduits (Binet & al. 2010).

La connexion entre les pertes de Jargeau et les conduits karstiques a été prouvée par le traçage réalisé en septembre 2014. De plus, des traçages antérieurs ont permis d'affirmer la connexion entre ces pertes et la source du Bouillon. Ces traçages ont permis d'obtenir une vitesse apparente de l'ordre de 130 m/h dans ces conduits. La section du conduit karstique est d'environ 1 m² sur la base du passage caméra effectué dans Pz1. La distance directe entre les pertes et les forages est d'environ 750 m, en considérant une tortuosité des conduits karstiques de l'ordre de 1,3 (Worthington 2014), la longueur du conduit a été estimée à 1000 mètres.

En moyenne l'augmentation de la quantité de calcium entre la Loire et les conduits karstiques au niveau du site expérimental est de 0,45 mmol/L. Les calculs effectués pour calculer l'augmentation de la taille du conduit karstique sont présentés ci-dessous. La masse molaire de la calcite est de 100 g/mol et sa masse volumique de 2700 kg/m³.

- (1) : Masse de calcite dissoute/an = Débit conduit * Mcalcite * gain en Ca⁺⁺ entre Loire et le karst
- (2) : Volume de calcite dissoute/an = (1) / masse volumique de la calcite
- (3) : Section du conduit après 1 an = (2) / longueur conduit + section initiale
- (4) Augmentation du diamètre après 1 an = 2 * $\sqrt{((3) / \pi)}$ diamètre initial du conduit

Dans notre cas de figure, la masse de calcite dissoute est de 51 tonnes par an, pour un écoulement constant de 130 m³/h, soit un volume d'environ 19 m³ de calcaire en moins. Cela correspond à une augmentation du diamètre du conduit de 1 cm/an.

Cette valeur est élevée mais cohérente avec le résultat obtenu par Binet et al. (2010) qui avaient mis en évidence une augmentation de l'ordre de 40 cm/100 ans entre les pertes et la source du Bouillon.

Une telle augmentation de la taille des conduits à proximité de la Loire, qui nécessite d'être validée par des études complémentaires, pourrait favoriser l'apparition de désordres dans cette zone.

5.2. ANALYSE DE LA DATE D'APPARITION DES DESORDRES

Les 52 fontis datés qui sont survenus dans le Val d'Orléans à partir de 1964 (absence de données hydrologiques avant) peuvent être divisés en quatre groupes : les fontis survenus pendant une période de décrue, ceux se produisant pendant le maximum de crue, ceux faisant suite à un étiage important et enfin ceux qui ne caractérisent pas un état remarquable (ex : niveau stable mais relativement haut...) (Illustration 43).



Illustration 43 - Localisation des fontis datés et information sur les conditions hydrologiques lors de leur apparition

Sur ces 52 fontis datés, 6 ont eu lieu sur le glacis d'Olivet (3 en crue, 3 en décrue) à proximité du Val d'Orléans et 4 ont eu lieu en zone nord du Val. Pour ces 10 fontis le contexte géologique et hydrogéologique est différent et donc les mécanismes menant à la rupture peuvent également différer. Sur les 42 fontis restant près de la moitié (45%) sont survenus pendant une période de décrue, 20 % pendant une période de crue, 20% durant l'étiage.

Sur une période plus courte de 6 ans (2010-2015) où l'information sur les dates d'apparition est la plus complète, le lien entre les variations du niveau de la Loire et l'apparition des fontis n'est pas évident (Illustration 44). Un constat similaire est fait par Gombert et al. (2014) sur la base d'une compilation de toutes les dates d'apparition de fontis.



Illustration 44 – Chronique du niveau de la Loire à Orléans Pont Royal et apparition de fontis sur la période 2010-2015 (en noir les fontis du Val, en gris les fontis du glacis d'Olivet)

5.3. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE

Afin de tester certaines hypothèses pouvant expliquer la distribution spatiale des fontis ou les conditions hydrodynamiques nécessaires pouvant favoriser le soutirage/suffosion, un travail de modélisation hydrogéologique a été mis en œuvre.

5.3.1. Interprétations à partir du modèle hydrogéologique existant (remontées de nappe)

Un modèle hydrogéologique maillé 3D a été réalisé à l'échelle du val d'Orléans par le BRGM (Martin & Noyer 2003), pour évaluer les secteurs potentiellement sujets aux inondations causées par une remontée de nappe. Le logiciel MARTHE développé par le BRGM a été utilisé. Ce modèle (grille carrée de 250 m de côté) comporte trois couches : une couche superficielle correspondant à la nappe des alluvions, une couche peu perméable intermédiaire et discontinue correspondant aux marnes de Blamont (présentes en amont du site expérimental) et une couche perméable correspondant aux calcaires de Beauce.

Le modèle a été calé en régime transitoire pour la période allant d'aout 1968 à février 1969. De ce modèle, on a extrait les cotes piézométriques maximales et minimales simulées dans la nappe alluviale (couche 1). La cote de la base de la couche 1 a également été exportée. Ces différentes informations spatiales ont été intégrées dans un SIG afin de comparer la variation spatiale de certains indicateurs (tels que la fluctuation piézométrique, l'épaisseur non saturée minimale ou le ratio épaisseur saturée/épaisseur non saturée en crue³) avec la distribution spatiale des fontis. La distribution spatiale des fontis est issue d'une base de données compilant différentes sources d'information (CETE, Desprez 1976 & 1977, Infoterre, DDT) tel que présenté par Perrin et al. (2014, 2015b).

Cette analyse montre que les fluctuations piézométriques sont plus marquées à proximité de la Loire (Illustration 45) de même que le ratio entre les épaisseurs d'alluvions saturées sur celles non saturées (Illustration 46). Les épaisseurs non saturées (Illustration 47) montrent une répartition spatiale hétérogène sans lien direct avec la position de la Loire (effets de la topographie). Les deux premiers paramètres pourraient partiellement expliquer la plus grande densité de fontis à proximité de la Loire : de fortes fluctuations piézométriques font varier le poids des sédiments dans le temps et peuvent contribuer à déstructurer les terrains ; un fort ratio épaisseur saturée vs. épaisseur non saturée doit potentiellement permettre la montée d'une cloche de fontis plus haut dans la pile de sédiments alluviaux. Cependant, un certain nombre de fontis se situent également dans des secteurs où les fluctuations piézométriques sont modestes et/ou le ratio épaisseur saturée vs. non saturée est inférieur à 1. Ce constat semble indiquer que d'autres facteurs sont également à prendre en compte dans les processus d'apparition de fontis. Il faut également souligner les limites prédictives du modèle hydrogéologique à une échelle très locale qui est celle des mécanismes à l'origine des effondrements (i.e., le modèle donne des tendances à l'échelle pluri-hectométrique, cf. grille de 250 m). Il faut aussi noter la présence de certains secteurs dans lesquels aucun fontis ne sont répertoriés (p.ex., rive sud de Loire à Orléans ; secteur au sud-ouest de Jargeau ou à l'est de St-Denis-en-Val). Il serait intéressant de chercher des raisons à cette absence de fontis, en particulier si elle n'est pas due à un défaut d'information.

³ Ce ratio semble pertinent car l'apparition de fontis par soutirage/suffosion est en tout cas en partie contrôlée par l'épaisseur saturée au sein de laquelle la cloche peut remonter (plus cette épaisseur est importante plus la cloche peut atteindre des diamètres importants) et par l'épaisseur non saturée qui correspond à l'épaisseur minimale du toit couvrant la cloche de fontis (plus cette épaisseur est faible, plus la probabilité d'effondrement du toit est grande). Des ratios élevés (p.ex. >2) peuvent donc correspondre à des contextes d'apparition favorables ; au contraire des ratios faibles (p.ex. <1) devraient correspondre à des secteurs peu favorables.



