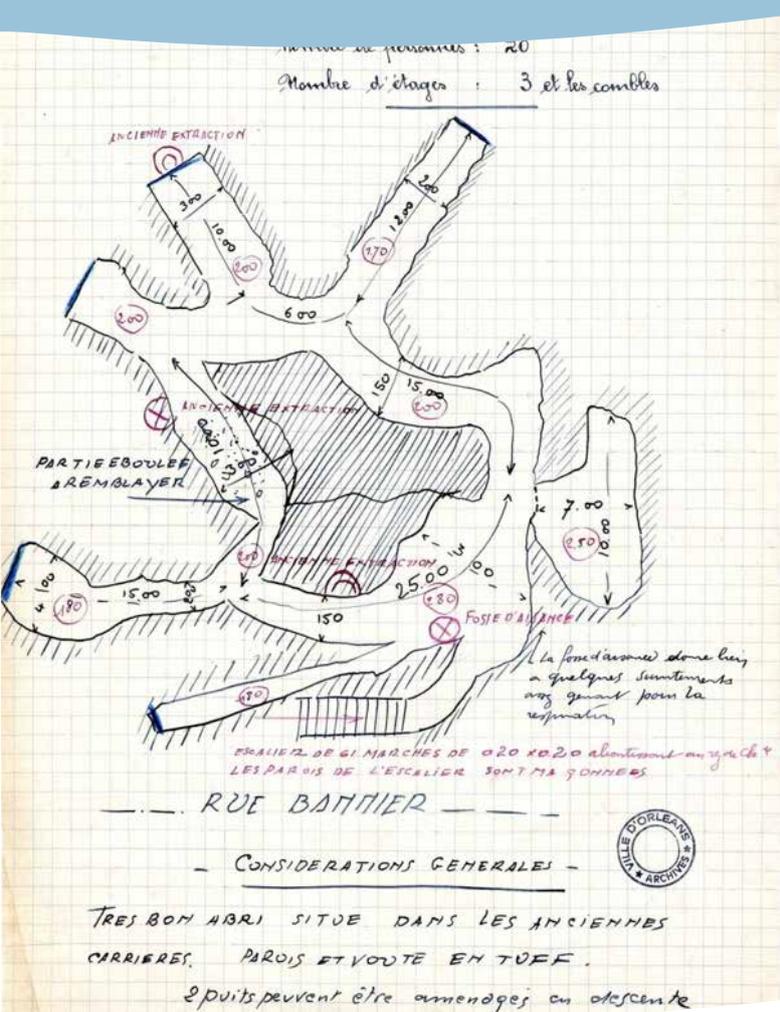


SICAVOR : Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans (2015-2017)



Clément ALIX (dir.)

Daniel MORLEGHEM
Caroline BARRAY
Michel PHILIPPE

et al.

Volume 3 : études géologiques et géotechniques

Autorisation n° 15/0245

Décembre 2017

FICHE SIGNALÉTIQUE

Région : CENTRE

Département : 45 **Commune :** ORLEANS **Code INSEE :** 45.234

Lieu-dit ou adresse : « Ville Intra-muros » Caves

Cadastre : AW, AX, AY, AZ, BC, BD, BE, BH ,BI, BK, BM, BN; BO, BP, BR

Arrêté d'autorisation de prospection thématique n° : 15/0245 en date du 26/06/2015

Responsable désigné : Clément ALIX

Organisme de rattachement : Service Archéologique Municipal d'Orléans (Pôle d'archéologie d'Orléans)

Dates d'intervention sur le terrain : 2015-2017

INFORMATIONS SUR LA COMPOSITION DU RAPPORT

Nombre de pages : 288

Nombre de documents : 5

INTERVENANTS

Service régional de l'Archéologie (SRA) :

Stéphane REVILLION : Conservateur régional de l'archéologie

Christian VERJUX : Conservateur régional de l'archéologie adjoint

AUTEURS

Clément ALIX (Pôle d'archéologie Orléans) : terrain, étude et rédaction

Daniel MORLEGHEM (vacataire LAT - programme SICAVOR) : relevés scanner 3 D, base de données, SIG

Caroline BARRAY (vacataire CESR - programme SICAVOR) : étude documentaire

Michel PHILIPPE (vacataire CESR - programme SICAVOR) : étude documentaire

Collaborations :

Julien COURTOIS (Pôle d'archéologie Orléans) : base de données, SIG

Matthieu FERNANDEZ (vacataire LAT - programme SICAVOR) : base de données, SIG

Laurent JOSSERAND (Polytech'Orléans) : restitutions 3D

Emeline MAROT (vacataire LAT - programme SICAVOR) : étude de bâti, DAO

Maëlys CADEL (étudiante OSUC) : étude géotechnique du quartier Saint-Aignan

Aurélien DIACRE (étudiante OSUC) : étude géotechnique du quartier Saint-Aignan

Amélie LAURENT (Conseil Général du Loiret) : étude géotechnique du quartier Saint-Aignan

Sébastien JESSET (Pôle d'archéologie Orléans) : identification mobilier céramique

Marie-Pierre Chambon (Inrap) : identification mobilier céramique

Gildas NOURY (BRGM Orléans) : étude des risques des cavités

Imed KSIBI (DEPR, métropole d'Orléans) : étude des risques des cavités

Mylène FROIDEVAUX (Université de Reims Champagne-Ardennes) : étude des risques des cavités

CITATION

Alix 2017 dir. : Alix (C.), Morleghem (D.), Barray (C.), Philippe (M.) - SICAVOR : *Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans (2015-2017)*, rapport de prospection thématique pluriannuelle. Orléans : SAMO/SRA Centre, décembre 2017.

SOMMAIRE

Fiche signalétique	1
Citation	1
Article du colloque de Tours - Gildas Noury, Imed Ksibi et Mylène Froidevaux, <i>Apport de la collaboration entre le BRGM et le service Prévention des Risques d'Orléans-Métropole</i>	5
1. Contexte géologique	6
1.1.Histoire géologique simplifiée de l'Orléanais.....	6
1.2.Les cavités présentes dans le calcaire de Beauce.....	6
2. Les spécificités urbanistiques des cavités d'Orléans	7
2.1.La prise en compte des cavités dans l'urbanisme orléanais	7
2.2.La gestion actuelle des risques liés aux cavités par Orléans Métropole	7
3. Analyse du risque par le BRGM dans le cadre du projet SICAVOR	7
3.1.Des cavités aux configurations contraintes par les caractéristiques géologiques locales.....	7
3.2.Les mouvements de terrain liés aux cavités : processus initiateurs, facteurs aggravants et zones de faiblesse	9
4. Les apports du scan laser 3D ZEB-REVO	11
4.1.Le matériel.....	11
4.2.Méthodologie de cartographie	12
4.3.Comparaison avec les levés au scanner laser FARO® Focus 3D	12
5. Conclusion	13
Mémoire de Mylène Froidevaux, <i>Synthèse géologique et évaluation des risques d'effondrements des cavités souterraines recensées à Orléans, par le projet SICAVOR</i>	15
Mémoire d'Aurélié Diacre, <i>Caractérisation du dépôt archéologique sur les paléoterrasses du quartier Saint-Aignan à Orléans</i>	181
Mémoire de Maëlys Cadet, <i>Caractérisation de l'épaisseur du dépôt archéologique à l'échelle du quartier Saint-Aignan (Orléans), application aux cavités souterraines</i>	221
Rapport de diagnostic géotechnique de la cave SICAVOR 140, rue de la Poterne (APPUI-SOL)	251

**ARTICLE DU COLLOQUE DE TOURS - GILDAS NOURY, IMED KSIBI
ET MYLÈNE FROIDEVAUX, APPOINT DE LA COLLABORATION ENTRE
LE BRGM ET LE SERVICE PRÉVENTION DES RISQUES D'ORLÉANS-
MÉTROPOLE**

1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

1.1. Histoire géologique simplifiée de l'Orléanais

La région d'Orléans se situe dans le Sud du Bassin Parisien (**Fig. 1**), vaste cuvette composée d'un empilement de couches sédimentaires d'origines essentiellement détritiques (issus de l'érosion d'anciennes chaînes de montagnes) et carbonatées (précipitation de carbonate de calcium). Ces dépôts s'étagent du Trias (- 250 millions d'années) au Pliocène (- 23 millions d'années) et se font surtout en contexte marin, mais aussi en milieu lacustre. Les successions de périodes glaciaires et interglaciaires au Quaternaire aboutissent à la configuration géomorphologique actuelle : altération plus ou moins profonde des roches en place, terrasses alluviales anciennes perchées sur les plateaux et incision de la vallée actuelle de la Loire.

Les calcaires de Beauce se forment à l'Aquitaniens (de - 23 à - 20,5 millions d'années), au niveau d'un ensemble de lacs peu profonds, à niveau variable, et de marécages (Mégny 1980). Ces roches sont observées sur une surface de l'ordre de 13 000 km², centrée sur Orléans. À ce niveau, leur épaisseur varie de 50 m à 90 m environ. La lithologie et la répartition spatiale de ces formations sont particulièrement variables et hétérogènes, aussi bien horizontalement que verticalement (Lorain 1972 ; Ménillet 1981). Les faciès observés sont essentiellement calcaires (pâteux, compact ou bréchié) mais aussi siliceux (meulière en banc ou en lentille) et parfois argileux (argile verte intercalée dans les bancs de calcaires pâteux).

Dans le secteur d'Orléans, le calcaire de Beauce est presque affleurant en rive droite de la Loire alors qu'il est recouvert par des alluvions actuelles et anciennes dans le lit majeur du fleuve et, encore plus au Sud, par les sables de Sologne.

1.2. Les cavités présentes dans le calcaire de Beauce

Le calcaire a la propriété de se dissoudre lentement au contact de l'eau. A l'échelle des temps géologiques (plusieurs dizaines voire centaines de milliers d'années), ce phénomène, appelé karstification, aboutit à la création de véritables réseaux de vides souterrains (système karstique), la plupart étant le siège d'intenses circulations d'eau. Souvent instable et recouvert par d'autres couches géologiques, le karst des calcaires de Beauce est mal connu de l'intérieur : les explorations spéléologiques se limitent à quelques cavités avec généralement de faibles longueurs visitées.

Les calcaires de Beauce ont par ailleurs été exploités

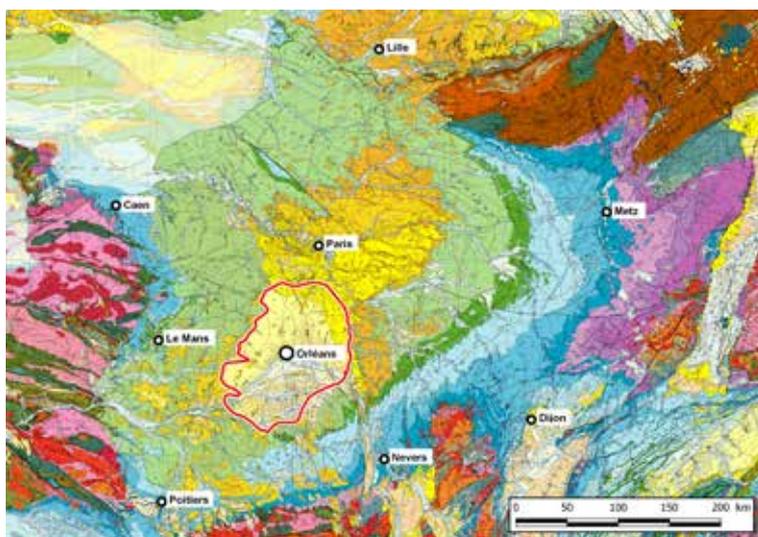


Fig. 1 : Extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000 représentant le Bassin de Paris et le contour du calcaire de Beauce, en rouge (source : BRGM).

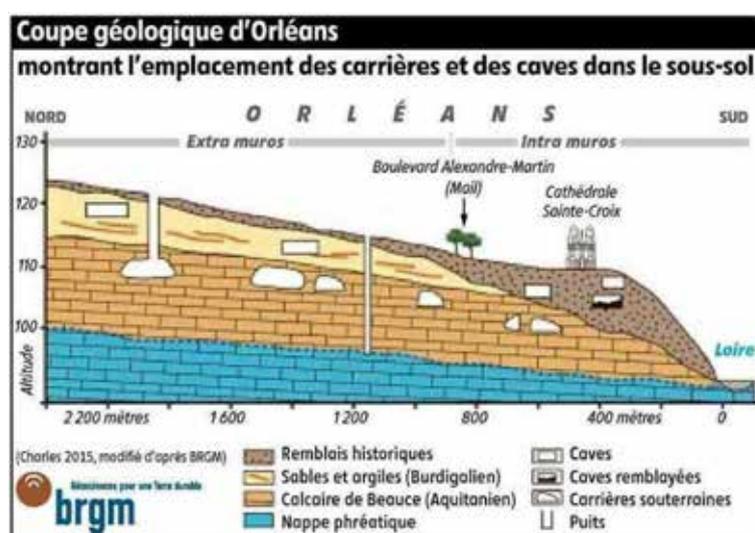


Fig. 2 : Coupe géologique d'Orléans montrant l'emplacement des caves et des carrières dans le sous-sol (source : Charles 2015).

comme matériau de construction dès l'époque romaine, puis au Moyen-Âge et jusqu'à l'époque actuelle (Angot *et al.* 1973). Généralement exploité en carrière à ciel ouvert, ce matériau l'a aussi été de manière souterraine, en particulier dans le secteur d'Orléans.

On trouve ainsi sur le territoire orléanais, deux types de cavités :

- au sud de la Loire : des cavités naturelles issues de la dissolution du substratum calcaire par la circulation des eaux souterraines (réseau karstique).
- au nord de la Loire : des caves profondes dans le centre ancien de la ville et d'anciennes carrières d'extraction de calcaire situées principalement en périphérie du centre-ville (**Fig. 2**).

2. LES SPÉCIFICITÉS URBANISTIQUES DES CAVITÉS D'ORLÉANS

2.1. La prise en compte des cavités dans l'urbanisme orléanais

Jusqu'alors peu considérées par les politiques urbaines, le contexte de la Seconde Guerre mondiale a motivé le recensement et la visite par la Défense Passive d'environ 240 cavités pouvant servir d'abri à la population en cas de bombardement.

Leur évaluation a été remise au goût du jour par la mise en application de la loi du 13 juillet 1982 modifiée le 22 juillet 1987 (Décret d'application N° 90-918 du 11 Octobre 1990) relative à l'organisation de la sécurité civile, la protection de la forêt contre l'incendie, la prévention des risques majeurs, qui spécifie le devoir d'information du Maire envers les citoyens quant aux risques naturels prévisibles. Les mouvements de terrain, parmi lesquels figurent les effondrements de carrières souterraines, entrent dans cette catégorie des risques naturels prévisibles, même s'il semble très difficile de les cerner dans le temps et dans l'espace. C'est ainsi que la ville d'Orléans a commencé en 1996 la réalisation d'un inventaire exhaustif de ces cavités.