Illustration 45 - Fluctuations piézométriques maximales simulées dans la couche des alluvions sur une grille de 250 x 250 m (données extraites du modèle de Martin & Noyer 2003)



Illustration 46 - Carte montrant la répartition spatiale du ratio entre les épaisseurs d'alluvions saturées sur les épaisseurs d'alluvions non saturées calculé sur les piézométries modélisées en situation de crue, le MNT et le modèle géométrique des alluvions de Martin & Noyer (2003)



Illustration 47 - Carte montrant les épaisseurs non saturées d'alluvions en période de crue calculées à partir de la piézométrie simulée par Martin & Noyer (2003) et le MNT

5.3.2. Modèle générique pour tester les déphasages entre les deux nappes

L'objectif est de tester, par une analyse de sensibilité, l'hypothèse de déphasage des charges hydrauliques entre la nappe des alluvions et la nappe des calcaires pouvant favoriser le phénomène de soutirage/suffosion. Le modèle maillé existant ne permet pas de réaliser cette étude car les variations spatiales des paramètres hydrodynamiques (issus du calage du modèle) influencent beaucoup les variations piézométriques et ne permettent pas d'investiguer simplement les conditions hydrogéologiques pour lesquelles un déphasage est possible.

Un modèle générique simple a été construit sous MARTHE avec les caractéristiques suivantes (Illustration 48) : trois couches de 10 m d'épaisseur, chacune correspondant à la nappe alluviale reposant sur une couche intermédiaire pouvant correspondre au calcaire peu karstifié puis une troisième couche pour la partie karstifiée des calcaires ; la longueur du modèle est de 3000 m. La largeur du modèle est fixée arbitrairement à 100 m, correspondant à une tranche d'aquifère. Toutes les mailles du modèle ont les dimensions suivantes : x = 10 m, y = 2 m, z = 10 m.

En régime permanent, le gradient hydraulique est de 1/1000 avec un potentiel imposé sur le bord gauche du modèle à 28 m, correspondant à la Loire et un potentiel imposé sur le bord droit à 25 m correspondant à l'exutoire des nappes. Ce gradient hydraulique est proche du gradient moyen des nappes alluviale et calcaire dans le Val d'Orléans. Toutes les autres conditions aux limites sont des limites à flux nul.

Plusieurs études donnent des gammes de valeurs pour les paramètres hydrodynamiques des nappes des alluvions et des calcaires (conduits karstiques et hors conduits karstiques) (annexe 8). Dans toutes ces études, la diffusivité (T/S) des calcaires karstifiés est environ 100 fois plus élevée que celle des alluvions. Cet ordre de grandeur est respecté dans le paramétrage du modèle générique.

Les paramètres hydrauliques des deux aquifères superficiels de la région ont fait l'objet de plusieurs études. Ainsi, dans les calcaires de Beauce la diffusivité est importante, entre 1 et 10 m²/s (Salquèbre et Vernoux, 2014). Cela traduit une forte transmissivité de l'ordre de 10^{-2} m²/s (Martin, 1999).

Dans une étude de Caudron et Desprez (1970), la diffusivité a été estimée dans les alluvions en 5 points du Val d'Orléans. Les valeurs sont de l'ordre de 0,07 m²/s dans les alluvions isolées des calcaires par les marnes de Blamont et d'environ 1 m²/s dans les zones où il y a un contact entre alluvions et calcaires karstifiés.

Le modèle de base est construit avec les valeurs de paramètres hydrodynamiques suivants :

	Perméabilité (m/s)	Emmagasinement libre (%)	Emmagasinement captif (m ⁻¹)
Couche 1 (alluvions)	1 x 10 ⁻⁴	10	(1 x 10 ⁻³)
Couche 2 (calcaire)	1 x 10⁻⁵	5	1 x 10 ⁻³
Couche 3 (calcaire karstifié)	1 x 10 ⁻¹	(0.1)	1 x 10⁻⁵

Deux configurations sont successivement testées : une avec des charges imposées sur le bord gauche du modèle correspondant à une alimentation par la Loire et l'autre avec des flux imposés à la surface du modèle pour représenter la recharge.

Les « piézomètres d'observation » sont situés sur la ligne y = 50 m du modèle, c'est-à-dire selon un profil au centre du domaine pour éviter tout effet de bord, et dans chacune des trois couches. Ces « triplets » de piézomètres sont positionnés à trois distances croissantes du bord gauche du modèle, soit à 100 m (piézomètres amont), 1 000 m (piézomètres intermédiaire) et 2 000 m (piézomètres aval).



Illustration 48 - Coupe du modèle numérique maillé réalisé sous MARTHE et comprenant trois couches d'égale épaisseur (notez l'exagération verticale)

Crue de la Loire

L'effet d'une crue est testé de manière simple en imposant en amont du modèle (charges imposées sur le bord gauche) des charges hydrauliques qui augmentent de 0.3 m par jour sur 5 jours puis redescendent au même rythme pour atteindre le niveau initial. Cette valeur de fluctuation (1.5 m) correspond aux crues mesurées sur la période septembre 2014 à août 2015 (Illustration 34). La durée de la simulation est de 50 jours pour permettre une initialisation sur 10 jours, la crue puis la décrue, puis la propagation de l'onde de pression dans les nappes.

Les résultats du scénario de base montrent un déphasage sur le piézomètre amont avec une mise en charge plus rapide sur le piézomètre de la couche 3 (calcaire karstifié) suivi d'une décrue plus rapide (Illustration 49). Le déphasage maximal (différence de charge entre couche 1 et couche 3) atteint 30 cm 4 jours après le début de crue et similairement -28 cm 4 jours après le début de la décrue. Pour les deux autres triplets de piézomètres (intermédiaire et aval), le déphasage est non significatif et la variation piézométrique est amortie comme également simulé par le modèle présenté par Martin & Noyer (2003).

Dans le cas où le calcaire karstifié de la couche 3 est dix fois plus perméable (1 m/s), le déphasage est accentué et se trouve également simulé sur les triplets de piézomètres intermédiaire et aval (Illustration 49). Dans ce cas, la différence de charge maximale (i.e., le « déphasage ») est de 33 cm (-31 cm en décrue) sur les piézomètres amont (différence de charge entre couche 1 et couche 3) donc légèrement supérieure à celle calculée avec le scénario de base.

La perméabilité de la couche intermédiaire (couche 2) est également essentielle pour permettre de simuler un déphasage. Par exemple si cette couche devient plus perméable que la couche d'alluvions (p.ex. 1 x 10-3 m/s), le déphasage devient inexistant (Illustration 50). Une telle situation pourrait correspondre au cas d'un calcaire très karstifié directement en contact avec les alluvions perméables.

Si au contraire cette couche intermédiaire est peu perméable (p.ex. 1×10^{-7} m/s), le déphasage est d'autant plus marqué (Illustration 51). Cette situation pourrait correspondre à l'intercalation des marnes de Blamont entre les calcaires et les alluvions. Le déphasage se réduit un peu si l'on introduit des cheminées karstiques au sein de la couche 2 : ce scénario a été simulé en introduisant deux cellules avec une perméabilité égale à la couche 3 (i.e., 0.1 m/s) à proximité immédiate de chaque triplet de piézomètres (Illustration 51).



Illustration 49 - Propagation de l'onde de pression d'une crue de la Loire sur les piézométres simulés pour deux valeurs de perméabilité de la couche 3 (calcaires karstifiés) :
0.1 m/s (scénario de base) et 1 m/s. Pour le scénario le plus perméable, un déphasage apparait également sur les triplets de piézomètres intermédiaire et aval


Illustration 50 - Simulation du rôle d'une couche intermédiaire plus perméable (perméabilité 1x10-3 m/s) correspondant aux niveaux piézométriques simulés en couleurs ; pour comparaison le scénario précédent (perméabilité couche 3 = 1 m/s) est représenté en gris



Illustration 51 - Simuation du rôle d'une couche intermédiaire peu perméable (K=1x10-7 m/s) montrant un déphasage pouvant atteindre un mètre sur le triplet de piézomètres amont ; les courbes en traitillés représentent les résultats du scénario où la couche intermédiaire est perforée de cheminées karstiques à proximité des piézomètres ; ces zones à fortes perméabilités ont pour effet de réduire (un peu) le déphasage

La modélisation montre qu'il est possible d'avoir des déphasages de charge significatifs entre les deux niveaux aquifères pour autant que la couche intermédiaire soit moins perméable que les couches aquifères supérieure et inférieure. Le déphasage est d'autant plus marqué que cette couche intermédiaire est peu perméable et/ou que le contraste de perméabilité des deux nappes est fort (par exemple plus forte perméabilité de la nappe karstique). Ces résultats sont issus d'un modèle exploratoire et ne doivent être pris que comme des tendances d'un processus/phénomène. Au niveau du site expérimental, il n'y a pas de niveau peu perméable intermédiaire, donc les différences de charge entre nappe alluviale et nappe karstique sont faibles, comme indiqué par les mesures piézométriques.

Effet d'une recharge de la nappe alluviale par les précipitations

Une recharge de la nappe alluviale est imposée à raison de 10 mm/jour pendant 5 jours sur l'intégralité du domaine du jour 20 au jour 25. Une telle recharge correspond à de fortes précipitations dans le val d'Orléans. Afin de tester uniquement l'effet de la recharge, les charges imposées sont maintenues constantes, c'est-à-dire qu'aucune crue de Loire n'est simulée. En réalité les précipitations sont accompagnées par une remontée des niveaux des cours d'eau.

Les résultats de simulation (Illustration 52) pour le scénario de base montrent un léger déphasage de charge entre la couche 1 qui reçoit la recharge et les couches inférieures, en particulier pour le piézomètre amont (jusqu'à 10 cm). Ce déphasage est exacerbé dans le cas où la couche intermédiaire est peu perméable (1×10^{-7} m/s) avec un déphasage pouvant atteindre 40-50 cm entre les couches 1 et 3.

La recharge peut donc conduire à des situations où la nappe alluviale peut être drainée par la nappe calcaire, la différence de charges étant plus significative si la couche intermédiaire est peu perméable.



Illustration 52 - Evolution piézométrique liée à une recharge de 10 mm/jour sur 5 jours (jours 20-24) pour deux scénarios : le scénario de base (perméabilité de la couche intermédiaire 1x10⁻⁵ m/s) en traits pleins et le scénario à couche intermédiaire peu perméable (1x10⁻⁷ m/s) en traitillés. Piézomètres dans la couche 1 en bleu, dans la couche 2 en rouge sombre et dans la couche 3 en vert

5.4. SYNTHESE

Les différences de charge observées entre la nappe des alluvions (Pz2bis) et la nappe des calcaires (Pz1, Pz3bis) sont au maximum de 10 cm et celles simulées sont de 30-60 cm en fonction du scénario. De telles différences de charge donnent des vitesses d'écoulement verticales simulées de l'ordre 1.5 10^{-5} m/s dans la situation la plus favorable (perméabilité de la couche intermédiaire 1 x 10^{-5} m/s) qui correspond à un différentiel de charge alluvions-calcaire de 30 cm. En se basant sur les données du site expérimental (perméabilité K=1,5 x 10^{-6} m/s, différence de charge (Δ h) de 10 cm, porosité efficace (n_e) de 10% non mesurée mais typiques des alluvions), on peut estimer la vitesse verticale selon la formule suivante (en faisant l'hypothèse que la vitesse horizontale est nulle) :

$V_z = K x (\Delta h/L)/n_e$

La longueur L correspond à la distance verticale sur laquelle le différentiel de charge se produit, soit en principe la distance entre le toit de la nappe alluviale et le toit du calcaire ; au droit du site, cette distance est comprise entre 2 et 5,5 m. Sur cette base, la vitesse verticale maximale serait de l'ordre de 10^{-6} m/s (ou 5 x 10^{-6} m/s si l'on considère que la perméabilité déterminée par slug test est moins représentative que la perméabilité de 1x10⁻⁵ m/s généralement admise pour les alluvions).

A titre de comparaison, des vitesses d'écoulement critiques permettant le soutirage/suffosion de particules ont été estimées par des modèles expérimentaux pour des conditions de site en Chine : 6.5 10⁻³ m/s pour des formations argileuses, 1.46 10⁻³ m/s pour du sable (Lei et al. 2002), 8.8 10⁻⁵ m/s pour une formation cohésive argileuse (Jiang et al. 2015). Sato & Kuwano (2015) déterminent une vitesse critique de 1.5 10⁻⁴ m/s pour l'initiation de la suffosion dans un sol sableux cohésif sur la base de données expérimentales en colonne.

Même si ces données expérimentales ne correspondent pas au contexte du Val d'Orléans, il semblerait que les vitesses verticales estimées au droit du site (et par modélisation) ne soient pas suffisantes pour permettre l'entrainement de particules par un simple flux d'eau entre nappe alluviale et nappe des alluvions. Cette interprétation très préliminaire mériterait d'être étayée par des simulations hydrogéologiques complémentaires et une détermination de la vitesse critique d'entrainement propre aux alluvions du Val (par des tests sur colonnes expérimentales par exemple). En l'état, il est difficile d'établir un lien direct entre différences de charge des deux nappes et l'évolution d'une cloche de fontis/ apparition d'un fontis. Ce constat est en tout cas en partie corroboré par l'absence de lien fort entre apparition de fontis et niveaux de la Loire (Illustration 44).

Il n'a pas été possible de tester le paramètre turbidité comme un indicateur de l'évolution d'une cloche de fontis et donc comme un signal de l'imminence de l'apparition d'un fontis car la période d'enregistrement est relativement courte et aucun évènement ne s'est produit dans le bassin d'alimentation supposé des deux conduits karstiques suivis. Une difficulté supplémentaire pourrait être l'effet prépondérant des eaux de Loire sur la turbidité, de manière directe par introduction de MES au niveau des pertes et de manière indirecte par un fort effet de dilution sur la turbidité qui serait issue du soutirage/suffosion.

Il semble que l'amplitude des battements de nappe et la position de ces battements par rapport à l'interface alluvions-calcaire puisse jouer un rôle sur l'apparition des fontis et donc la répartition spatiale des fontis. Une étude plus spécifique pourrait être réalisée afin de confirmer ce lien possible ; une confirmation permettrait de réelles avancées sur la cartographie des secteurs les plus susceptibles à l'apparition de fontis.