2.2. La gestion actuelle des risques liés aux cavités par Orléans Métropole

L'actuelle Direction de l'Environnement et de la Prévention des Risques (DEPR) d'Orléans Métropole a été créée dès 2010. Sa mission principale est la gestion des risques majeurs (risques naturels : inondations, mouvements de terrain, risques technologiques et industriels). Pour ce qui concerne les mouvements de terrains, le service informe et renseigne :

- la population : lors du dépôt du permis de construire ou de l'achat ou la vente d'un bien (information des acquéreurs et des locataires) ou en cas de sinistre découvert. Procédure allant jusqu'à l'assistance de dépôt de demande de reconnaissance de catastrophe naturelle auprès des services de l'Etat ;
- les notaires : dans le cadre des ventes d'un bien ;
- les entreprises : par le biais des réponses aux Déclarations de projet de Travaux (DT) et de Déclarations d'Intention de Commencement de Travaux (DICT).

Le service procède également à la réalisation de travaux de sondages, de comblement ou de traitement de sol, en particulier lorsque ceux-ci concernent le domaine public. Il vient aussi en aide (conseils) à la population lors de tels problèmes, ou en appui pour les démarches si des travaux sont nécessaires.

Afin de mener à bien ces missions, la connaissance des cavités est sans cesse améliorée par une mise à jour permanente de l'inventaire existant et par l'exploration, la cartographie et la surveillance des cavités les plus sensibles.

L'inventaire a exploité et exploite encore deux sources d'information : les archives municipales et le fond relatif à la Défense Passive des années 1930-1940 ainsi que les enquêtes de mémoire dans les quartiers. La perte d'une grande partie des archives départementales lors de l'incendie de juin 1940 a malheureusement complexifié cette tâche. Ce travail de collecte d'information s'est concrétisé par la publication d'un Atlas des carrières souterraines, sur plans cadastraux, dont la première version papier date de 1998. L'Atlas est actuellement disponible sur l'Intranet de la Ville, en consultation pour tous les acteurs concernés. L'Atlas et la base de données de la DEPR font l'objet de milliers de consultations annuellement, notamment dans le cadre des prescriptions des Demandes d'Intention de Commencement de Travaux (DICT) et des demandes de notaires.

L'inventaire est bien sûr complété lors de la découverte de nouvelles cavités, d'études de sols ou au moment des travaux d'aménagements. Une vingtaine de cavités ont ainsi été traitées lors des travaux de la ligne B du tramway en 2010-2011.

Environ 700 cavités sont actuellement recensées à Orléans (rive droite), soit en moyenne 60 par km². Les zones d'anciennes carrières se concentrent au cœur de la ville (intra-mails), secteur où elles ont fréquemment été converties en caves, et le long des grands axes de faubourgs (**Fig. 3**) : Bannier, Madeleine, Saint-Jean, Saint-Vincent, Bourgogne et quartiers Murlins et Saint-Marc.

Une trentaine d'interventions sur le terrain sont réalisés en moyenne chaque année par la DEPR. Ces visites de terrain mettent souvent à contribution, via une convention nouée avec la ville, les spéléologues du Comité Départemental de Spéléologie du Loiret. Ces visites donnent lieu à l'établissement de plans topographiques des cavités et éventuellement à un diagnostic de risque.

3. ANALYSE DU RISQUE PAR LE BRGM DANS LE CADRE DU PROJET SICAVOR

3.1. Des cavités aux configurations contraintes par les caractéristiques géologiques locales

Malgré la rareté des témoignages anciens, les pra-



Fig. 3 : Carte de probabilité de présence de carrières souterraines (source : Orléans Métropole).

tiques des carriers orléanais peuvent être comprises à la lumière de celles en usage dans d'autres régions françaises : marnières des plateaux normands, troglodytes des coteaux de la Loire et du Loir, catiches dans le Nord, etc. On retrouve en effet dans ces secteurs des contraintes similaires à celles de la région d'Orléans.

L'absence de vallons marqués empêche les entrées en cavage (à flanc de coteau), les extractions ne peuvent se faire que depuis la surface du plateau, par l'intermédiaire de puits verticaux ou de descenderies (plans inclinés souvent aménagés en escaliers). En plus de contraindre les rendements, cette difficulté technique participe à la multiplication des carrières artisanales, chacun pouvant sur son terrain prétendre à cette activité. On s'approche ici d'une extraction quasi-généralisée à l'échelle d'un territoire.

L'hétérogénéité du calcaire de Beauce empêche, par ailleurs, toute véritable planification de l'exploitation : la qualité du gisement est découverte à l'avancement. Le carrier suit plus facilement les bancs les plus résistants alors que les « mauvais » matériaux, telles que des poches d'argile, sont laissés en place. L'exploitation se fait ainsi en galeries filantes et/ou en piliers tournés (Fig. 4). Les galeries sont rarement rectilignes, les chambres et les piliers de roche laissée en place sont toujours de dimensions variables. La hauteur des vides est en revanche relativement constante : de l'ordre de

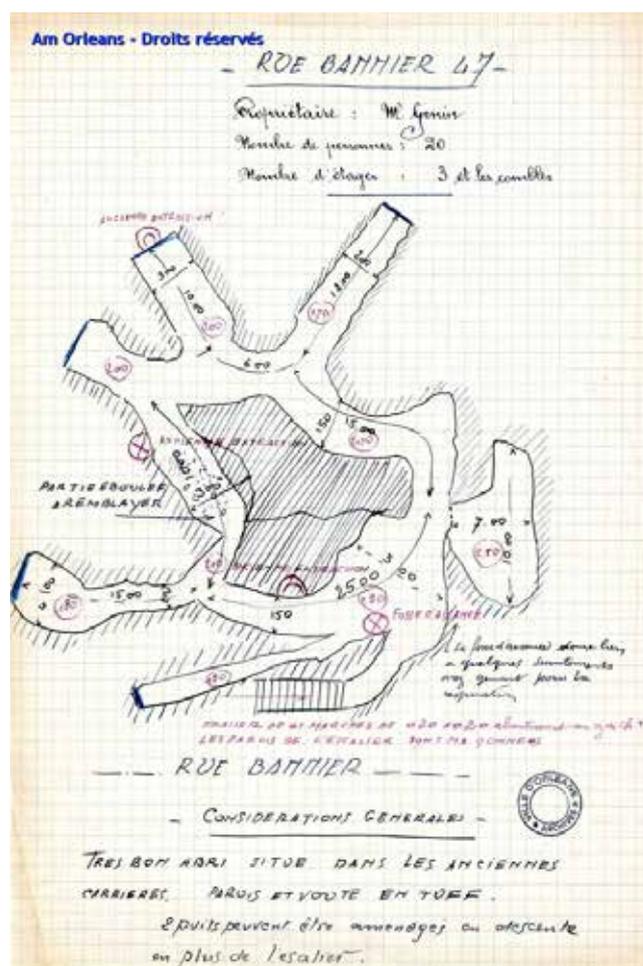


Fig. 4 : Plan schématique d'une carrière avec mode d'exploitation en piliers tournés, rue du Faubourg Bannier, établi par la Défense Passive (source : Archives municipales d'Orléans).

2 à 3 m, elle correspond globalement à une hauteur d'homme. Elle peut toutefois descendre entre 1 et 1,5 m et atteindre au maximum 6 m. Largeur de galerie et section des piliers restent guidées par les contraintes géotechniques liées à cette pratique : plus on crée de vides, plus l'espace souterrain est instable. Le dimensionnement des cavités se fait de manière empirique : on imite ce que font les voisins et on tire leçons des inévitables accidents générés par des extractions trop « gourmandes ». Doté d'une résistance mécanique souvent médiocre, surtout dans les faciès les plus « pâteux » (résistance à la compression comprise entre 0.2 et 1.5 MPa ; Waschkowski 1972), le ciel des galeries prend souvent la forme d'une « voûte », seule possibilité dans ce contexte de limiter les chutes du toit sans procéder à de coûteux confortements. De tels renforcements sont toutefois entrepris, vraisemblablement dans une seconde vie de l'ouvrage, lorsque celui-ci est par exemple aménagé pour des activités de stockage.

La profondeur de la partie basse des carrières se situe généralement entre 8 m et 20 m, sans jamais s'approcher de la nappe phréatique calcaire, obstacle insurmontable à l'extraction artisanale de matériaux. La surface moyenne des carrières varie entre 100 et 2 500 m². Rares sont celles comblées à une époque ancienne, car la réglementation locale allant dans ce sens ne fut édictée que vers 1880 (en même temps que l'obligation de déclaration d'ouverture de carrières). La fin officielle des autorisations d'exploitation fut décrétée en 1910.

3.2. Les mouvements de terrain liés aux cavités : processus initiateurs, facteurs aggravants et zones de faiblesse

Avec le temps, les cavités souterraines, quelles qu'elles soient, tendent à se refermer. Ces déstabilisations se font suivant divers processus et plus ou moins rapidement selon la configuration initiale et les perturbations extérieures. Elles peuvent se limiter à l'intérieur de la cavité ou remonter jusqu'en surface. À Orléans, les désordres de surface les plus courants sont les affaissements (dépression relativement douce de profondeur centimétrique à pluricentimétrique) et les fontis (effondrement brutal de quelques mètres de diamètre et pouvant atteindre 2 m à 3 m de profondeur). Lorsque ces désordres souterrains se produisent sous des infrastructures, ces dernières peuvent être totalement ou partiellement ruinées, voire rendues inutilisables, de manière immédiate (fontis) ou différée (affaissement, fontis). Peu d'accidents graves sont heureusement recensés à Orléans, mais les dommages aux biens restent possibles (Fig. 5).



Fig. 5 : Désordres en surface liés à des effondrements de cavités souterraines à Orléans. Au-dessus, a : Fontis (diamètre 6 m, profondeur 11 m) ; en-dessous, b : Effondrement d'une maison Faubourg Banner. (Cl. : DEPR, Orléans Métropole).



La majorité des cavités orléanaises sont maçonnées, au moins en partie. Les cavités superficielles (caves) le sont intégralement¹, alors que les carrières (plus profondes) ne le sont pas toujours². Les caractéristiques particulièrement médiocres des terrains de surface (remblais, alluvions éventuelles, argiles, roche altérée) les rendent instables et imposent dès leur creusement un renforcement adapté. La plupart des ouvrages de descente (escaliers ou « descenderies », puits) sont ainsi maçonnés, en moellons pour les plus anciens, en parpaings pour les plus récents. La dégradation des mortiers ou celle des moellons, accélérée par les infiltrations d'eau, par l'absence d'aération ou par le manque d'entretien aboutissent à terme à la rupture de ces murs (exemples : Préfecture rue de Bourgogne, rue Coligny), ce qui provoque alors des désordres aux structures les surplombant, voire l'apparition d'un fontis.

Plus bas, une fois atteint les roches en place peu altérées, la stabilité initiale est généralement meilleure. Les faciès « pâteux » et pulvérulents restent probléma-

1 Exemples : rue des Quatre-Fils-Aymon, rue des Ormes-Saint-Victor, rue des Trois-Maries, etc.

2 Exemples : 20 place Croix-Morin, SICAVOR 154 ; 11 rue du Tabour, SICAVOR 405 ; Préfecture 181 rue de Bourgogne, SICAVOR 134 ; etc.

tiques : leur faible résistance à la compression ainsi que l'absence de ciment naturel franc entre les éléments rocheux empêchent une bonne tenue du ciel et des bords de la carrière. Ces zones sont alors taillées selon la configuration la plus stable possible : la « voûte ». Des bancs de meulière contribuent parfois à « stabiliser » l'ensemble. À contrario, des poches de matériaux sensibles à l'eau peuvent fragiliser le cœur de la carrière. Ces poches peuvent être :

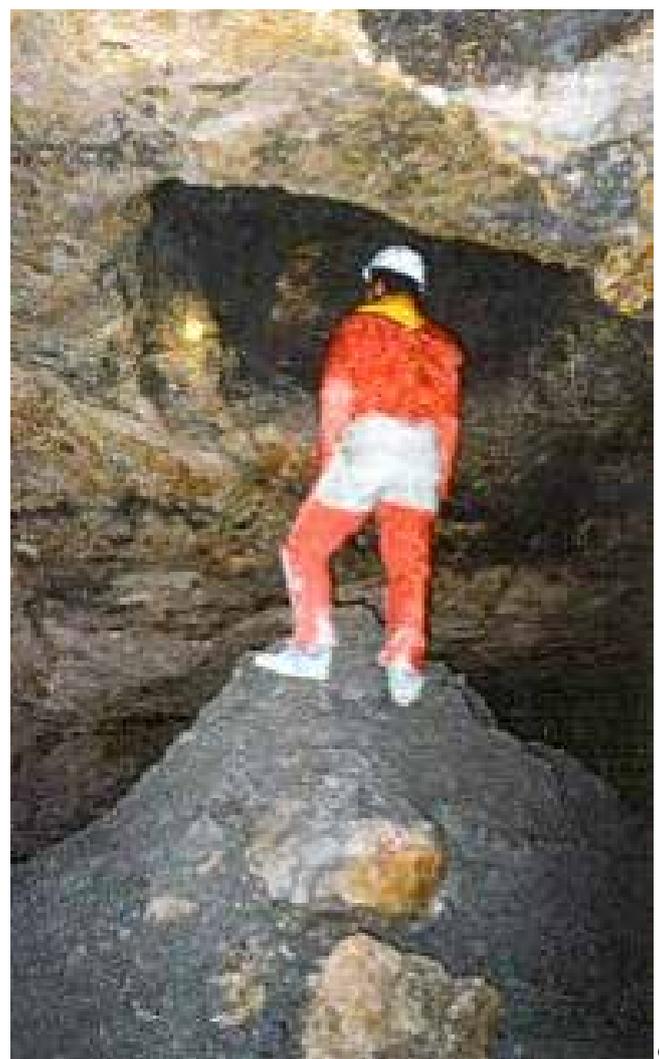
- argileuses : marnes et argiles du Burdigalien venant par endroit surmonter le calcaire de Beauce ou en remplir les dépressions (Fig. 6, c)³,

- ou sableuses : remplissage de cavités karstiques au sein du calcaire⁴.

La situation peut devenir dangereuse lorsque ces poches communiquent avec la surface (exemple : 20 place Croix-Morin, SICAVOR 154) : leur « débouillage » dans la carrière soutire brutalement les matériaux depuis le fond de la cavité jusqu'en surface, ce qui génère un fontis. Des renforcements sont parfois nécessaires pour assurer la stabilité des cavités les plus pro-

³ Exemples : 21 rue Saint-Etienne, SICAVOR 130 ; rue des Aydes.

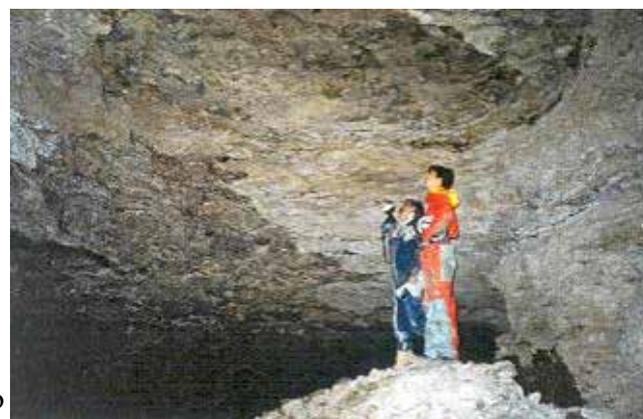
⁴ Exemples : 11 rue du Tabour, SICAVOR 405 ; 4 bis rue de Limare, SICAVOR 614.



a



b



d



fondes. La chute de matériaux venus du toit peut en effet évoluer en cloche de fontis (Fig. 6, b et c)⁵, celle-ci pouvant à terme remonter jusqu'en surface. Des murs maçonnés sont ainsi ponctuellement mis en place devant

⁵ Exemples : 20 place Croix-Morin, SICAVOR 154 ; 4 rue de Limare, SICAVOR 175.