Cependant, les analyses chimiques sur les eaux de la nappe karstique (Pz1, Pz3bis, source) et de la Loire au niveau des pertes montrent un enrichissement significatif en ions Ca et HCO₃ en aval direct des pertes, i.e., entre les pertes et le site expérimental. Cet enrichissement semble être essentiellement causé par la dissolution des calcaires ; cette dissolution très active pourrait faire évoluer rapidement la taille des conduits karstiques (1 cm/an d'élargissement à prendre comme un ordre de grandeur car basé sur un calcul préliminaire). Une telle évolution, si elle se confirme, pourrait jouer un rôle non négligeable dans l'apparition de fontis à proximité des pertes par évolution de la taille des vides jusqu'à rupture du toit calcaire. En effet, il est vraisemblable que par endroit, le toit des vides soit proche de l'interface calcaire/alluvions car les conduits ont des géométries locales complexes et la position verticale de l'interface peut fluctuer de plusieurs mètres. A titre d'exemple, Waltham & Lu (2007) proposent un abaque montrant la stabilité du toit calcaire en fonction de la largeur du vide (L), de l'épaisseur du calcaire sus-jacent (E) et de la nature géomécanique du calcaire (exprimée par le RMR-rock mass rating). En considérant que les calcaires de Beauce ont des propriétés géomécaniques défavorables (RMR= 30-40), la rupture est atteinte lorsque E < 0.4-0.5 L ; donc dans le cas d'une cavité de 4 m de largeur. l'épaisseur minimale est 2 m et réciproquement.

En résumé :

- Les mesures piézométriques sur le site expérimental montrent que la nappe des alluvions peut être en charge par rapport à celle des calcaires en période de décrue et donc que les flux rendent le soutirage/suffosion possible. Les vitesses d'écoulements apparaissent insuffisantes pour induire à elles-seules le transport particulaire, mais cela mériterait d'être confirmé.
- 2. Les mesures chimiques montrent l'évolution potentiellement rapide des vides karstiques par dissolution et donc que l'apparition de fontis par rupture du toit calcaire est plausible, en particulier à proximité des pertes de Loire.

En complément de ces deux résultats, plusieurs autres constats ont pu être réalisés :

- La majorité des fontis sont comblés partiellement par l'effondrement de la voute et complété par du tout-venant par les propriétaires et, de mémoire d'homme, ils ne se réactivent pas, alors qu'un matériau sableux est venu remplacer celui qui a été soutiré ; un tel comportement semble peu compatible avec le soutirage/suffosion à moins que ce phénomène soit particulièrement lent.
- Les aménagements de surface susceptibles d'augmenter les flux d'infiltration tels que bassins de rétention, fossés de drainage, puisards, sont connus pour être des éléments déclencheurs de nouveaux fontis en contexte de karst sous couverture (p.ex. Waltham et al. 2005) puisqu'ils accélèrent le soutirage/suffosion. Cependant dans le Val d'Orléans, il semble que ce ne soit pas le cas (à notre connaissance, il n'y a pas de cas pour lequel l'apparition d'un fontis puisse être directement imputée à un aménagement). Ce constat semble également aller dans le sens d'un rôle limité du soutirage. La situation pourrait être différente sur le glacis d'Olivet.
- La répartition temporelle des apparitions de fontis ne montre pas de lien définitif avec la situation hydrologique ; il y aurait toutefois une tendance à une recrudescence de fontis en période de décrue (Illustration 43), période favorable au soutirage/suffosion des matériaux de couverture.

 Les fontis de grand diamètre et/ou apparus dans un secteur à faible épaisseur de recouvrement sont nécessairement liés à une rupture du toit calcaire, le soutirage/suffosion ne permettant pas de créer une cloche de fontis de taille suffisante : au moins quelques fontis récents correspondent à ce cas de figure (fontis de St-Pryvé apparu en mai 2010 : 16 m de diamètre ; fontis de St-Denis-en-Val apparu en décembre 2010 : 8 m de diamètre ; fontis de l'A71 apparu en Novembre 2012 : 8 m de diamètre ; fontis de l'île Charlemagne apparu en aout 2015 : 4 m de diamètre).

Ces éléments semblent montrer que les deux types de processus (soutirage/suffosion et rupture du toit calcaire) coexistent dans le contexte du Val d'Orléans.

5.5. PISTES POUR UNE GESTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT

Les pistes de surveillance de l'apparition de fontis envisagées en début de projet telles que les différences de charges hydrauliques entre nappes alluviale et calcaire et pics de turbidité dans les conduits n'ont pas pu être testées *in situ* sur la durée du projet puisqu'aucun nouveau fontis n'est apparu sur le site et à proximité directe. Ces deux indicateurs sont basés sur l'hypothèse que le soutirage/suffosion est le moteur de l'apparition de fontis. Toutefois, les avancées sur la compréhension des processus (0) montrent que le soutirage/suffosion est un des éléments mais que la rupture du toit calcaire doit être également prise en compte.

La piste la plus concrète est la mise en place de capteurs de déformation sur et aux alentours d'un site sensible. De tels capteurs ont été développés dans le cadre du projet iFontis. Leur fonctionnement a été validé au laboratoire et les premières mesures ont été acquises sur le site expérimental. Le suivi va se poursuivre au-delà du projet et devrait amener des enseignements précieux sur la capacité de tels capteurs à détecter des déformations faibles à la surface annonciatrices de l'imminence d'un évènement.

Une autre piste qui a été esquissée dans le cadre du projet est celle d'outils de cartographie des conduits karstiques depuis la surface. En effet, la présence d'un conduit signifie une susceptibilité à l'effondrement marquée en surface et donc la capacité à détecter cette présence serait également un moyen efficace d'anticipation d'effondrements. Le premier test comprenant l'injection d'un traceur salin dans le conduit du site expérimental et le suivi concomitant de sa migration par géophysique a donné des résultats encourageants. Cette méthodologie et d'autres pistes complémentaires ont été proposées dans le cadre d'un futur projet cofinancé par la Région.

En outre, il serait tout à fait pertinent de mettre en place un système d'information sur l'apparition de nouveaux fontis qui permettrait aux différents acteurs (particuliers, mairies, services de l'état), témoins d'un évènement de venir alimenter de manière simple et rapide une base de données⁴ répertoriant les éléments essentiels (localisation, dimensions, date d'apparition). Une telle base serait précieuse pour mener une nouvelle analyse spatiale et temporelle sur les apparitions. Une telle démarche participerait à la gestion de ce risque environnemental spécifique au Val d'Orléans.

⁴ Cette base de données pourrait être la plateforme Géorisques qui intègre la BD-MVT (bd nationale des mouvements de terrain) gérée par le BRGM. Des questionnaires pourraient être envoyés sur une base annuelle aux Mairies du Val et aux gestionnaires du territoire.

6. Perspectives et Conclusions

6.1. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

Le projet iFontis a permis d'améliorer la compréhension des processus d'apparition de fontis. Des pistes de surveillance de ce risque géologique ont pu être dégagées, en particulier par l'utilisation de capteurs de déformation développés dans le cadre du projet et par des méthodologies de cartographie des conduits depuis la surface, approche qui pourra être développée ultérieurement (proposition soumise par les partenaires à l'appel à projet recherche de la Région). Le projet a également permis la mise en place d'un site expérimental dans un secteur particulièrement sensible à l'apparition de fontis le long de la digue de Loire à l'Ouest de Jargeau. Il est envisagé d'intégrer le suivi du site dans le cadre de l'observatoire hydrologique du Val d'Orléans (observatoire de 1^{er} cercle du SNO karst, Service National d'Observation du KARST de l'INSU, <u>http://www.sokarst.org/index.asp</u>). En effet, les mouvements de terrain liés au soutirage/suffosion par le karst étant aléatoires dans leur fréquence, poursuivre le suivi au-delà de la durée du projet ne pourra que renforcer les interprétations possibles sur la base des données hydrologiques et des données de déformations des terrains.

Plusieurs questions sur les processus d'apparition mériteraient d'être abordées en détail tels que la vitesse d'évolution des vides karstiques par dissolution ou les vitesses critiques d'écoulement permettant le soutirage/suffosion. Ces sujets pourront faire l'objet d'activités de recherche par les partenaires dans le cadre de collaborations scientifiques (p.ex., co-encadrement de thèse ou postdoc, projet de recherche partenariale).

6.2. DISSEMINATION DES RESULTATS

Deux communications sont acceptées pour des congrès scientifiques en 2016, la première aux Journées Nationales de la Géotechnique et de la Géologie de l'Ingénieur (JNGG) à Nancy et la seconde au congrès Eurokarst 2016 qui réunit tous, les deux ans, les chercheurs travaillant sur le karst en Europe. Des articles présentant les résultats principaux du projet iFontis seront publiés dans les actes. Il est également prévu de publier un article dans un numéro spécial de la revue « Géologues » sur le thème de la géotechnique (des contacts ont été pris avec le rédacteur en chef).

Au cours du projet, plusieurs présentations du projet à un plus large public ont été faites, notamment auprès de l'association Action Science à Jargeau, de la convention tripartite réunissant la Chambre d'Agriculture, l'Orléanaise des Eaux et la Ville d'Orléans, ou encore dans le cadre du congrès national de l'APBG (association des professeurs de biologie et géologie). Une présentation des résultats de l'étude est envisagée au printemps 2016 à Darvoy avec l'association Action Science.

Les supports correspondants (présentations, posters, résumés, etc.) pourront être mis à disposition des collectivités, administrations et du grand public sur le site Internet de CETRAHE (<u>http://www.univ-orleans.fr/cetrahe</u>) dans le cadre de sa mission de diffusion scientifique et technologique, comme l'ont déjà été les vidéos des injections de traceurs réalisées dans le cadre de ce projet. Le rapport final du projet constitue un document public qui sera diffusé auprès des administrations concernées par le risque de développement de fontis (DDT, DREAL, Services techniques du Département et de la ville d'Orléans). Ce document sera communiqué aux membres du SAGE Loire-Bretagne.

6.3. RETOMBEES POUR LES PARTENAIRES ET VALORISATION ECONOMIQUE LOCALE

Le projet iFontis a permis aux Instituts de recherche (BRGM, CETRAHE, ISTO) de progresser dans la compréhension des processus déclencheurs de fontis et de développer leur expertise sur ce risque géologique. Pour l'Entreprise partenaire (DSA Technologies), le projet a permis de développer des produits et services dans le domaine de la surveillance des mouvements de terrain et en particulier une technologie de capteurs pour le suivi des déformations de surface. Le monitoring en cours qui met en œuvre des capteurs de déformation dans le fontis, permettra par la suite d'améliorer les performances du système de surveillance en termes d'autonomie et de capacité d'acquisition.

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

7. Bibliographie

Alberic P., Lepiller M. 1998. Oxidation of organic matter in a karstic hydrologic unit supplied through stream sinks (Loiret, France). Water Research 32: 2051-2064.

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

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

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

Binet S. et al. 2010. Localisation of a Reactive Transport Zone in a Saturated Karstic Conduit Deduced from Natural and Artificial Tracer Tests. Advances in Research in Karst Media.

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

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

Desprez N. (1967) – Inventaire et étude hydrogéologique du Val d'Orléans. Rapport BRGM n°DSGR.67.A21.

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

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

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

Gombert P, Orsat J, Mathon D, Alboresha R, Al Heib M, Deck O, 2014. Rôle des effondrements karstiques sur les désordres survenus sur les digues de Loire dans le Val d' Orléans (France). BEGE, 16 p.

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

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

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

Intrieri E., Gigli G., Nocentini M., Lombardi L., Mugnai F., Fidolini F., Casagli N. 2015. Sinkhole monitoring and early warning: An experimental and successful GB-InSAR application. Geomorphology 241: 304–314.

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

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

Joigneaux E. Etat qualitatif des eaux de la nappe du Val d'Orléans : Impact du changement climatique et gestion durable de la ressource. Thèse Université d'Orléans, 2011.

Joodi A-S. Apport de l'équation de Brinkman à la modélisation de l'écoulement d'eau et du transport de soluté dans l'aquifère karstique : application au système karstique du Val d'Orléans. Thèse. Université d'Orléans, 2009.

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

Jozja N., Maget P., Défarge C., Mouget C., Pidon A., et al. 2010. Apport des traçages à la connaissance du système karstique du Val d'Orléans. Historique et nouvelles avancées. Géologues, pp.1-5.

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

Khomenko V.P. 2008. Forecast of a collapse location: new approach. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 41: 393–401.

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

Le Borgne F. Réponses hydrogéochimiques de la nappe phréatique du Val d'Orléans aux sollicitations de son environnement. Développement du site expérimental de la carrière Morillon-Corvol de Sandillon (Loiret). Thèse. Sciences of the Universe. Université Paris7 – Denis Diderot, 2001.

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

Lelong F, Jozja N, 2008. Fonctionnement du système karstique du Val d'Orléans : les acquis, les interrogations. Journées techniques de CFH-AIH, Orléans « Hydrogéologie et Karst aux travers des travaux de Michel Lepiller», p 107-116, 17 mai 2008.

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

Lepiller M, Jozja N, 2010 – Le Val d'Orléans, un aquifère karstique alimenté par la Loire. In : Grottes et karsts de France. Karstologie Mémoires, n° 19, pp. 170-171, 360 p.

Martin J.C., Noyer M.L. avec la collaboration de Amraoui N. et Pathirana N. 2003. Caractérisation du risque d'inondation par remontée de nappe sur le Val d'Orléans. Etude menée en collaboration avec l'équipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature. BRGM/RP-52121-FR : 170 p.

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

Meng Y., Dai J., Jia L., Lei M., Ji F. 2013. Typical methods for forecasting karst collapse in China. National Cave and Karst Research Institute (NCKRI) Symposium 2: 239-245.

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

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

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

Pasquier S. 2015. Etude des effondrements karstiques du Val d'Orléans (projet i-Fontis). Rapport de stage ENSEGID-Bordeaux : 69 pages + annexes.

Perrin J., Noury G., Cartannaz C. 2014. ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 1 : Trame méthodologique – Rapport BRGM/RP-63771-FR.

Perrin J., 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, 119 p.

Perrin J., Joigneaux E., Château C., N. Jozja, Défarge C., Binet S. 2015a. 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 J., Noury G., Cartannaz C., Vanoudheusden E. 2015b. A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by Weights-of-Evidence analysis. Engineering Geology 197: 296–305.

Salquèbre D, Vernoux J-F, avec la collaboration de N Amraoui et E Le Boucher, 2014. Suivi de la nappe du Val d'Orléans au droit de 5 piézomètres. Valorisation des données 2012-2013. Rapport final BRGM/RP-63864-FR, 61 p., 21 ill., 6 tab., 3 ann.

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

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

Worthington R-H, 2014. Characteristics of channel networks in unconfined carbonate aquifers. GSA Bulletin, May/June 2015, v.127, no.5/6, p. 759-769.

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

Yao C.M., Feng K.Y., Wang Y.B., Wang X.Y., Ren C.A. 2007. Application of numerical modeling of groundwater flow to the construction of early-warning system of karst collapse: Exemplified by the karst collapse in the Linyi urban area. Hydrogeology and Engineering Geology 34.4: 94-97, 102.