Fig. 6 : Différents types d'instabilités observées dans les cavités orléanaises. a : Maçonnerie ancienne dégradée, presque ruinée (à droite) et maçonnerie récente (à gauche), au 181 rue de Bourgogne, SICAVOR 134 ; b : Décollement du ciel sur une zone de 5 m de diamètre à 11 m de profondeur ; c : Cloche de fontis remontant dans les marnes ; d : Puits en partie effondré, venelle de l'Ecu Bellebat (Cl. a : BRGM ; b et c : DEPR, Orléans Métropole ; d : Comité Départemental spéléologique du Loiret).

les poches d'argile verte pour en éviter l'effondrement⁶. Des voûtes d'ogives viennent également renforcer les ciels instables (Fig. 6, a)⁷, il est vraisemblable que ces voûtes maçonnées, parfois soigneusement travaillées, aient été aménagées à la fin des périodes d'extraction, en vue d'une nouvelle vie de l'ouvrage souterrain⁸.

Les puits constituent souvent la zone de faiblesse préférentielle de ces cavités. Ces ouvrages verticaux interceptent en effet toujours les eaux de ruissellement ou celles circulant dans le sol. Ces venues d'eau concentrées, qu'elles soient naturelles ou accidentelles, accélèrent le vieillissement des maçonneries de surface et peuvent à terme venir saper leur assise lorsque cette dernière est fragilisée (présence d'argile, de calcaire altéré). Ces effondrements se limitent généralement à la tête du puits, leur diamètre est ainsi de l'ordre de 1 m à 2 m (diamètre de l'effondrement = diamètre du puits). Ils peuvent éventuellement s'étendre aux terrains environnants lorsque ceux-ci n'ont pas de tenue. Même s'ils ne sont pas très étendus, ces désordres sont dans tous les cas particulièrement dangereux car ils descendent jusqu'en bas de la carrière : ils sont profonds de plusieurs mètres (Fig. 6, d)⁹. La sécurité des personnes et éventuellement celle des biens est immédiatement remise en cause.

La sécurisation des cavités : de la surveillance au confortement

Les risques liés aux cavités sont parfois incompatibles avec la sécurité des biens et des personnes et nécessitent donc d'être réduits. Dans ces cas, la sécurisation commence par une bonne évaluation des aléas et des enjeux : quelles sont les zones les plus instables ? quels phénomènes peuvent-ils s'y produire ? quelles incidences en surface ? où se trouvent les enjeux ? Il convient ensuite d'adapter les actions correctrices au niveau de risque. Une surveillance attentive permet parfois d'éviter de coûteux travaux. Un entretien dans les règles de l'art permet généralement de ralentir fortement les phénomènes : cela passe par une bonne gestion des eaux et le maintien de l'aération dans la cavité. Dans certains cas, une reprise ou un complément de la maçonnerie est nécessaire (par exemple : re-jointoiement des moellons, Fig. 7 ; ou ajout de pilier). Les cas les plus inquiétants nécessitent un confortement étendu. L'état particulièrement dégradé de certaines cavités, en particulier en présence d'enjeux importants, nécessite parfois un comblement intégral. En 2015, près de 3 000 m³ de béton ont ainsi été injectés lors d'un projet

⁶ Exemple : 55 rue de la Bretonnerie, SICAVOR 403.

⁷ Exemples : 11 rue du Tabour, SICAVOR 405 ; Préfecture 181 rue de Bourgogne, SICAVOR 134 ; etc.

⁸ A ce sujet, voir dans cet ouvrage l'article de C. Alix, D. Morlegem *et al.*

⁹ Exemples : venelle de l'Ecu Bellebat ; 20 place Croix-Morin, SICAVOR 154.

de construction rue de Lahire¹⁰. Des solutions alternatives au béton sont désormais éprouvées pour certaines configurations (par exemple : comblement par billes d'argile, cimentées par un coulis sous pression). De nombreux guides méthodologiques à destination de l'ensemble du public concerné existent (IFSTTAR, 2014 ; INERIS, 2016). Au-delà de ces traitements à gérer au cas par cas, une politique globale de prévention et d'information du public permet de gérer au mieux ce risque.

4. LES APPORTS DU SCAN LASER 3D ZEB-REVO

Les méthodes topographiques « classiques » sont souvent contraintes en milieu souterrain : absence de signal GPS, progression lente en raison de la « circonvolution » des galeries, objets géologiques pas toujours maîtrisés par les intervenants, etc. La mise sur le marché récente d'un scanner laser 3D mobile offre des potentiels jusqu'alors insoupçonnés (Zlot *et al.* 2014 ; Dewez *et al.* 2016 ; Dewez *et al.* 2017) : acquisition à grand rendement (jusqu'à 10 fois plus rapide que les techniques classiques), génération de cartes 3D reliant surface et sous-sol, localisation facilitée des enjeux en surface, estimation de l'épaisseur des terrains de recouvrement, etc. Ce matériel a été testé dans le cadre du programme de recherche SICAVOR.

4.1. Le matériel

Le ZEB-REVO est un scanner laser 3D mobile, portable à la main, développé par l'entreprise anglaise GeoSLAM. Il se compose d'une « tête », possédant des capteurs lasers et une centrale inertielle, ainsi que d'une

¹⁰ 1-3-5 rue de Lahire, SICAVOR 79.



Fig. 7 : Confortement d'une cavité par re-jointoiement des piliers et arcs médiévaux, au 52 rue Sainte-Euverte, SICAVOR 56 (Cl. : C. Alix, Pôle d'Archéologie de la ville d'Orléans).

mémoire de stockage et d'un ordinateur contenu dans un sac à dos. Les deux sont reliés via un câble. Cet appareil relève jusqu'à 40 000 points par seconde.

4.2. Méthodologie de cartographie

L'appareil s'utilise après une première observation de la carrière permettant de caractériser ses grandes lignes (longueur, présence d'obstacles, etc.). Un trépied, surmonté par le ZEB-REVO est installé à un endroit précis (la station de départ). Une fois l'appareil initialisé et prêt à être utilisé, le manipulateur met le sac à dos, prend l'appareil à la main et commence à scanner la zone voulue en marchant à allure lente dans la cavité et en gardant la « tête » de l'appareil devant soi. Le relevé d'une zone est appelé une boucle. Afin d'optimiser la qualité du relevé, il est important de réaliser des boucles fermées (c'est-à-dire revenir à la station de départ) ne dépassant pas 25 minutes, pour éviter le phénomène de dérive. En effet, l'instrument géoréférence de manière automatique en utilisant les points venant d'être relevés. Une fois revenu à la zone de départ, le ZEB-REVO est à nouveau posé sur son trépied et la prise de mesure est interrompue. Pour le relevé d'une cavité de grande taille, il peut être nécessaire de réaliser plusieurs boucles et de garder une zone commune entre les deux pour les recalés lors du post-traitement.

Il est également conseillé de réaliser une boucle unique pour des zones particulières (escaliers par exemple). Pour faciliter le post-traitement des données, il est intéressant d'ajouter des repères physiques (plots, cônes, etc.) à proximité de la station de départ et le long du cheminement du relevé, afin de recalés les boucles mais également pour aider l'instrument à bien se repérer dans l'espace.

Le post-traitement est réalisé à l'aide d'un logiciel de traitement de nuage de points (par exemple Cloud-Compare®). Grâce aux zones communes de recouvrement entre les boucles, les relevés peuvent être recalés les uns par rapport aux autres, permettant d'obtenir une cartographie complète de la zone relevée par l'instrument. Par la suite, ce rendu sert à extraire les informations nécessaires à la compréhension, à l'évaluation du risque lié à la présence de cavités souterraines et à la recherche de solutions si besoin.

4.3. Comparaison avec les levés au scanner laser FARO® Focus 3D

Quatre cavités souterraines ont fait l'objet d'un relevé au ZEB-REVO dans le cadre d'un stage financé par le programme SICAVOR. Celui de la cave-carrière de l'ancien hôtel d'Euverte Hatte, 11 rue du Tabour, SICAVOR 405 (Fig. 8) a, en complément, été comparé avec

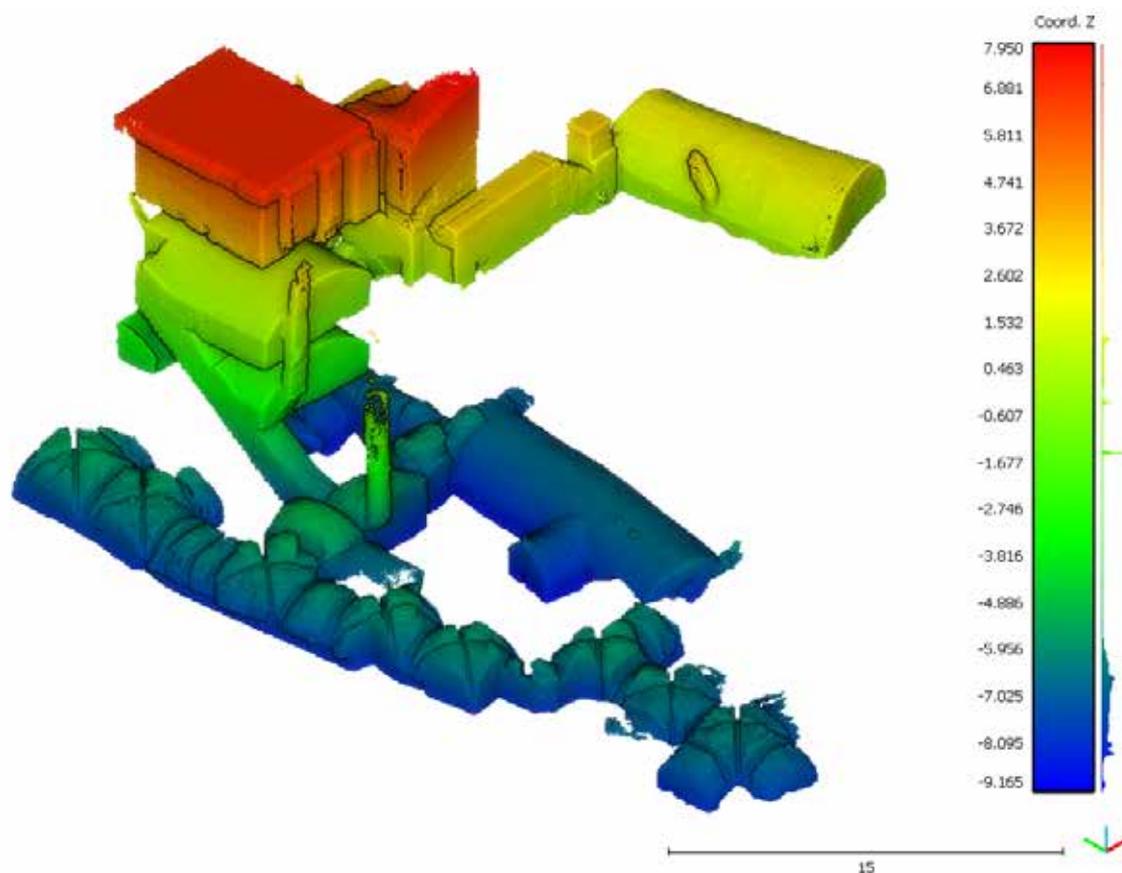


Fig. 8 : Représentation 3D de la cave et de la cave-carrière de l'ancien hôtel d'Euverte Hatte, 11 rue du Tabour (SICAVOR 405) réalisé par le BRGM avec le scanner laser ZEB-REVO (Relevé : Mylène Froidevaux, BRGM).

	FARO® Focus 3D	ZEB-REVO
Volume de données	≈ 21 Go	≈ 2,1 Go
Nombre de points	≈ 1,150 milliard	≈ 110 millions
Durée d'acquisition	≈ 3 h	≈ 50 min
Durée de post-traitement	≈ 2 h 30	≈ 40 min
Points positifs	- Très grande précision (millimétrique)	- Précision moyenne à grande (centimétrique)
	- Grande portée (> 50 m en intérieur)	- Portable et maniable
	- Possibilité de coloriser les nuages de points	- Rapidité d'acquisition et de post-traitement
	- Possibilité de modifier les paramètres d'acquisition	- Relevé dans des zones difficiles d'accès
Points négatifs	- Besoin impératif d'un trépied	- Possibilité de dérive
	- Multiplication du nombre de scan car acquisition depuis un point fixe	- Absence de contrôle dans les calculs
	- Acquisition et post-traitement longs	- Calcul difficile dans des zones homogènes
	- Volume de données important	- Portée limitée à 30 m en intérieur

Fig. 9 : Comparaison des caractéristiques et de l'utilisation du FARO® et du ZEB-REVO (Tableau : Mylène Froidevaux, BRGM).

celui effectué à l'aide du FARO® Focus 3D¹¹. Cette comparaison a permis d'évaluer les avantages et les inconvénients de chacun (Fig. 9).

Le traitement des données FARO® a consisté à recalculer les 41 nuages de points issus du relevé, à partir de repères artificiels (sphères blanches déposées au moment du relevé) et de repères plus « naturels » (les angles de pierres par exemple). Le traitement des données du ZEB-REVO a consisté à assembler et recalculer les 4 boucles constituant le relevé de la cavité. Les deux nuages de points obtenus ont ensuite été comparés. Le nuage de point final du ZEB-REVO est dix fois moins volumineux que celui du FARO® puisqu'il compte dix fois moins de points. Cette différence se reflète sur les temps d'acquisition et de post-traitement (trois fois plus de temps avec le FARO® pour recueillir les données et les traiter). La distance entre les deux nuages de points a été calculée. Elle indique deux zones de dérive d'un appareil par rapport à l'autre :

- au niveau de certaines voûtes d'ogives, deux stations de FARO® ont été réalisées sous des voûtes opposés afin d'acquérir un maximum de données sur l'architecture des voûtes d'ogives ; il reste toutefois des zones d'ombres inhérentes à la position du scanner (recul, espace disponible) et la profondeur des voûtes ;

- au niveau d'une zone particulièrement lisse, le ZEB-REVO, semble plus difficilement trouver ses points de repères. La dérive maximale y est de l'ordre de 20 cm.

Cette comparaison entre les deux technologies, dans le cadre d'un relevé axé sur l'étude des risques, permet de présenter les constats suivants :

¹¹ Relevé effectué par Daniel Morleghem (contractuel SICAVOR) ; le matériel appartient à la MSH Centre-Val de Loire.

- pour le ZEB-REVO : grand rendement et précision suffisante pour l'approche « risque » mais médiocre pour l'approche « architecturale » ou « archéologique »,

- pour le FARO® : temps de réalisation des relevés sur le terrain plus important et « sur-qualité » pour l'approche « risque » mais précision excellente pour l'approche « architecturale » ou « archéologique ».

5. CONCLUSION

Le projet SICAVOR a permis au BRGM et aux services de la ville d'Orléans (Pôle d'Archéologie et DEPR) d'échanger leurs compétences. Les nombreux cas d'instabilités traités de manière opérationnelle par la DEPR ont ainsi alimenté les connaissances scientifiques du BRGM non seulement en matière de processus de mouvements de terrain affectant ces cavités mais aussi en termes de facteurs aggravant. Les visites archéologiques ont, par ailleurs, offert l'opportunité au BRGM et à la DEPR de découvrir ou de surveiller plusieurs cavités et d'intégrer leur histoire à une évaluation des risques souvent très technique.

Les perspectives à l'issue de ce travail sont nombreuses. L'intégration d'une description géologique précise dans les comptes rendus de visite améliorerait la connaissance géologique du sous-sol, ce qui à terme aurait un intérêt urbanistique pour les projets de construction. Un traitement statistique des configurations de l'ensemble des cavités permettrait d'aboutir à une évaluation prédictive de l'aléa mouvement de terrain à l'échelle de la ville, voire de la métropole. L'intégration de la technologie ZEB-REVO dans la cartographie des cavités, servirait, lorsque cela s'y prête, à gagner en précision dans l'évaluation des risques ou à offrir un support tridimensionnel d'une grande utilité visuelle.

BIBLIOGRAPHIE**Angot et al. 1973**

ANGOT D., CHEZEAUD J.-H., PITOT J., « Les granulats en calcaire de Beauce », *Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° spécial U, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1973, pp. 82-99.

<http://www.geotech-fr.org/archives-congres/congres-francais/JELPC/1972/details>

Charles 2015

CHARLES N., *Guides géologiques - Val de Loire*, Éditions BRGM, 2015.

Dewez et al. 2016

DEWEZ T. J.B., PLAT E., DEGAS M., RICHARD T., PANNET P., THUON Y., MEIRE B., WATELET J.-M., CAUVIN L., LUCAS J., DIAN G., « Handheld Mobile Laser Scanners Zeb-1 and Zeb-Revo to map an underground quarry and its above-ground surroundings », communication dans le congrès : *2nd Virtual Geosciences Conference (VGC2016)*, 22-23 Sept. 2016, Bergen, Norway.

<https://hal-clermont-univ.archives-ouvertes.fr/TDS-MACS/hal-01348956v1>

Dewez et al. 2017

DEWEZ T. J.B., YART S., THUON Y., PANNET P., PLAT E., « Towards cavity-collapse hazard maps with Zebedee handheld laser scanner point clouds », *The Photogrammetric Record*, vol. 32, 2017, pp. 354-376.

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/phor.12223/full>

IFSTTAR 2014

IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), *Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées - Guide méthodologique*, éd. IFSTTAR, 2014.

INERIS 2016

INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques), *Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique*, éd. INERIS, 2016.

Lorain 1973

LORAIN J.-M., « La géologie du calcaire de Beauce », *Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° spécial U, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1973, pp. 14-53.

<http://www.geotech-fr.org/archives-congres/congres-francais/JELPC/1972/details>

Mégnién 1980

MEGNIEN C., *Synthèse géologique du bassin de Paris*, Éditions BRGM, 1980.

Ménillet 1981

MÉNILLET F., « Les lithofaciès des calcaires de Beauce (Stampien à Aquitanien) du Bassin de Paris (France) », *Bulletin du BRGM*, section IV, n°1, 1980-1981, pp. 15-55.

Waschowski 1973

WASCHOWSKI E., « Études géotechniques des calcaires de Beauce », *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° spécial U, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1973, pp. 115-141.

<http://www.geotech-fr.org/archives-congres/congres-francais/JELPC/1972/details>

Zlot, Bosse 2014

ZLOT R., BOSSE M., « Three-dimensional mobile mapping of caves », *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 76, n° 3, 2014, pp. 191-206.

***MÉMOIRE DE MYLÈNE FROIDEVAUX, SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE ET
ÉVALUATION DES RISQUES D'EFFONDREMENTS DES CAVITÉS SOUTER-
RAINES RECENSÉES À ORLÉANS, PAR LE PROJET SICAVOR***



Université de Reims Champagne-Ardenne

Unité de Formation et de Recherche des Sciences Exactes et Naturelles

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Master Géosciences et Risques Naturels

Thème

Synthèse géologique et évaluation des risques d'effondrements des cavités souterraines recensées à Orléans, par le projet SICAVOR

Encadré par :

Mr Gildas Noury, ingénieur géologue spécialisé en géotechnique et en risques naturels au Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM)

Présenté par :

Mlle Mylène Froidevaux

Supervisé par :

Mr Jean-Paul Deroin, responsable du Master Géosciences et Risques Naturels

Année universitaire 2016/2017



Résumé

Le programme SICAVOR (« Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans ») vise à inventorier les anciennes trames urbaines d'Orléans, à travers l'étude des caves et des carrières. Ce projet d'étude permet de découvrir, de localiser et d'étudier ces cavités anthropiques. Creusées dans le calcaire de Beauce, entre le IV^{ème} et le XIX^{ème} siècle, les cavités, en particulier les carrières, ont été oubliées au fil du temps. L'exploitation de ces carrières, bien souvent en galeries ou en chambres, nécessite une étude afin d'établir un diagnostic de stabilité. Bien que la plupart présente des confortements, allant des voûtes d'ogives du Moyen-Âge aux maçonneries récentes, certaines cavités peuvent présenter des instabilités non négligeables, nécessitant une surveillance. Dans l'ensemble, Orléans présente des cavités anthropiques en bon état mais l'urbanisation accrue de la zone d'étude accentue le risque « mouvement de terrain » lié aux cavités souterraines. La profondeur, l'emprise et l'épaisseur de recouvrement étant des facteurs clés dans un diagnostic de stabilité, la technologie du scanner 3D ZEB-REVO permet une approche précise et rapide pour évaluer les risques liés aux cavités anthropiques.

Mots clés : cavités anthropiques, calcaire de Beauce, instabilités, confortements, ZEB-REVO

Abstract

The SICAVOR program ("Contextual Information System on Cellars of Orléans") aims to inventory the old urban traces of Orléans, through the study of cellars and quarries. This research project makes it possible to discover, locate and study these anthropogenic cavities. Dig in the limestone of Beauce, between the 4th and the 19th century, cavities, especially quarries, have been forgotten over time. The exploitation of these quarries, often in galleries or rooms, requires a study to establish a diagnosis of stability. Although most of them have reinforcements, ranging from medieval vaults to the recent masonry, some cavities may present instabilities that are not negligible, requiring monitoring. Overall, Orléans has anthropic cavities in good condition, but the increased urbanization of the study area accentuates the risk of "ground movement" linked to the underground cavities. The ZEB-REVO 3D scanner technology allows for a precise and rapid approach to assessing the risks associated with anthropogenic cavities, with depth, grip and cover thickness being key factors in a stability diagnosis.

Key words: anthropic cavities, Beauce limestone, instabilities, confections, ZEB-REVO

Remerciements

Au terme de ce travail, je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont aidé, soutenu et accompagné tout au long de ces six mois de stage.

Ainsi, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon maître de stage, Monsieur Gildas Noury, ingénieur géologue spécialisé en géotechnique et en risques naturels au Bureau de Recherche Géologique et Minière, pour le temps qu'il m'a accordé, pour ses précieux conseils, sa pédagogie et sa confiance.

Je tiens à remercier Monsieur Olivier Cerdan, responsable de l'unité Risques Instabilités Gravitaires, érosion des versants et des sols du BRGM, ainsi que tous les membres de l'unité, pour leur accueil. Je remercie plus particulièrement Messieurs Silvain Yart, Florian Masson et Thomas Dewez, pour le temps qu'ils m'ont accordé à me former à l'utilisation et au traitement des données du ZEB-REVO, ainsi que Monsieur Luc Closset pour ses explications et ses conseils, concernant l'étude des cavités souterraines.

Je tiens également à remercier Monsieur Imed Ksibi, de la Direction de l'Environnement et de la Prévention des Risques d'Orléans Métropole, qui m'a accordé une partie non négligeable de son temps à répondre à toutes mes questions et à organiser les visites des cavités orléanaises.

Je remercie les archéologues du Pôle d'Archéologie de la ville d'Orléans, Messieurs Clément Alix et Daniel Morleghem, pour m'avoir transmis leurs connaissances sur l'histoire de la ville et de ses cavités anthropiques, ainsi que pour leur invitation à les accompagner dans leurs visites.

Je tiens également à remercier le Comité Départemental de Spéléologie du Loiret, que j'ai pu accompagner durant mes six mois de stage, dans les carrières souterraines du centre d'Orléans.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, pour leur soutien, leurs encouragements et leur grand intérêt dans mon parcours universitaire.

Table des matières

I -	Introduction	10
II -	Présentation du Bureau de Recherche Géologique et Minière	11
III -	Cadre de l'Étude	12
III.1 -	Contexte géologique et hydrogéologique	12
III.2 -	Contexte historique	17
III.3 -	Gestion historique des cavités orléanaise et présentation du projet SICAVOR	19
IV -	Travaux réalisés	23
IV.1 -	Etat de l'art succinct de la gestion des cavités en France	23
IV.2 -	Données de base	23
IV.2.1 -	Recherche bibliographique	24
IV.2.2 -	Systèmes d'Informations Géographiques SICAVOR et SIGOR	25
IV.2.3 -	Les bases de données	25
IV.3 -	Organisation et déroulement des visites	25
IV.4 -	ZEB et FARO : deux outils pour l'évaluation du risque	28
V -	Résultats et analyse	31
V.1 -	Synthèse géologique	31
V.1.1 -	Géologie observée	31
V.1.2 -	Synthèse géologique	32
V.2 -	Typologie des cavités	35
V.2.1 -	Les caves	37
V.2.2 -	Les caves-carrières	39
V.2.3 -	Les carrières	41
V.3 -	Essais de calculs géotechniques : la carrière du 20 Place Croix Morin	41
V.4 -	Evaluation du risque mouvement de terrain des cavités	42
V.4.1 -	Définition du risque mouvement de terrains lié aux cavités	42
V.4.2 -	Analyse des observations de terrains	45
V.4.3 -	Analyse de la base de données des interventions d'Orléans Métropole	53
V.4.4 -	Evaluation du risque lié aux cavités anthropiques intra-muros	55

V.5 -	Apport du ZEB dans la gestion des cavités	58
VI -	Perspectives	66
VI.1 -	Fin du projet SICAVOR	66
VI.2 -	L'utilisation du ZEB pour la gestion des cavités	66
VI.3 -	Vers une approche à long terme de la gestion du risque lié aux cavités anthropiques	67
VII -	Conclusion	68
VIII -	Références bibliographiques	69
IX -	Annexes	71

Table des illustrations

Illustration 1 :	Extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000 présentant le Bassin de Paris, le département du Loiret et la commune d'Orléans.	12
Illustration 2 :	Extrait des cartes géologiques d'Orléans XXII-19 (G. Berger) et de la Ferté-Saint-Aubin XXII-20 (M. Gigout) au 1/50 000	13
Illustration 3 :	Log-lithostratigraphique de la géologie loirétaine (Charles et Graviou, 2016)	14
Illustration 4 :	Hydrogéologie de l'aquifère des formations de Beauce (d'après BRGM, 1995)	16
Illustration 5 :	Emprise des quatre enceintes historiques d'Orléans (d'après Alix 2008, modifiée)	18
Illustration 6 :	Emprise de la zone d'étude et du quartier Saint-Aignan	21
Illustration 7 :	Fiche descriptive	27
Illustration 8 :	Photographie du ZEB-REVO, à gauche la « tête » reliée à la mémoire de stockage et au calculateur via le câble, 18/07/2017.	29
Illustration 9 :	Station de départ du ZEB-REVO, exemple pris dans la cave-carrière du 20 Place Croix-Morin, 05/07/2017.	29
Illustration 10 :	Station de relevé du FARO® Focus 3D, exemple dans une cave rue Sainte-Euverte (Crédits : Pôle d'archéologie, 2016)	30
Illustration 11 :	Petits bancs de meulière, exemple de la carrière du 20 Place Croix-Morin, 05/07/2017	31
Illustration 12 :	Poche d'argiles présente dans la cave-carrière du 20 Place Croix-Morin, 05/07/2017.	31
Illustration 13 :	poche d'argile sableuse probablement due à un réseau karstique, exemple de la carrière du 11 rue du Tabour, 06/04/2017.	32
Illustration 14 :	Coupe géologique numéro 1	33
Illustration 15 :	Coupe géologique numéro 2	33
Illustration 16 :	Coupe géologique numéro 3	34

Illustration 17 : Carte d'Orléans localisant les visites des cavités de Mars à Août 2017.....	36
Illustration 18 : Différence de niveau entre les étages 1 et 2 de la cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor (n°7), 25/04/2017.	37
Illustration 19 : Exemple de soupirail, en fond de cave, au 9 Cloître Saint-Aignan (n°5), 12/04/2017.	37
Illustration 20 : Maçonnerie du mur à l'aide de moellons liés par un mortier, cave du 9 cloître Saint-Aignan (n°5), 12/04/2017.....	38
Illustration 21 : Empreintes laissées par les planches de bois, cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor (n°7), 25/04/2017.	38
Illustration 22 : Cave du 2 rue des 3 Maries, 05/07/2017.....	38
Illustration 23: Localisation des caves (figurés bleu clair), des carrières (figurés verts) et des ouvrages civils (figurés bleu foncé) dans la zone d'étude du projet SICAVOR (d'après la bdcavité du BRGM, modifiée).	39
Illustration 24 : Cave semi-excavée de la cave-carrière du 4 Rue Coligny (n°2), 05/04/2017.	40
Illustration 25 : Accès à la cave du 4b rue de Limare (n°11), 05/07/2017.....	40
Illustration 26 : Schéma type d'un affaissement dû à la présence d'une cavité souterraine (d'après IFSTTAR, 2014).	43
Illustration 27 : Schéma type de la survenue d'un effondrement localisé : un fontis (d'après IFSTTAR, 2014).....	43
Illustration 28 : Schéma type d'un effondrement généralisé dû à la présence d'une cavité souterraine (d'après IFSTTAR, 2014).....	43
Illustration 29 : facteurs de prédisposition au risque de mouvements de terrains, lié à la présence d'une cavité anthropique.	44
Illustration 30 : poche d'argile, carrière du 21 rue Saint-Étienne (n°4), 07/04/2017.....	46
Illustration 31 : poche d'argile sableuse, carrière du 11 rue du Tabour (n°3), 06/04/2017.	46
Illustration 32 : Effritement du calcaire de la paroi de la carrière, 55 rue de la Bretonnerie (n°1), 03/04/2017.....	47
Illustration 33 : Calcaire argileux composé de petits blocs de calcaires, 21 rue Saint-Etienne (n°4), 07/04/2017.....	47
Illustration 34: Banc de meulière de la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.	48
Illustration 35 : Remontée de cloche de fontis à côté d'un puisard de la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.....	48
Illustration 36 : Remontée de cloche de fontis en fond de la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.....	48
Illustration 37 : Zone d'altération prononcée du calcaire de Beauce dans la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.....	48
Illustration 38 : Intérieur du puit agrandi avec des restes de sa maçonneries dans la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.	48