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

Annexe 1

Liste des fontis récents apparus dans le val d'Orléans (2010-2015)

ID	X_L93	Y_L93	Date apparition Morphologi	Remarques	Diam_ext_m	Prof_m	Source
BDMVT_64503356	616233	6754329	20/01/2010	Affaissement dans le garage (mouvement karstique)			SIG Ville d'Orléans
CETE33	614918	6755122	22/05/2010 fontis	villa st pryve	16.0	8.0	LRPC Blois
BRGM_104	619795	6748480	23/10/2010	rupture conduite ?; nouveau fontis à proximité immédiate en 2013	1	1	
CETE2	624596	6753753	01/11/2010 fontis		1	2	LRPC Blois
CETE4	621902	6755395	08/12/2010 fontis		8	4.5	LRPC Blois
INERIS_582	632710	6752407	01/01/2011	proche fontis ineris_546; date d'apparition à l'année près	1.5	1.5	Boismoreau
INERIS_584	625661	6754379	01/01/2011	semblable au fontis ineris_570; date d'apparition à l'année près	3	4	Boismoreau
CETE35	615016	6754554	01/04/2011 fontis	dans verger	4.0	2.5	DDT45
BDMVT_64500050	615012	6754462	30/04/2011	Plus rien de visible	2.5		réponse mairie ; Article du HuffingtonPost
BDMVT_64503382	616547	6755887	21/07/2011	affaissement (3*2*3) dans jardin			SIG Ville d'Orléans
BDMVT_64503390	619024	6753274	09/12/2011	Affaissement de sol, partie de clôture le long du Bras des Montees			SIG Ville d'Orléans
BDMVT_64500048	614637	6755032	13/11/2012		8	5	réponse mairie ; République du Centre
INERIS_512	629513	6748743	02/02/2013	Route de Férolles	4.5	2	LRPC Blois PCD
INERIS_557	628989	6751612	28/03/2013	Localisation approimative	1.5	0.3	CR DM
INERIS_558	634994	6751991	28/03/2013		1		CR DM
INERIS_559	635048	6751939	28/03/2013		1		CR DM
INERIS_560	635062	6751927	28/03/2013		1		CR DM
INERIS_561	635067	6751924	28/03/2013		1		CR DM
INERIS_562	635061	6751937	28/03/2013		5		CR DM
INERIS_563	635080	6751892	28/03/2013		1		CR DM
INERIS_564	634311	6752287	29/03/2013		0.4	0.4	CR DM
INERIS_578	624513	6754800	01/04/2013		1.5	0.8	LRPC Blois PCD
INERIS_577	624533	6754825	15/05/2013		1	0.5	LRPC Blois PCD
BRGM_100	630372	6749307	05/06/2013 fontis	fontis signale par le maire de Sandillon le 6 juin (decrue Loire)	1.5	2.0	terrain juin 2013
BRGM_402	633111	6752445	automne 2013 DF & fontis	actif, fontis récent, pied de digue	5	4	
BRGM_101	632681	6752413	04/11/2013 fontis	Survenu au cours des fortes pluies précédant le 04/11/14	1.5	0.5	
BRGM_102	616150	6753605	01/12/13 fontis	republique du Centre, 3/1/2014, rue des Mauvignons	1.5	1.0	
BRGM_103	621057	6749156	02/02/2014 fontis	apparu week end site CNRS, peuplier au fond	4.5	5.0	
BRGM_106	620450	6752060	01/06/2015 fontis	date d'apparition connue au mois près	0.5	1	BRGM
BRGM_108	620810	6749450	01/07/2015 affaissemen	date d'apparition connue au mois près, 2 affaissements	2	0.1	BRGM
BRGM_105	621229	6755532	01/08/2015 fontis	date d'apparition connue au mois près	4	2.5	
BRGM_109	625541	6754401	01/08/2015 fontis	date d'apparition connue au mois près, 2 affaissements			
BRGM_107	621460	6754110	printemps 2015 fontis				

Annexe 2

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

Investigations géophysiques sur les karsts du Loiret en aval de Jargeau

Panneaux électriques

1. Travaux réalisés

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

2. Inversions des données avec Res2Dinv

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

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

3. Interprétation

Schéma géologique

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

- Un premier terrain conducteur C0 en position subaffleurante qui n'est présent qu'au Sud de la digue. Son épaisseur maximale est de 7 m et sa résistivité est comprise entre 50 et 150 ohm.m. Il correspondrait à des alluvions argilo-sableuses (+ limons ?).
- Un deuxième terrain résistant de résistivité supérieure à 200 ohm.m qui est attribué à des alluvions sablo-graveleuses propres et ennoyées. Son épaisseur est de 7 à 8m quand il est en position sub-affleurante entre la digue et la Loire. Au Sud de la digue, son épaisseur est moindre (5 à 6 m au maximum) quand il est sous-jacent à l'horizon conducteur C0.
- Un troisième terrain conducteur C1 qui correspondrait à la frange d'altération des calcaires de Pithiviers. Sa résistivité est de l'ordre de 50 à 150 ohm.m et son épaisseur de 5 à 10 m.
- Un quatrième terrain résistant R1 dont la résistivité est supérieure à 200 ohm.m. Son épaisseur est comprise entre 10 et 15 m. Les baisses de résistivité observées au sein de cet horizon pourrait être en relation avec de la fracturation et/ou de la karstification. Il correspond aux calcaires sains de Pithiviers.

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

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

<u>Structurale</u>

- Mise en évidence de 4 discontinuités sub-verticales pouvant correspondre à des failles. Ces discontinuités sont marquées par des décrochements des horizons géo-électriques et par des baisses de résistivité essentiellement au niveau de l'horizon résistant R1.
- Les rejets verticaux de ces failles sont faibles (2 à 3 m). Le compartiment sud est successivement affaissé ce qui donne une impression de pendage des couches vers le Sud.
- > La faille D1 ne présente pas de rejet significatif.
- > La faille D4 serait pentée vers le Nord (faille inverse ?).
- La spatialisation des interprétations met en évidence une direction globalement E-W pour les 4 failles.

Réseau karstique

- La seule signature géoélectrique évidente de la présence d'un karst est localisée sur le profil DA2 approximativement à l'aplomb du fontis (abscisse 145 m). Il s'agit d'une anomalie conductrice sub-verticale qui remonte jusqu'en surface.
- Sur le profil DA3, aucune anomalie conductrice corrélée au fontis (abscisse 90 m) n'a été mise en évidence.
- Sur le profil DA1, pas d'anomalie en relation avec le fontis par contre on aurait une anomalie conductrice sub-verticale centrée sur la faille D3 et sur le forage.
- En conclusion, une anomalie conductrice sub-verticale associée à une discontinuité (faille) pourrait être en relation avec une éventuelle présence de karst.

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



Spatialisation des résultats de l'interprétation des coupes géoélectriques

Localisation des trois profils géophysiques réalisés et interprétation



Profil: DA1_ERT Coupe de résistivité inversée









Profil: DA2_ERT Coupe de résistivité inversée



BRGM/RP-65474-FR – Rapport final



Profil sismique sur la coupe DA2 (site expérimental)

BRGM/RP-65474-FR - Rapport final

Annexe 3

Logs géologique et technique des forages



Logs géologique et technique du forage Pz1



Logs géologique et technique du forage Pz2bis



Logs géologique et technique du forage Pz3bis

Annexe 4

Descriptif des opérations de traçage

Première opération de traçage (10/09/2014)									
Point d'injection	Heure d'injection	Traceur	Quantité	Points de suivi					
	11h10	Uranine	10 g	Exhaure Pz1					
Fontis				Pz2bis					
				Pz3bis					
Pz2bis (alluvions)	11h20	NaCl	20 g	Pz2bis					
				Exhaure Pz1					
Pz3his (calcaire)	11h30	Sulforhodamine B	500 mg	Pz3bis					
				Exhaure Pz1					
Perte 1 en Loire				Exhaure Pz1					
(Position GPS :	12h45	Naphtionate de	1 kg	Pz2bis					
N 47.87037°		sodium		Pz3bis					
E 2.11518°)				Bouillon					
Deuxième opération de tracage (11/09/2014)									
Point d'injection	Heure d'injection	Traceur	Quantité	Points de suivi					
	12h45	Uranine	99 g	Exhaure Pz1					
Fontis				Pz2bis					
				Pz3bis					
Troisième opération de traçage (12/09/2014)									
Point d'injection	Heure d'injection	Traceur	Quantité	Points de suivi					
Perte 2 en Loire				Exhaure Pz1					
(Position GPS :	16h10	Naphtionate de sodium	2 kg	Pz2bis					
N 47.87023°				Pz3bis					
E 2.11477°)				Bouillon					
Quatrième opération de tracage (13/09/2014)									
Point d'injection	Heure d'injection	Traceur	Quantité	Points de suivi					
		Uranine	891 g	Exhaure Pz1					
Fontis	10h10			Pz2bis					
				Pz3bis					
				Bouillon					

Descriptif des opérations de traçage de septembre 2014

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

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

Résultats des mesures	effectuées in situ lors	des campagnes	de terrain (LJ : Loire à	Jargeau ;
	BS : Sour	ce du Bouillon)			

Date Campagne	Référence Point	Houro	T (°C)	χ (µS/cm	ᆔᆈ	% O ₂
Date Campagne	Reference Fond	lieure	I (C)	à 25°C)	рп	dissous
	LJ	10h30	15,7	201	7,55	82,6
	Pz1	11h15	13,7	260	7,55	29,0
05/05/2015	Pz2bis	11h35	13,5	616	7,16	81,5
	Pz3bis	11h45	13,5	318	7,35	31,2
	BS	9h35	12,6	288	7,57	31,1
	LJ	10h20	18,3	310	8,69	114,0
	Pz1	16h30	15,7	356	7,46	39,0
02/06/2015	Pz2bis	15h40	14,0	626	7,11	79,2
	Pz3bis	16h00	15,3	416	7,38	34,5
	BS	9h30	14,1	353	7,50	33,1
	LJ	15h10	28,7	277	8,71	135,0
20/06/2015	Pz1	13h45	20,1	342	7,61	32,8
30/00/2015	Pz2bis	14h00	15,0	622	7,20	89,0
	Pz3bis	8h45	19,4	328	7,54	22,0
26/06/2015	BS	9h30	15,7	335	7,61	30,4
	LJ	11h10	19,8	297	8,75	83,0
	Pz1	14h05	20,5	357	7,56	56,8
29/07/2015	Pz2bis	13h35	14,5	734	6,94	73,5
	Pz3bis	13h20	20,4	328	7,56	59,0
	BS	9h25	17,4	344	7,52	36,5
31/08/2015	LJ	10h45	25,2	283	8,45	135,0
	Pz1	11h20	21,1	335	7,55	51,5
01/09/2015	Pz2bis	10h55	13,8	626	7,34	90,4
	Pz3bis	10h15	21,1	328	7,45	56,0
	BS	9h00	17,9	338	7,59	55,0
28/01/2016	LJ	10h35	6,9	245	7,92	92,9
	Pz1	13h35	9,4	305	7,75	66,6
	Pz2bis	13h55	13,8	591	7,25	62,1
	Pz3bis	14h15	10,5	372	7,37	63,6
	BS	15h00	10,5	283	7,88	67,5

Date	Référence	MEG	ä	2		so ²⁻	DO 3-		Na ⁺	NUL +	Ma: 2+	1 /+	C = ²⁺
Campagne	Point	MES	CI	NO ₂	NO ₃	504	PO ₄	HCO3	Na	NH4	wg-	n	Ca⁻
08/09/2014	LJ	1,5	17,02	<0,001	4,20	13,99	0,02		14,76	<0,01	4,70	3,70	37,65
	Pz1	4,8	18,24	<0,001	8,38	15,05	0,16		13,63	<0,01	4,34	3,80	49,33
10/09/2014	Pz2bis	315,4	22,77	1,67	78,73	27,96	0,55		8,56	<0,01	11,52	<0,01	116,13
	Pz3bis	11,0	22,00	0,01	34,11	14,92	0,03		11,96	0,44	6,72	3,91	66,20
12/09/2014	BS	6,7	17,91	<0,001	11,72	15,22	0,18		13,23	0,02	4,71	3,55	48,31
	LJ	39,0	6,68	<0,001	6,89	8,59	0,10	92,90	5,63		3,13	3,18	32,91
	Pz1	10,0	9,10	<0,001	8,38	10,30	0,14	131,40	9,98		4,12	4,49	42,34
05/05/2015	Pz2bis	3148,8	16,43	<0,001	47,02	21,31	0,31	311,31	7,76		13,16	2,08	108,83
	Pz3bis	4,8	10,22	<0,001	8,48	12,02	0,96	179,17	8,60		4,41	3,68	57,17
	BS	0,4	13,34	<0,001	10,71	13,98	0,41	138,11	11,30		4,63	4,08	43,00
	LJ	3,4	15,13	<0,001	7,66	14,61	0,05	148,50	12,57	<0,01	5,67	3,67	46,38
	Pz1	1,6	17,93	<0,001	11,68	58,59	0,41	175,34	14,46	<0,01	4,55	5,00	61,12
02/06/2015	Pz2bis	226,2	20,48	<0,001	65,34	25,70	0,38	302,63	12,96	<0,01	13,72	6,26	106,56
	Pz3bis	0,8	17,26	<0,001	8,16	60,76	0,03	229,14	11,47	<0,01	4,94	3,73	70,60
	BS	1,0	15,49	<0,001	14,87	15,73	0,38	168,22	11,46	0,04	5,47	3,65	55,78
	LJ	9,4	17,66	<0,001	4,68	16,76	0,02	118,78	18,60	0,02	5,95	4,39	38,82
30/06/2015	Pz1	3,0	23,16	<0,001	9,19	27,74	0,38	158,32	17,30	0,01	5,22	5,52	82,23
30/00/2015	Pz2bis	154,0	17,85	<0,001	57,86	21,52	0,33	303,13	7,71	<0,01	14,56	3,87	106,22
	Pz3bis	2,6	17,94	<0,001	7,67	15,99	0,13	153,17	13,82	0,03	5,14	4,71	45,19
26/06/2015	BS	1,0	16,27	<0,001	10,37	14,89	0,29	170,95	12,27	<0,01	5,04	4,01	45,09
	LJ	3,4	21,80	<0,001	1,42	15,83	0,06	130,06	16,72	<0,01	5,66	4,38	37,38
	Pz1	43,8	20,90	<0,001	5,02	16,50	0,13	147,34	16,29	<0,01	5,35	4,88	47,46
29/07/2015	Pz2bis	478,0	22,21	<0,001	71,97	26,09	0,40	369,00	9,44	0,08	14,99	3,18	126,90
	Pz3bis	115,8	21,50	<0,001	3,85	16,36	0,10	145,25	16,58	<0,01	5,38	4,29	43,91
	BS	< 0,1	21,22	<0,001	6,49	17,90	0,14	153,80	17,67	<0,01	8,22	5,70	55,31
31/08/2015	LJ	5,4	20,25			14,74		115,92					
	Pz1	9,6	20,17			14,90		154,59					
01/09/2015	Pz2bis	2223,0	20,13			20,22		302,01					
	Pz3bis	5,0	20,35			14,73		149,19					
	BS	0,2	20,44			15,16		156,75					
	LJ	17,1	4,79	<0,001	19,07	12,38	0,37	84,86	10,80		5,06	3,79	33,67
28/01/2016	Pz1	0,3	3,99	<0,001	21,19	13,79	0,21	124,92	11,63		4,05	3,76	45,45
	Pz2bis	129,9	5,07	<0,001	80,48	18,94	0,34	146,42	9,05		11,47	3,19	99,22
	Pz3bis	1,8	3,97	<0,001	20,34	13,31	0,15	160,72	11,04		4,46	3,47	55,97
	BS	< 0,1	3,69	<0,001	19,84	12,95	1,46	114,53	10,09		4,06	3,45	41,65

Résultats des analyses des teneurs en Matières En Suspension et ions dissous (mg/L)

Monitoring géophysique du traceur salin injecté dans Pz3bis

Les acquisitions sur les 2 panneaux électriques ont été réalisées en configuration dipôle-dipôle. L'espacement inter-électrode est de 2.5 m. Les caractéristiques de la séquence de mesures sont données sur l'illustration ci-dessous.