Illustration 39 : Effondrement du toit au fond de la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017	48
Illustration 40 : Précipitation de carbonate de calcium dans la carrière du 55 rue de la Bretonnerie (n°1), 03/04/2017.	49
Illustration 41 : Ecoulement d'eau au sol de la carrière du 11 rue du Tabour (n°3), 06/04/2017.	49
Illustration 42 : Racines au toit de la carrière du 11 rue des Aydes (n°8, hors SICAVOR), 16/05/2017.	49
Illustration 43 : Altération du mortier entre deux blocs de pierre dans la carrière du 21 rue Saint-Etienne (n°4), 07/04/2017.	50
Illustration 44 : Exemple d'effritement d'une paroi maçonnée dans la cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor (n°7), 25/04/2017.	50
Illustration 45 : Fissure dans le linteau d'une niche, présente dans les escaliers de la cavité du 21 rue Saint-Etienne (n°4), 07/04/2017.	51
Illustration 46 : Exemple de fissure au niveau de la maçonnerie d'un puit dans la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.	51
Illustration 47 : Exemple de voutes d'ogives observées dans la carrière du 11 rue de Tabour (n°3), 06/04/2017.	52
Illustration 48 : Exemple de voûtes retrouvées dans la carrière du 4 rue de Limare (n°12), 05/07/2017.	52
Illustration 49 : Exemple de maçonnerie enduite, observé dans la cave du 4ter rue des 4 fils Aymon (n°6), 24/04/2017.	52
Illustration 50 : Exemple de maçonnerie récente, reprenant une maçonnerie ancienne, observé dans la carrière du 11 rue de Tabour (n°3), 06/04/2017.	52
Illustration 51 : Confortement du ciel avec des briques et des tiges de fer, observé dans la carrière du 11 rue du Tabour (n°3), 06/04/2017.	53
Illustration 52 : Graphique des interventions intra-muros, extra-muros et en agglomération liées à la présence de cavités souterraines anthropiques, entre 2010 et 2017, obtenues par la base de données d'Orléans Métropole.	54
Illustration 53 : Localisation des interventions du service risque d'Orléans Métropole et des importants travaux, entre 2010 et 2017.	55
Illustration 54: Représentation 3D du site du Centre Charles Péguy (en mètre), réalisée avec le ZEB-REVO le 06/04/2017.	59
Illustration 55 : Histogramme représentant la distance entre les deux nuages de points ZEB et FARO®, permettant de déterminer la dérive du scanner laser ZEB.	61
Illustration 56 : Représentation 3D de la distance entre les deux nuages de points FARO® et ZEB.	61
Illustration 57 : Coupe transversale de la galerie est de la carrière du 11 rue du Tabour, relevé avec le ZEB-REVO le 06/04/2017.	62

Illustration 58 : Coupe transversale de la galerie est de la carrière du 11 rue du Tabour, relevé avec le FARO® Focus 3D le 06/04/2017.....	62
Illustration 59 : Coupe transversale de la galerie ouest de la carrière du 11 rue du Tabour, relevé avec le ZEB-REVO le 05/04/2017.....	63
Illustration 60 : Coupe transversale de la galerie ouest de la carrière du 11 rue du Tabour, relevé avec le FARO® Focus 3D le 05/04/2017.....	63
Illustration 61 : Coupe longitudinale du sol du 1 ^{er} niveau de cave au 11 rue du Tabour, relevé avec le ZEB-REVO le 05/04/2017.....	64
Illustration 62 : Coupe longitudinale du sol du 1 ^{er} niveau de cave au 11 rue du Tabour, relevé avec le FARO® Focus 3D le 05/04/2017.....	64

Table des tableaux

Tableau 1 : Adresses et dates des visites des cavités de Mars à Août 2017.....	35
Tableau 2 : Etat des cavités étudiées de mars à août 2017.....	55
Tableau 3 : Détermination de la profondeur, des hauteurs de vide et des épaisseurs de recouvrement pour chaque cavité étudiée.....	57
Tableau 4: Comparaison des caractéristiques générales des nuages de points FARO® et ZEB.....	59
Tableau 5 : Comparaison des caractéristiques du FARO® Focus 3D et du ZEB-REVO.....	65

Table des annexes

Annexe 1 : Echelle chrono-stratigraphique.....	72
Annexe 2 : Limites de la formation des calcaires de Beauce.....	74
Annexe 3 : Localisation des nappes libres et captives dans les formations de Beauce.....	76
Annexe 4 : Circulation karstique du val d'Orléans.....	78
Annexe 5 : Cartes anciennes de la ville d'Orléans.....	80
Annexe 6 : Extrait de la loi du 13 juillet 1982, modifié le 22 juillet 1987 et du Décret d'application 90-918 du 11 octobre 1990.....	83
Annexe 7 : Extrait du journal de la République de Centre, paru le mardi 9 mai 2017.....	89
Annexe 8 : Cave-carrière du 55 rue de la Bretonnerie : fiche descriptive, relevé ZEB-REVO et photographies.....	92
Annexe 9 : Cave-carrière du 4 rue Coligny (Crypte Saint-Serge et Bacchus) : fiche descriptive, croquis et photographie.....	96

Annexe 10 : Cave-carrière du 11 rue du Tabour (Centre Charles Péguy) : fiche descriptive, relevé ZEB-REVO et photographies.....	101
Annexe 11 : Cave-carrière du 21 rue Saint-Étienne (Rectorat de l'Académie Orléans-Tours) : fiche descriptive, croquis et photographies	106
Annexe 12 : Cave du 9 Cloître Saint-Aignan : fiche descriptive, croquis et photographies	110
Annexe 13 : Cave du 4ter rue des 4 fils Aymon : fiche descriptive, croquis et photographies.....	114
Annexe 14 : Cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor : fiche descriptive, croquis et photographies...	118
Annexe 15 : Carrière du 11 rue des Aydes : fiche descriptive, croquis et photographies.....	122
Annexe 16 : Cave-carrière 20 Place Croix-Morin : fiche descriptive, relevé ZEB-REVO et photographies	126
Annexe 17 : Cave du 2 rue des Trois Maries : fiche descriptive, relevé ZEB-REVO et photographie	132
Annexe 18 : Cave-carrière du 4b rue de Limare : fiche descriptive, croquis et photographies.....	135
Annexe 19 : Cave-carrière 4 rue de Limare : fiche descriptive, croquis et photographies.....	139
Annexe 20 : Résumé des informations importantes et de l'état de chacune des cavités visitées de mars à août 2017	143
Annexe 21 : Plan du relevé de carrière souterraine du 11 venelle de l'Écu Bellebat, par les spéléologues du CDS 45, le 30 mars 2017.....	146
Annexe 22 : Mesures des hauteurs de toit, des largeurs de la galerie et des épaisseurs de recouvrement, de la carrière du 20 Place Croix-Morin, à l'aide du nuage de points issu du relevé du ZEB-REVO, du 05 juillet 2017.....	148
Annexe 23 : Extrait du dossier de l'IFSTTAR de 2014, sur les méthodes des aires tributaires, des plaques et des poutres.....	151
Annexe 24 : Tableau de la méthode de Terzaghi	155
Annexe 25 : Liste d'interventions (2010 – 2017) du service risque d'Orléans Métropole, concernant des désordres liés aux cavités souterraines intra-muros.....	157
Annexe 26 : Localisation des coupes transversale pour l'étude comparative entre le FARO® Focus 3D et le ZEB-REVO	162

I - Introduction

La commune d'Orléans, située dans le département du Loiret et dans la région Centre-Val de Loire, est principalement connue, du grand public, pour son histoire. Située à 120 km, au sud-ouest de Paris, la ville ne cesse de s'urbaniser. La présence de cavités souterraines (caves et carrières) dans le centre urbain d'Orléans est confirmée depuis bien longtemps, mais peu connue de tous ces habitants. Pourtant, la problématique liée aux cavités souterraines n'est pas nouvelle. Il est attesté qu'une cavité souterraine anthropique abandonnée est destinée à la ruine, à plus ou moins long terme. Ces deux constats tendent à faire d'Orléans une ville présentant un risque « mouvement de terrain », lié aux cavités anthropiques, important. La ville d'Orléans a d'ailleurs mis en place un service spécifique s'occupant des désordres liés à la présence de ces caves et carrières.

En parallèle, un programme de recherche axé sur l'histoire des cavités souterraines anthropiques d'Orléans a vu le jour en 2015 : le programme SICAVOR (« Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans »). Ce projet, d'une durée de trois ans, consiste à inventorier les trames urbaines à partir de l'étude historique, archéologique et architecturale des caves et carrières du centre orléanais. Outre cet objectif principal, ce projet permet de découvrir, de localiser et d'étudier les cavités souterraines anthropiques. Le BRGM intervient, dans la troisième année du programme, afin d'évaluer le risque « mouvements de terrain », en particulier les effondrements, liés à la présence de ces cavités souterraines.

Après avoir présenté le contexte d'étude général et les travaux réalisés durant les six derniers mois, ce présent mémoire aura pour objectif de réaliser une synthèse géologique du site d'étude que représente le centre urbain d'Orléans. Par la suite, une typologie des cavités retrouvées à Orléans, ainsi qu'une évaluation des cavités étudiées seront établies. Pour aider dans cette étude, le scanner 3D ZEB-REVO, de l'entreprise GeoSLAM, a été utilisé, permettant de mettre en évidence ses compétences dans la gestion du risque lié aux cavités anthropiques.

II - Présentation du Bureau de Recherche Géologique et Minière

Le BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) créé en 1959. En France un EPIC est une personne morale de droit public gérant une activité de service public. Le BRGM est placé sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Économie.

C'est l'établissement de référence dans le domaine des sciences de la terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. Il se compose de plus de 1 000 salariés, répartis au sein de son centre scientifique et technique à Orléans, et dans treize directions régionales et cinq délégations régionales en France métropolitaine, et cinq directions régionales et deux antennes en Outre-mer. Depuis, mars 2017, le BRGM est présidé par Madame Michelle Rousseau.

Les missions du BRGM portent principalement sur la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques, la coopération internationale et la sécurité minière. Plus précisément, le BRGM a pour but d'améliorer les connaissances géologiques du sous-sol, de développer les énergies renouvelables en promouvant la géothermie, de surveiller les anciens sites miniers, de gérer la ressource en eau et les matières premières minérales, de participer aux recherches sur le stockage géologique de l'énergie et du CO₂, de connaître, anticiper et gérer les risques naturels et enfin, de gérer les environnements pollués.

Pour répondre à tous ces objectifs, le BRGM est constitué de plusieurs directions, eux-mêmes composées de plusieurs unités. L'unité DRP / RIG est l'unité des Risques liés aux Instabilités Gravitaires, à l'érosion des versants et des sols, de la Direction Risques et Prévention. Cette unité agit pour la sécurité des personnes et l'aménagement des territoires impactés par des cavités, l'érosion ou des mouvements de terrains. Pour se faire, l'unité caractérise et cartographie le risque via le recueil de données, entreprend la surveillance de zones à forts enjeux via divers outils et méthodes d'observations (géophysiques, essais géotechniques, télédétection, scanners 3D, logiciels de modélisations etc.) et agit en tant qu'expert dans la réalisation de projets auprès de divers décideurs.

III - Cadre de l'Étude

III.1 - Contexte géologique et hydrogéologique

La commune d'Orléans, et plus largement le département du Loiret, se situe dans le sud du Bassin parisien (*Illustration 1*). Le Bassin de Paris occupe la majorité du nord de la France, soit environ un tiers du territoire métropolitain. Il est délimité à l'ouest par le Massif armoricain, au sud par le Massif Central, à l'est par les Vosges et au nord-est par les Ardennes. Le Bassin parisien, qui se matérialise comme une succession de cuvettes et de cuestas, est un bassin sédimentaire intraplaque où se sont succédées des mers épicontinentales, puis des lagunes peu connectées à l'océan. Au fil du temps, des sables et argiles, issus de l'érosion des reliefs alentours, ainsi que des calcaires d'origine biologique, se sont accumulés en couches successives pour combler ce bassin qui se subsidait lentement.

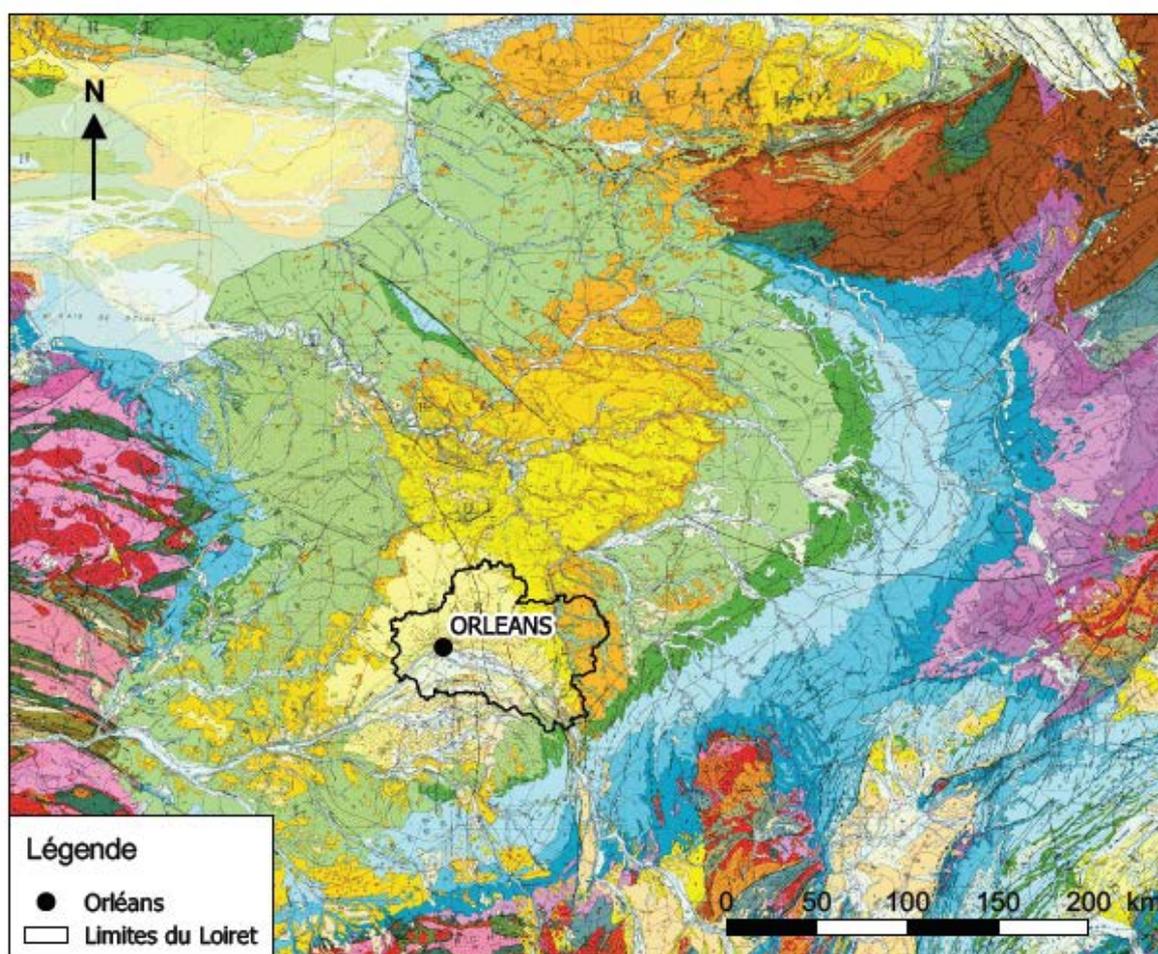


Illustration 1: Extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000 présentant le Bassin de Paris, le département du Loiret et la commune d'Orléans.