DD-25 Line (m): 0 - 240 < DD 25.sqz >



Le déroulement des opérations de monitoring a été le suivant :

- 2 acquisitions sur chaque profil pour établir l'état 0 avant injection d'eau salée,
- 4 ou 5 acquisitions sur chaque profil pendant l'injection,
- 3 acquisitions sur chaque profil après l'arrêt de l'injection.

Panneau	Acquisition	Heure	Nom fichier	Param	Paramètres d'acquisition		Temps par rapport au début	Temps par rapport à la fin	Commentaires
électrique	· ·	début		Time (ms)	Stack	Voltage (V)	d'injection (mn)	d'injection (mn)	
	T00	12:08	P1-T00	250	3/3	400	-64		
	TO	12:21	P1-T0	500	3/3	400	-51		
	T1	13:21	P1-T1	250	3/3	400	9		début injection à 13h12
	T2	13:30	P1-T2	250	3/3	400	18		
	T3	13:55	P1-T3	250	3/3	400	43		
D1	T4	14:24	P1-T4	500	3/3	400	72		
P1	T5	14:49	P1-T5	250	3/3	400	97		
									fin injection à 15h15
	Т6	15:17	P1-T6	250	3/3	400		2	T6 inexploitable pour une
									raison indéterminée
	T7	15:36	P1-T7	250	3/3	400		16	
	T8	16:02	P1-T8	250	3/3	400		47	
	T00	12:36	P2-T00	250	3/3	400	-36		
	TO	12:46	P2-T0	500	3/3	400	-26		
	T1	13:40	P2-T1	500	3/3	400	28		début injection à 13h12
	T2	14:08	P2-T2	250	3/3	400	56		
	T3	14:38	P2-T3	250	3/3	400	86		
P2	T4	15:01	P2-T4	250	3/3	400	109		
									fin injection à 15h15
	T5	15:25	P2-T5	250	3/3	400		10	T5 inexploitable pour une
									raison indéterminée
	T6	15:47	P2-T6	250	3/3	400		32	
	T7	16:12	P2-T7	250	3/3	400		57	

Le détail de la procédure est donné dans le ci-dessous :

Les acquisitions T6 sur P1 et T5 sur P2 sont inexploitables pour une raison indéterminée (mise en route d'une pompe dans un forage agricole ? station d'épuration de Jargeau ?).

Hypothèses de départ et modélisations

Les hypothèses de départ sont les suivantes :

- La section du karst intersecté par le Pz3bis serait de l'ordre de 1 m².
- L'écoulement de la nappe se ferait de l'Est vers l'Ouest.
- La vitesse d'écoulement serait de l'ordre de 100 m/h soit 1.7 m/mn.

Les données sur les caractéristiques de l'injection et du monitoring de résistivité sont les suivantes :

- Injection au débit de 2813 l/h (pendant 2 h) avec une concentration de 28.4 g/l (conductivité de 46 500 μS/cm).
- Panneau électrique P1 situé à 15 m en aval du point d'injection.

Compte tenu des hypothèses hydrauliques et des données d'injection, on peut faire les estimations suivantes :

- Le panache salée mettra environ 9 mn pour atteindre le panneau P1.
- Le volume d'eau au sein du conduit karstique entre le point d'injection et le panneau P1 est d'environ 15 m³.
- En considérant le simple calcul de dilution de la masse de sel injectée en 9 minutes (12 kg) dans un volume karstique de 15 m³ (approche très grossière) on estime que la concentration sera de l'ordre de 0.8 g/l et la conductivité de 1775 µS/cm. Une modélisation (illustration suivante) montre que ce contraste de conductivité entre le conduit karstique et l'eau de la formation (350 µS/cm) n'est pas suffisant pour être détecté.

Diagrammes de Schoeller



Diagramme de Schoeller montrant les deux tendances hydrochimiques différentes (échantillons de mai et juillet 2015 – LJ = Loire à Jargeau, BS = Bouillon surface)



Eléments majeurs dans la nappe alluviale pour les campagnes de mai à août 2015



Eléments majeurs dans l'ensemble des points de prélèvement début mai et début août 2015

Analyse bibliographique des paramètres hydrodynamiques des nappes du Val d'Orléans

	Alluvions	Calcaire
T (m ² /s)	10-5-3.10-2	10-3-7.10-2
s	5-15%	3-7%
Diffusivité (m²/s)	6.10 ⁻² -7.10 ⁻²	0,86-1,3

1. Desprez et Peaudecerf (1970) d'après thèse de LeBorgne :

2. Desprez 1970 :

Puits Ouvrouer T/S = $1.3 \text{ m}^2/\text{s}$

Puits Jargeau T/S = 0.87 m²/s

Puits Bou T/S = $0.07 \text{ m}^2/\text{s}$

Puits Sandillon T/S = 0.064 m²/s

Forage Sandillon T/S = 0.86 m²/s

3. Desprez 1976 :

Au cours des premières observations faites entre 1968 et 1970 sur des puits situés à proximité de la Loire, il est apparu un parallélisme absolu entre les plans d'eau de la Loire et les nappes, la surface piézométrique étant toujours en-dessous du niveau du fleuve.

A partir de ces données, il avait été possible de calculer la diffusivité de chacun des réservoirs aquifères : (Diffusivité = Transmissivité/Coefficient d'emmagasinement), ainsi, dans la nappe des calcaires T/S = 0,9 à 1,3 m²/s dans le nappe alluviale T/S = 0,06 à 0,07 m²/s

4. Rapport **BRGM** Modélisation nappe de Beauce, **RR-40571-FR**

Transmissivités de l'ordre de 10-2 m2 /s. Perméabilité : 6.10-4 m/s (Dans les calcaires de Pithiviers)

	Distance Loire	Diffusivité (m²/s)	Coef. de détermination [®]
Hippodrome	360	9.75	0.94
Jardin des Plantes	268	1.65	0.93
Dojo	550	4.72	0.95
Moins Roux	1230	5.18	0.91
Stade des montées	3110	8.39	0.70

5. Salquèbre et Vernoux (2014)

Tableau 3 : Estimation des valeurs de diffusivité hydraulique.



« Les coefficients de diffusivité obtenus avec le modèle sont élevés (> 1.5 m2/s), ce qui traduit une forte transmissivité et/ou un faible coefficient d'emmagasinement. On trouve dans Caudron et Desprez (1970) des valeurs de diffusivité estimées en 5 points du Val d'Orléans à partir de fluctuations de la piézométrie et du niveau de la Loire entre février 1968 et mars 1970. Ces valeurs varient entre 0,07 m²/s dans les zones d'alluvions isolées à 1 m²/s dans les zones de contact entre alluvions et calcaires karstifiés. Les calcaires sont en effet karstifiés dans le secteur d'étude. »

6. Modèle hydrodynamique de Martin et Noyer (2003)

Alluvions : T=1-3 10^{-2} m²/s, K=10-120 10^{-4} m/s, Sy=3-15%

Calcaires : T=1-10 10⁻³ m²/s, K=5-30 10⁻⁴ m/s, 1-7 m/s (conduits), Ss=0.1-0.5%



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