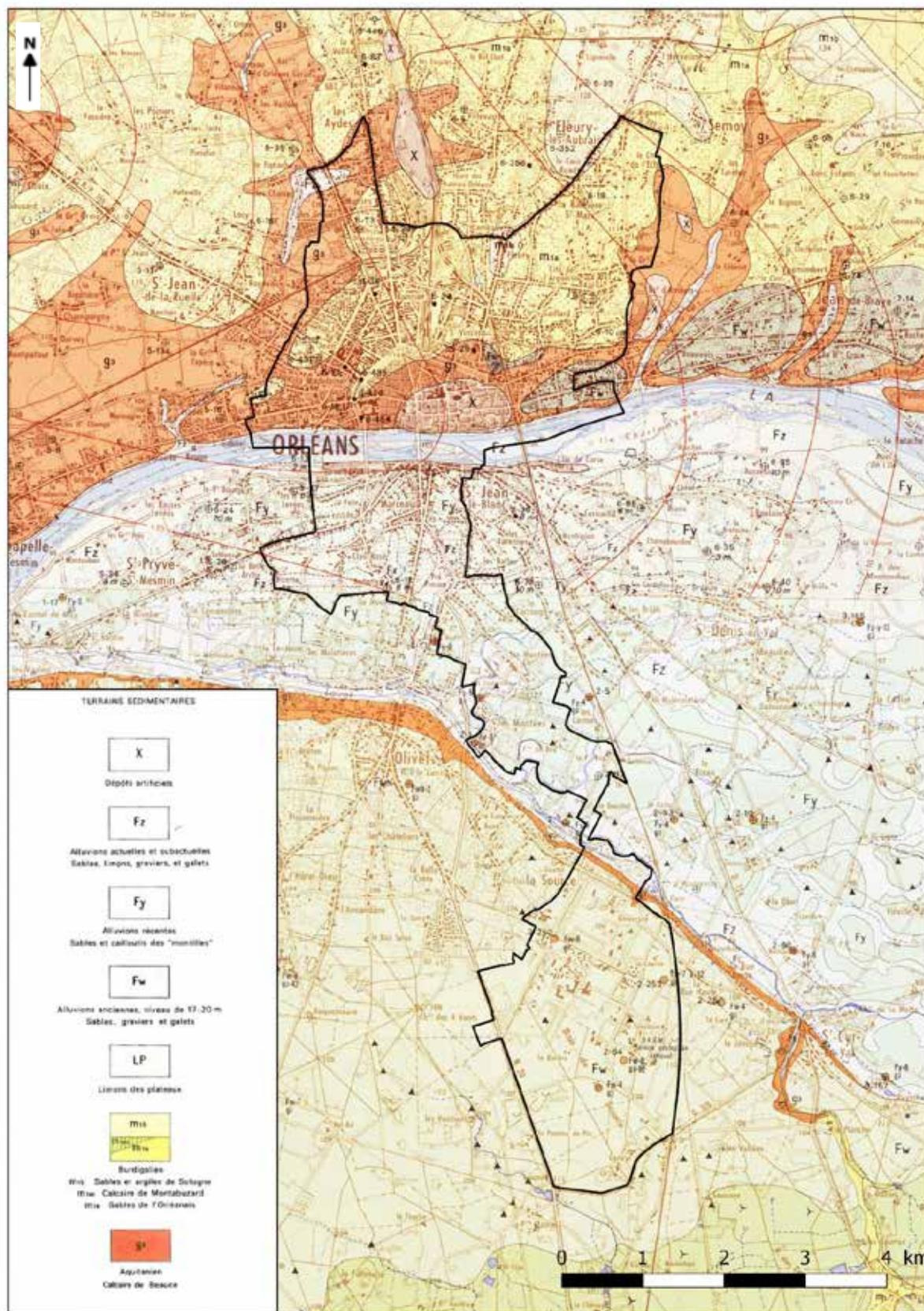
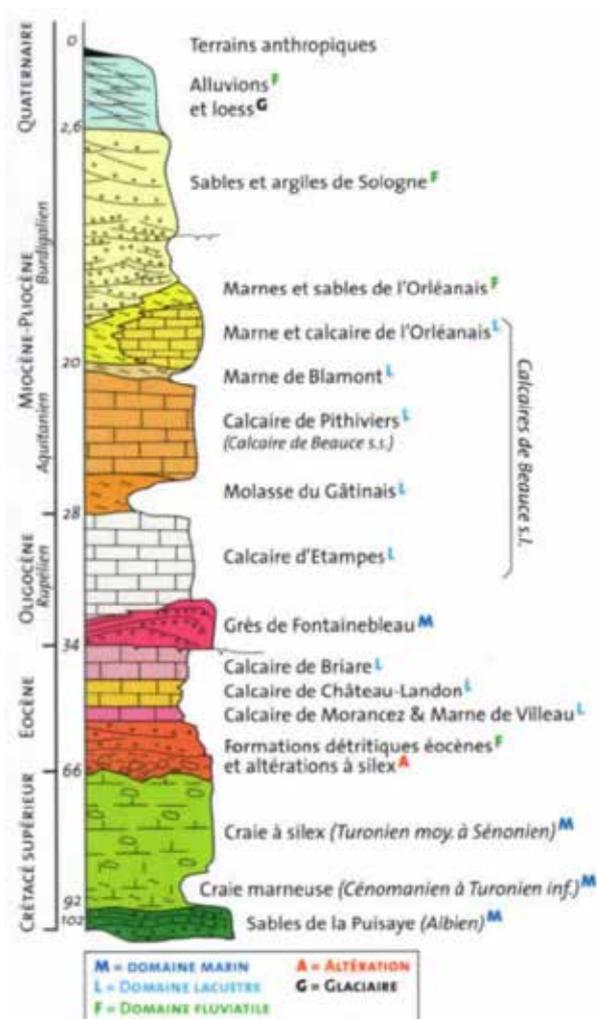


Illustration 2 : Extrait des cartes géologiques d'Orléans XXII-19 (G. Berger) et de la Ferté-Saint-Aubin XXII-20 (M. Gigout) au 1/50 000

Orléans repose tout d'abord sur des dépôts artificiels correspondant à des remblais, conséquence de l'histoire de la ville (§ III.2 -). Nous constatons, par la suite, la présence d'alluvions actuels, subactuels ou anciens, délimitant le lit mineur et majeur de la Loire, et présent dans la partie sud d'Orléans (rive gauche de la Loire). Dans la partie nord d'Orléans (rive droite de la Loire), nous observons les marnes et sables de l'Orléanais (m_{1a}) datant du Burdigalien (20,4 - 16 millions d'années), deuxième étage du Miocène, appartenant à l'ère du Cénozoïque (*Annexe 1*). Puis, nous observons les calcaires de l'Orléanais (g_a) (*Illustration 2*). Ces calcaires appartiennent, comme indiqués sur la carte géologique, à la formation des calcaires de Beauce : formation la plus répandue dans le sous-sol orléanais.

Le calcaire de Beauce est un calcaire lacustre aquitanien (23,03 - 20,44 millions d'années, premier étage du Miocène). Il est présent sur cinq départements, et est délimité par les villes de Nogent-le-Roi, Fontainebleau, Vierzon et Tours (*Ménillet, 1980 - 1981*) (*Annexe 2*). En réalité, le calcaire de Beauce est défini comme « l'ensemble des faciès lacustres à dominante calcaire qui se sont déposés, au milieu du Tertiaire, dans le sud-ouest du Bassin parisien » (*Lorain¹, 1973*).



Dans le Loiret, plus précisément, il se compose du calcaire d'Etampes, de la molasse du Gâtinais (absente à Orléans), du calcaire de Pithiviers, des marnes de Blamont et des marnes et calcaires de l'Orléanais (*Illustration 3*). Lors des investigations dans les cavités souterraines anthropiques d'Orléans, nous verrons que les marnes de Blamont sont difficiles à observer et, en aucun cas, nous avons été à même d'affirmer leur présence.

Illustration 3 : Log-lithostratigraphique de la géologie loirétaine (Charles et Graviou, 2016)

¹ Article issu du compte rendu des journées d'études des 8 et 9 juin 1972 à Blois, organisées par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées et le Laboratoire régional de Blois

Si ces calcaires sont regroupés sous le nom de formations ou calcaires de Beauce, c'est parce que leur subdivision stratigraphique est difficile. En effet, il n'existe pas de niveaux repères permettant de les séparer les uns des autres. De plus, les imbrications et les variations latérales sont rapides : un banc calcaire peut être remplacé par un ou plusieurs autres bancs, sans que la transition ne soit réellement visible (Lorain, 1973, Ménillet, 1974 et Ménillet, 1980 - 1981). Les études portant sur le calcaire de Beauce sont ainsi centrées sur une étude faciologique mettant en évidence, divers faciès (crayeux, travertineux, rubanés, vacuolaires, bréchiques etc.) difficilement différenciable à l'œil nu (Lorain, 1973, Ménillet, 1974, Guillemin, 1976 et Ménillet, 1980 - 1981). Outre ces différents faciès, des accidents siliceux sont présents dans le calcaire de Beauce, ce sont les meulières. Ces dernières peuvent se trouver sous forme de lentilles, de petits blocs ou de bancs (Lorain, 1973, Ménillet, 1974 et Guillemin, 1976).

D'un point de vue hydrogéologique, les formations lacustres de Beauce constituent l'aquifère principal de la région. Il est partagé entre les bassins versants de la Seine et de la Loire grâce à une série de points hauts entre les côtes +110, sous la forêt d'Orléans, et +150, entre la Voise et la Roguenette, en Eure-et-Loir, à l'est de Chartres (Desprez, 1973) (Illustration 4). Du fait de l'hétérogénéité des calcaires de Beauce, la nappe est libre ou captive en fonction du secteur étudié (Annexe 3). En Gâtinais ou dans la forêt d'Orléans, la nappe est captive du fait de la présence de la molasse du Gâtinais, qui la sépare en deux (Desprez et Megnien, 1972, Charles et Graviou, 2016). Ailleurs en Beauce, la nappe est libre.

Les formations de Beauce se caractérisent par une forte perméabilité ayant des conséquences aussi bien en surface, avec la présence de vallées sèches, qu'en profondeur, avec le développement d'un important réseau karstique. Ces vides naturels sont notamment visibles dans la forêt d'Orléans, avec la présence de gouffres et de dépressions (Lorain, 1973¹). Il est important de notifier la présence de la nappe phréatique des alluvions de la Loire, qui s'écoule parallèlement au fleuve et qui est tributaire des pertes d'eaux et des apports de la nappe de Beauce. Lorsque la nappe des formations de Beauce est captive, il est possible d'avoir une connexion avec la nappe de la Loire, libre, via les gouffres et les forages (Gutierrez et Binet, 2010). Les pertes d'eaux des cours superficielles et les circulations d'eaux souterraines modifient l'hydrographie de surface, comme c'est le cas avec les pertes d'eau à Jargeau, à l'est d'Orléans, qui ressurgissent à Olivet, source du Loiret (Annexe 4).

Outre les cavités karstiques, des cavités anthropiques, carrières et caves, sont présentes en grande quantité dans la commune orléanaise. Du fait de la présence d'alluvions dans le sud d'Orléans, c'est la rive droite de la Loire qui a principalement été exploitée pour extraire le calcaire de Beauce, au sens large.

III.2 - Contexte historique

Le territoire orléanais a connu ses premières occupations humaines au Paléolithique mais c'est au III^{ème} siècle avant notre ère que la ville d'Orléans, appelé alors *Cenabum*, prend réellement forme (*Joyeux dir., 2014*). La ville verra se succéder quatre enceintes au cours des siècles (*Illustration 5*), ainsi que de nombreuses destructions et reconstructions. Entre les guerres, les invasions et les conflits, Orléans a connu de nombreux bouleversements, modifiant sa structure, son paysage et son sous-sol.

En l'état actuel des recherches entreprises par les archéologues, les premiers bouleversements urbains remontent au I^{er} siècle avant notre ère, où le quartier de l'actuel îlot de la Charpenterie a été incendié puis remblayé. Du I^{er} au III^{ème} siècle avant notre ère, le cadastre est modifié avec la construction de nouveaux quartiers et d'habitations plus grands, entraînant le remblaiement d'axes préexistants et le creusement de nouveaux axes. Au cours du IV^{ème} siècle, *Cenabum* construit sa première enceinte. D'une superficie de 25 hectares, elle entraîne la destruction des édifices se trouvant sur son tracé, le creusement d'un fossé le long des fortifications et un probable réaménagement urbain à l'intérieur de l'enceinte. La reconstruction de la cathédrale à cette époque, suite à un incendie, entraîne également une modification du sol de la ville, tout comme l'invasion de la ville par Attila au V^{ème} siècle (*Joyeux dir., 2014*).

Durant le Haut Moyen Âge (VI^{ème} – X^{ème} siècles), les normands attaquent la ville, entraînant des destructions et des incendies, modifiant encore une fois le sol orléanais. Pendant le Moyen Âge et le bas Moyen Âge (XI^{ème} – XV^{ème} siècles), la ville s'agrandit en dehors de l'enceinte : « cet espace exigü [la ville close] n'était plus que le noyau d'une agglomération plus vaste qui s'étalait le long du coteau bordant la Loire [...] soit 2,5 km [de large]. Vers le nord des faubourgs s'étendaient [...] sur 600 ou 700 mètres » (*Michaud-Fréjaville, 1980*). De plus, un incendie détruit la ville et une partie des faubourgs (*Joyeux dir., 2014*). A la fin du XIV^{ème} siècle, la forteresse est en mauvais état et des travaux de confortations furent programmés (*Michaud-Fréjaville, 1980*).

L'enceinte est, par la suite, agrandie à l'ouest (deuxième enceinte) (*Annexe 5*) puis à l'est, à la fin du XV^{ème} siècle (troisième enceinte) (*Joyeux dir., 2014 et Alix, 2008*). Cette époque voit également l'invasion de la ville par les anglais, puis sa délivrance par Jeanne d'Arc, en 1429.

Avec la présence de la Loire, le commerce se développe durant la période moderne (XVI^{ème} – XVIII^{ème} siècles) conséquence de l'extension de la ville et de l'agrandissement de l'enceinte, fin XV^{ème} siècle début XVI^{ème} (quatrième enceinte) (*Joyeux dir., 2014 et Alix, 2008*) (*Annexe 5*).

Puis, les guerres cessent, les fortifications sont délaissées et démantelées au début du XIX^{ème} siècle. La population et la ville ne cessent de s'agrandir. Les bombardements de 1940 et de 1944 entraînent la destruction d'une partie du centre ancien, qui sera progressivement reconstruit (*Vannier et Templier, 1999*). C'est ce contexte particulier qui explique la présence de dépôts artificiels, ou remblais, dans le centre-ville d'Orléans.

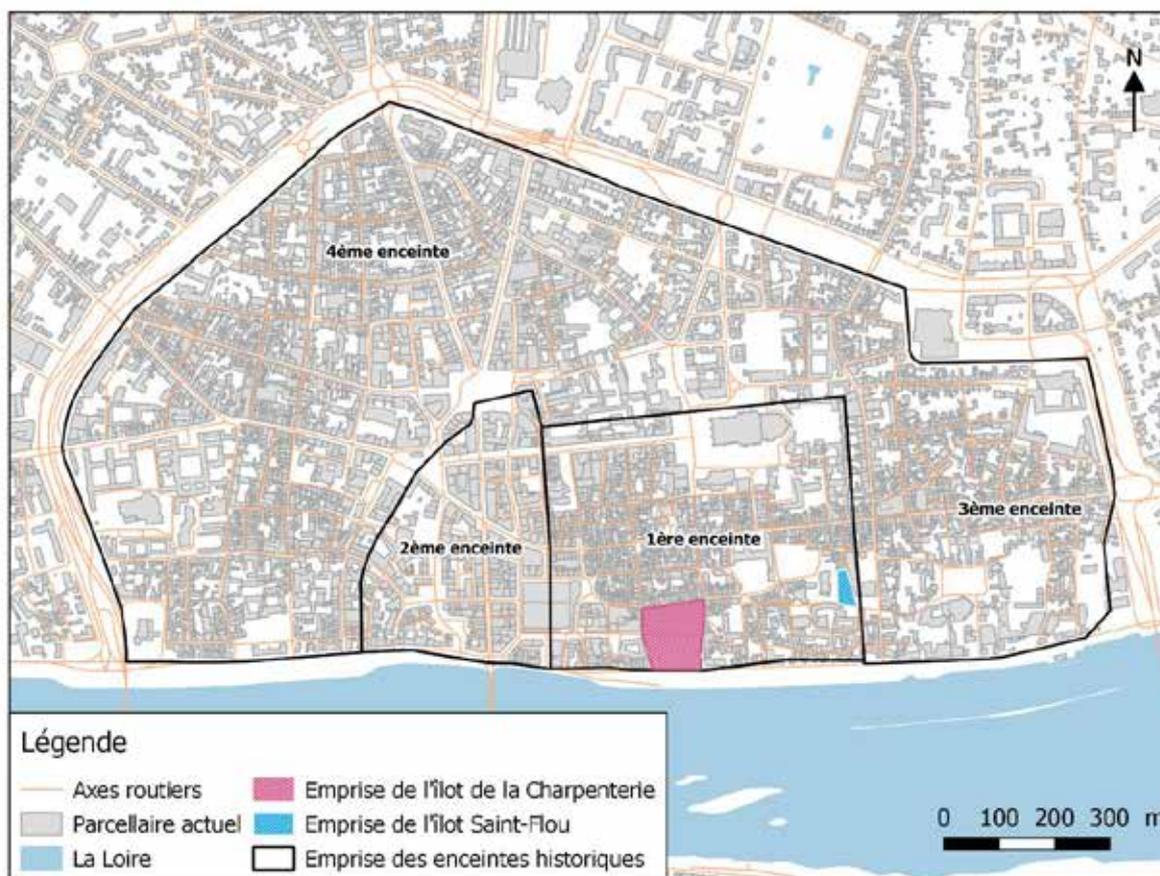


Illustration 5 : Emprise des quatre enceintes historiques d'Orléans (d'après Alix 2008, modifiée)

La présence de « cavités » à Orléans remonterait à la ville gauloise, où des ateliers semi-excavés peuvent être assimilés aux prémices de constructions souterraines.

Nous savons que les habitations, du XII^{ème} au début du XV^{ème} siècle, sont construites à l'aide du calcaire de Beauce, utilisé sous forme de petits ou moyens appareils. Un petit appareil est constitué de moellons, et parfois de briques, disposés en assises sur une épaisse couche de mortier. Le moyen appareil, lui, se constitue de blocs de pierre disposés horizontalement, en assises régulières. Certaines de ces habitations possèdent une ou plusieurs « salles basses excavées », aujourd'hui appelées communément des caves, qui sont contemporaines aux maisons. Ces caves peuvent être établies par-dessus d'autres niveaux, qui correspondaient bien souvent à une ancienne carrière (*Alix, 2008*). Au Moyen Âge et bas Moyen Âge, la reconstruction de la ville, et de la nouvelle enceinte, est probablement la cause d'exploitation de carrières de calcaire, situées en bordure de la Loire (*Joyeux dir., 2014*).

Des fouilles archéologiques ont pu mettre en évidence la présence d'anciennes carrières d'extraction de calcaire, aujourd'hui détruites, réutilisées ou abandonnées, dans les quartiers de la Charpenterie et de Saint-Flou (*Illustration 5*), et individuellement, chez des particuliers. Ces recherches ont permis d'affirmer la présence de ces carrières entre la fin du X^{ème} et le début du XV^{ème} siècle. Du fait de la petite taille de ces dernières, il semblerait que l'activité d'extraction du calcaire soit artisanale, avec des matériaux utilisés pour aider à la construction d'habitations. Sur le site de Saint-Flou, plusieurs excavations peuvent être interprétées comme de possibles carrières à ciel ouvert. Les carrières souterraines, elles, ont été exploitées grâce à des puits (*Josset et al., 2014*) et, parfois, à des descenderies (escaliers).

III.3 - Gestion historique des cavités orléanaise et présentation du projet

SICAVOR

La gestion historique des cavités orléanaise va dépendre du contexte local :

- Les cavités ont été oubliées : à la fin de l'exploitation, les puits d'extractions (et parfois les escaliers, lorsqu'ils étaient présents) étaient rebouchés. Il n'y avait donc plus d'accès à ces carrières. De plus, au fil du temps les plans cadastraux de la ville ont été modifiés entraînant la construction d'habitation par-dessus une carrière. La destruction de bon nombre d'archives, lors de la Seconde Guerre Mondiale, a conduit à ignorer l'emplacement de certaines cavités anthropiques.
- Les cavités ont été réutilisées (conservation de vinaigre, de vin, culture de champignons ou de salades de cave) : un premier niveau a été construit servant de cave et permettant de rejoindre, via un escalier, le rez-de-chaussée de l'habitation à la carrière. Il est à noter que les caves sont datées de tout âge, certaines étant contemporaines des élévations de l'habitation (*Alix, 2008*).
- Les cavités ont pu être notifiées par la défense passive : lors de la Seconde Guerre Mondiale, des carrières ont été utilisées pour s'abriter des dangers. Une liste de la défense passive a d'ailleurs été faite, répertoriant 240 cavités souterraines qui pourraient servir d'abris en cas de bombardement (*Vannier et Templier, 1999*).

Ainsi, seules étaient officiellement connues les carrières encore utilisées pour le stockage ou la culture et celles pouvant servir dans le cadre de la défense passive.

Du point de vue de la gestion du risque lié à ces cavités, il est important de notifier la présence de soutènement dans les carrières dès le Moyen Âge, avec une importante campagne de confortement datée, actuellement, entre le XIII^{ème} et le XV^{ème} siècle (*Alix, 2008*).

En outre, la gestion contemporaine des cavités souterraines orléanaises remonte à la fin des années 1990. C'est le service Environnement de l'époque qui a commencé à gérer les risques liés aux cavités, à la suite de problèmes d'affaissement du sol. Par la suite, la ville d'Orléans a mis en place une politique de gestion du risque d'effondrement des carrières. Cette volonté a également été motivée par la mise en application de la loi du 13 juillet 1982, modifiée le 22 juillet 1987 (Décret d'application 90.918 du 11 octobre 1990) (*Annexe 6*), relative à l'organisation de la sécurité civile, la protection de la forêt contre l'incendie et la prévention des risques majeurs, qui spécifie le devoir d'information du maire, envers les citoyens quant aux risques naturels prévisibles. Suite à ce décret, deux inspecteurs de l'Hygiène étaient missionnés pour gérer les risques naturels (le premier sur les inondations, le second sur le risque mouvement de terrains), en plus de leurs missions d'inspecteur de salubrité. Devant le manque de connaissance, il a été nécessaire de visiter et de topographier ces cavités. Leur travail a donc consisté, en plus des visites quartiers par quartiers, à s'appuyer sur les rapports officiels existants, sur les recherches documentaires auprès des groupes de spéléologues ou de la SFES² et sur les inventaires de la défense passive pour retrouver des indices des cavités oubliées.

Puis, en 2010, devant la volonté de la mairie de gérer le risque inondation, un service Risques Urbains a été créé (spécialement dédié à la gestion des risques) au sein d'une autre direction : la DIMER³. Enfin, en 2015, la Direction de l'Environnement et de la Prévention des Risques a été créée, afin de mieux répondre à la problématique des risques urbains. Une convention a d'ailleurs été passée entre la mairie et le CDS 45⁴, en 2016, afin de relever les carrières souterraines de la région orléanaise.

Malgré la publication de livres et d'articles sur le sujet (*Annexe 7*), il faut admettre que les cavités orléanaises restent peu connues du grand public. Le programme SICAVOR, devrait permettre d'apporter un grand nombre de réponses scientifiques aux questions qui subsistent encore, et de faire connaître ce patrimoine, trop méconnu à ce jour.

Le projet SICAVOR, « Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans », est un programme de recherche d'intérêt régional, en partie financé par la région Centre-Val de Loire pour une durée de trois ans (2015 – 2017). Le projet est coordonné par le Professeur Alain Salamagne, de l'université François Rabelais de Tours, et inclus activement plusieurs partenaires :

- le Centre d'Études Supérieures de la Renaissance (CESR) de l'Université F. Rabelais de Tours (unité mixte de recherche UMR 7323) ;
- le Laboratoire Archéologie et Territoire (LAT) de l'Université F. Rabelais de Tours (unité mixte de recherche UMR 7324 CITERES⁵) ;

² Société Française d'Étude des Souterrains

³ Direction Maitres de l'Énergie et des Risques

⁴ Comité Départemental de Spéléologie du Loiret

⁵ Cités, Territoires, Environnement et Sociétés

- le Laboratoire PRISME⁶ de l'école Polytechnique de l'Université d'Orléans ;
- le Laboratoire GÉHCO⁷ de l'université F. Rabelais de Tours (Equipe d'Accueil EA 6293) ;
- le Bureau de Recherche Géologiques et Minières d'Orléans (BRGM) ;
- le Pôle Archéologie d'Orléans, anciennement Service Archéologique Municipal d'Orléans (SAMO) ;
- le Service Régional de l'Archéologie (SRA) de la DRAC⁸ Centre ;
- la Direction de l'Environnement et de la Prévention des Risques d'Orléans Métropole et
- le Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris (CNAM).

Ce projet de recherche a pour but d'inventorier les trames urbaines anciennes, des espaces publics aux espaces artisanaux, industriels et civils de la ville d'Orléans. La zone d'étude correspond à Orléans *intra-muros*, c'est-à-dire à la partie de la ville anciennement protégée par la dernière enceinte (édifiée fin XV^{ème} – début XVI^{ème} siècle). D'environ 140 ha, les limites de la zone d'étude sont actuellement marquées par les quais de la Loire, au sud, et les grands boulevards, à l'ouest, au nord et à l'est. Dans cette zone d'étude, un inventaire systématique des cavités anthropiques tente d'être établie pour le quartier Saint-Aignan (*Illustration 6*).

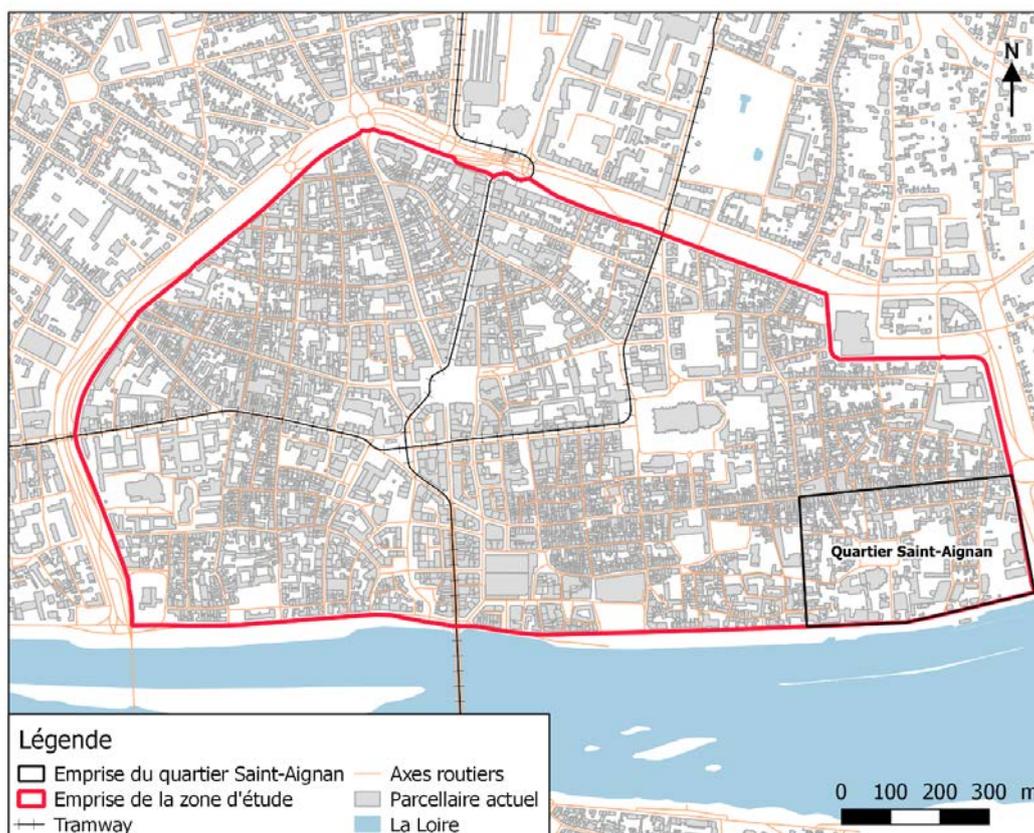


Illustration 6 : Emprise de la zone d'étude et du quartier Saint-Aignan

⁶ Laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Énergétique

⁷ Géo-hydrosystèmes Continentaux

⁸ Direction Régionale des Affaires Culturelles

Le projet s'articule autour de trois grands objectifs :

- l'élaboration d'une archéologie de l'habitat et de l'espace urbain ;
- la réalisation d'une chrono-typologie des cavités dans le cadre du quartier Saint-Aignan (morphogenèse, développement des quartiers, cartographies des zones détruites etc.) et
- la détection et le recensement des cavités présentant un risque.

Ce programme vise également à élaborer une méthodologie pluridisciplinaire, pouvant servir de référence dans le domaine de la recherche (historique, archéologique, géologique etc.) liés aux cavités anthropiques, et pouvant être réutilisée dans d'autres villes françaises ou étrangères.

Pour ce faire, l'année 2015 a permis de poser les bases du programme en réalisant un état des lieux des connaissances sur les cavités orléanaises et en approfondissant la bibliographie, connue jusqu'alors par les porteurs et les partenaires du projet, grâce notamment à l'accès aux archives de l'ensemble d'Orléans, puis du quartier Saint-Aignan. En parallèle, des cavités anthropiques ont pu être visitées, dans la zone d'étude et également dans le quartier Saint-Aignan, grâce à diverses opportunités. Les observations faites sur le terrain ont pu être enregistrées grâce à la création du SIG.⁹ du programme SICAVOR (*Alix dir., 2015*). Durant l'année 2016, les recherches dans les archives ont été poursuivies, ainsi que le traitement des données via le SIG du projet, qui a été amélioré pour permettre une plus grande visualisation des données obtenues sur le terrain. Durant cette année, les visites des caves et carrières ont été poursuivies avec un total de 278 cavités renseignées dans la zone *intra-muros*, dont 62 dans le quartier Saint-Aignan, depuis le début du projet. Une campagne de relevé au scanner 3D a été initiée courant février 2016 permettant le relevé de 25 sites dont 17 cavités dans le quartier Saint-Aignan. Ces 25 sites ont été choisis du fait de leur intérêt archéologique et historique ou/et de leur complexité. Des datations par dendrochronologie (datation de pièces de bois grâce aux cernes de croissance) et par carbone 14 (datation du carbone 14 dans la matière organique) ont été réalisées afin de préciser la chronologie de certaines cavités médiévales. Enfin, la partie valorisation du programme a également commencée en 2016, où de petits films à destination du grand public ont été réalisés (<https://vimeo.com/170667586>) (*Alix dir., 2016*).

⁹ Système d'Information Géographique

IV - Travaux réalisés

IV.1 - Etat de l'art succinct de la gestion des cavités en France

Les cavités souterraines (naturelles ou anthropiques) ne sont pas propres à la région orléanaise. Dans la législation française, les propriétaires du sol sont également les propriétaires du sous-sol. Les mines abandonnées font cependant exception à la règle car, régit par le code minier, elles sont la propriété de l'État. Dans ce contexte, bon nombre d'études ont été réalisées afin de prévenir ce risque. Elles débutent, la plupart du temps, par un inventaire des cavités souterraines présentes sur la commune ou le territoire étudié. La répartition cavités naturelles / cavités anthropiques est hétérogène selon le territoire. En Ardèche par exemple, la plupart des cavités sont naturelles (97 %). Le département de l'Oise possède *a contrario* de très nombreuses carrières souterraines (44 %), tout comme le département de la Marne (28 %) (*Vincent et al., 2005, Pannet et al., 2011 et Thuon, 2010*). Dans ce cadre, le BRGM a réalisé l'inventaire des cavités connues pour la quasi-totalité des départements¹⁰. L'ensemble de ces études a d'abord consisté à une étude documentaire et, pour la plupart, à un questionnaire envers les mairies ou les habitants pour tenter de réaliser un inventaire, le plus précis possible, des cavités présentes dans la zone étudiée. Il est important de retenir que les résultats sont non exhaustifs, des cavités pouvant ne pas avoir été détectées lors de ces études. Suite à cet inventaire, les cavités répertoriées sont analysées, quelques-unes sont visitées, pour mettre en évidence leurs typologies. Les zones les plus exposées au risque sont mises en avant, dans la perspective d'une mise en place d'une politique préventive. En cas de risque important, avec des zones de forts enjeux, un service local est créé, comme à Orléans ou à Laon (*Wathelet et al, 2002*). Dans le cas de risque faible, des experts privées (bureaux d'études) ou public (BRGM, CEREMA¹¹, INERIS¹²) sont appelés, en particulier lorsque la sécurité des personnes est remise en cause. Les mines, dues à leur contexte juridique particulier, font intervenir GEODERIS ou le département DPSM¹³ du BRGM.

IV.2 - Données de base

Les données de bases recueillies pour cette étude sont :

- les recherches bibliographiques ;
- les Systèmes d'Informations Géographiques SICAVOR et SIGOR et
- les bases de données du BRGM et d'Orléans Métropole.

¹⁰ A l'exception des départements de la région parisienne pour lesquels le risque cavité est géré par l'Inspection Générale des Carrières.

¹¹ Centre d'Études et d'expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

¹² Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

¹³ Département Prévention et Sécurité Minière

IV.2.1 - Recherche bibliographique

La recherche bibliographique s'est d'abord réalisée à l'aide des services de documentation du BRGM. Afin de comprendre le contexte géologique régional, trois ouvrages ont été d'une grande aide :

- « Le calcaire de Beauce » du Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées de Blois, datant de 1973. Composé d'articles autour des formations de Beauce, il permet de poser les bases de la géologie, de l'hydrogéologie et de la géotechnique du calcaire de Beauce.
- « Étude pétrographique et sédimentologique des calcaires d'Étampes et de Beauce » de F. Ménillet, datant de 1974. Cette thèse, bien que réalisée entre les forêts d'Orléans et de Fontainebleau, apporte une nouvelle approche sur l'étude des calcaires de Beauce. Monsieur Ménillet est le premier à tenté une étude faciologique des formations de Beauce. Cependant, sa zone d'étude n'étant pas celle d'Orléans, il est important de nuancer les informations qui en ressortent.
- « Les lithofaciès des Calcaires de Beauce (Stampien supérieur et Aquitanien) du Bassin de Paris (France) » du Bulletin du BRGM, datant de 1980-1981. Cet article, écrit par Monsieur Ménillet, résume la géologie des formations de Beauce, décrit les faciès observés et illustre ces propos avec des photographies prises sur le terrain.

D'autres ouvrages du BRGM, des rapports, ont été consultés afin de comprendre comment le risque lié aux cavités souterraines est géré ailleurs en France. Les résultats de ces rapports ont permis une meilleure approche de la thématique des cavités souterraines orléanaise. Par exemple, l'étude réalisée à Cournon, dans le département du Puy-de-Dôme, a utilisé une fiche descriptive pour chacune des cavités visitées (*Renault O. et al, 2006*), qui a servi de base pour créer celle utilisée durant les six mois de stage.

Enfin, des guides techniques et méthodologies ont été consultés. Le guide IFSTTAR¹⁴ de 2014, « le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées » a permis de mettre en évidence les typologies des désordres et les mécanismes qui leur sont associés, mais surtout, il montre les éléments nécessaires au diagnostic de stabilité. Le guide méthodologique « Plan de prévention des risques naturels – cavités souterraines abandonnées », du Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie (2014), présente une méthodologie pour aider à la réalisation d'un plan de prévention des risques (PPR). Il permet de qualifier le niveau d'aléa et de risque lié à la présence de cavités souterraines. Enfin, l'INERIS, avec son « Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique » de 2016, présente les méthodes de mises en sécurité des cavités avec leurs avantages et leurs inconvénients.

¹⁴ Institut Français des Sciences et Technologies, des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

IV.2.2 - Systèmes d'Informations Géographiques SICAVOR et SIGOR

Le Système d'Information Géographique (SIG) SICAVOR est une base de données permettant la visualisation des données issus des éléments historiques (archives, défenses passives, ouvrages) et des observations et interprétations faites lors des visites des caves et carrières d'Orléans. Concrètement la base de données se compose de plusieurs modules :

- le module ressources documentaires ;
- le module thésaurus et liste ;
- le module cadre spatial regroupant le contexte de l'étude (géologie, hydrogéologie, cadastres historique et actuel etc.) et
- le module cave regroupant les descriptions et les interprétations des observations faites sur le terrain.

Le système d'Information Géographique SIGOR est la base de données alimentée par Orléans Métropole. Elle répertorie et localise les cavités orléanaises via un code couleur. Ainsi, il est possible de distinguer les caves, les cavités topographiées par différents organismes, les cavités comblées et les cavités non visitable (accès oublié ou condamné).

IV.2.3 - Les bases de données

Différentes bases de données ont été utilisées :

- la bdcavité du BRGM, permettant de mettre en évidence le nombre, très important, de cavités souterraines présent dans Orléans *intra-muros* ;
- la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM pour tenter de réaliser des coupes géologiques du centre d'Orléans. À noter que, parmi les différents sondages et forages disponibles, peu étaient réellement exploitable (manque de données géologiques, mauvais emplacement des points) et
- la base de données des interventions réalisées par le service risque d'Orléans Métropole, suite à des désordres en surface. Ce document montre, notamment, les interventions liées à la présence de cavités souterraines dans le centre orléanais.

IV.3 - Organisation et déroulement des visites

L'évaluation des instabilités et du risque lié aux cavités souterraines passe forcément par une visite des cavités. La majeure partie des cavités souterraines anthropiques sont dans le domaine privé. Il faut donc que les propriétaires soient présents et nous donnent l'autorisation de visiter leur cave et/ou leur carrière. Durant les six mois de stage, diverses occasions ont été trouvées pour accéder à quelques cavités souterraines d'Orléans *intra-muros*.

Une campagne de terrain a été organisée du lundi 3 avril 2017 au mercredi 12 avril 2017, regroupant des visites de cavités (une cave et quatre caves-carrières), des relevés de cavités au FARO® et au ZEBREVO, ainsi que des sondages géotechniques au PANDA®. Par la suite, deux autres visites de caves ont été organisées par les archéologues du service archéologique d'Orléans. Enfin, des visites de cavités ont été organisées par Mr Imed Ksibi, de la Direction de l'Environnement et de la Prévention des Risques d'Orléans Métropole. Ces visites ont d'abord pour but de cartographier les cavités souterraines, grâce à l'intervention des spéléologues amateurs du CDS 45. Du fait de la présence requise des propriétaires et des spéléologues, les visites se sont, pour la plupart, déroulées dans la soirée, à partir de 18h30.

Pour les mener à bien, une fiche descriptive a été créée, permettant de synthétiser toutes les observations faites sur le terrain (*Illustration 7*). Pour la majeure partie des cavités étudiées, une fiche descriptive était réalisée pour un lieu, regroupant ainsi le ou les niveaux de cave et le niveau de carrière. Cependant, en cas d'instabilités importantes dans les niveaux de cave, une fiche descriptive était consacrée à ce niveau de sous-sol.

Travaux réalisés

Auteur :	Date :	N° cavité : Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire :
<p style="text-align: center;"><u>Généralités</u></p> Type d'accès : Utilisation d'origine : Utilisation ancienne : Utilisation actuelle : Date de création : Niveau : Nombre d'étages : Superficie : Hauteur des vides : Epaisseur de recouvrement : Géologie : Piliers : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Nombre de piliers :		<p style="text-align: center;"><u>Diagnostic</u></p> Etat général : <input type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais Instabilités observées : Confortement : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Type de confortement : Mode d'occupation en surface : Désordres en surface :	
Commentaires :			

Illustration 7 : Fiche descriptive

Durant les six mois de stage, toutes les cavités étaient facilement accessibles, la plupart via une porte et un escalier. Exception faite d'une cavité accessible uniquement par une ouverture du mur de la carrière voisine. Les visites se sont organisées en plusieurs temps. En premier lieu, une visite de l'ensemble cave et/ou carrière était faite, afin de se rendre compte des dimensions de la cavité. Par la suite, deux cas s'opposent. Lorsque les spéléologues étaient absents, le premier niveau de cave, s'il était présent était observé de plus près, s'en suivait la carrière. Lorsque les spéléologues étaient présents, c'est la carrière qui était d'abord observée et ensuite la cave, pour éviter que tous les intervenants se retrouvent en même temps, au même endroit, rendant difficile les prises de mesures et les observations. Les observations des caves et des carrières portaient tout d'abord sur la présence ou non de signes d'instabilités possibles, comme des remontées de fontis ou la présence de karsts. Par la suite, c'est la géologie qui était observée, puis les confortements.

Toutes les observations ont été notifiées grâce à la prise de notes, à un rapide croquis de la cavité et à des photographies. Le but étant de relever les instabilités, aucune mesure n'a été prise permettant de donner une échelle aux croquis. Seules les cavités relevées au scanner 3D possèdent une échelle. De plus, afin d'obtenir des valeurs de profondeurs et par déduction, des épaisseurs de recouvrements, sans instruments de mesures, les marches des escaliers ont été comptées. Le produit du nombre de marche avec la hauteur de marche permet d'obtenir une profondeur relative de la carrière. Bien que rudimentaire, cette technique a été choisie parce qu'elle a déjà été utilisée dans le cadre du programme SICAVOR (Xavier, 2016), est utilisée par les archéologues, et est comparable aux données obtenues avec le scanner 3D ZEB-REVO (§ V.4.4). Les cavités cartographiées par les spéléologues possèdent des dimensions mais ne sont pas présentes dans ce travail.

A la fin de la visite, la fiche descriptive, présentée précédemment était remplie. Une fois de retour au BRGM (le jour-même ou le lendemain), les photographies étaient triées et un résumé listant les informations importantes était rédigé.

Au total, sur la période de mars à août 2017, 13 fiches de terrains et 12 résumés ont été rédigés pour 12 visites de cavités.

IV.4 - ZEB et FARO : deux outils pour l'évaluation du risque

Localiser et cartographier les cavités souterraines est essentiel pour évaluer leur risque. Les techniques classiques, mesures au décimètre ou au télémètre, sont souvent utilisées mais deviennent obsolètes face aux techniques modernes comme le ZEB-REVO et le FARO® Focus 3D.

Le ZEB-REVO est un scanner 3D mobile, portable à la main, développé par l'entreprise anglaise GeoSLAM (Illustrations 8 et 9), et acquis par le BRGM dans l'optique de développer les recherches autour de l'imagerie 3D, et d'effectuer des cartographies ponctuelles.

Il se compose d'une « tête », possédant des capteurs lasers et une centrale inertielle, ainsi que d'une mémoire de stockage et d'un calculateur, contenu dans un sac à dos. Les deux sont reliés via un câble. Pour l'utiliser, il faut, après allumage et initialisation de l'appareil, marcher à allure lente dans la cavité, en gardant la « tête » de l'appareil devant soi. Le relevé d'une zone est appelé une boucle. Il est nécessaire de réaliser des boucles fermées, c'est-à-dire essayer de revenir à la zone de départ du relevé pour éviter le phénomène de dérive. En effet, l'instrument s'utilise de façon continue, en progressant dans la carrière. Ainsi, au fur et mesure de l'avancée dans la cavité, la centrale inertielle de l'appareil aura tendance à dériver, c'est-à-dire qu'une galerie à l'origine rectiligne, pourra avoir un léger angle de dérivation, difficilement quantifiable à ce jour.

Pour un fonctionnement optimal de l'appareil, il est important de réaliser des boucles fermées ne dépassant pas 25 minutes, et de faire une boucle unique pour des zones particulières. Par exemple, dans le cas des cavités souterraines à Orléans, il est conseillé de réaliser une boucle pour un escalier et une autre pour la zone de la cavité qui suit, et non de faire les deux en une seule boucle. Pour faciliter le post-traitement, il peut être intéressant d'ajouter des plots aux stations de référence (stations de départ du ZEB) et le long du cheminement du relevé. Une ZEB-CAM, fournit avec l'appareil, permet de filmer le cheminement de chacune des boucles et donc d'avoir des images de la carrière, potentiellement utilisable. Le traitement de données peut se réaliser avec divers logiciels de traitement de nuages de points. Au BRGM, c'est le logiciel libre CloudCompare qui est utilisé.



Illustration 8 : Photographie du ZEB-REVO, à gauche la « tête » reliée à la mémoire de stockage et au calculateur via le câble, 18/07/2017.



Illustration 9 : Station de départ du ZEB-REVO, exemple pris dans la cave-carrière du 20 Place Croix-Morin, 05/07/2017.

Le FARO® Focus 3D est un scanner 3D portable, développé par l'entreprise FARO® (*Illustration 10*). Pour l'utiliser, il faut le positionner sur trépied, choisir la résolution qui convient le mieux au type de relevé attendu et la génération ou non d'un nuage de points en couleur. Pour obtenir un nuage de points colorisé, des photographies seront prises par le scanner, à la fin du scan de la zone. Pour aider au post-traitement, des sphères blanches sont disposées à divers endroits stratégiques de la zone scannée. Une fois le scan lancé, le manipulateur doit se tenir à distance, pour éviter d'être, lui-même, scanné. Une fois le temps de relevé terminé, le FARO® Focus 3D et le trépied doivent être déplacés pour pouvoir relever la prochaine zone de la cavité. Il est primordial de laisser au minimum deux sphères blanches en communs afin de relier les scans entre eux. Le traitement de données se réalise ensuite grâce au logiciel SCENE, développé par l'entreprise FARO®.



Illustration 10 : Station de relevé du FARO® Focus 3D, exemple dans une cave rue Sainte-Euverte (Crédits : Pôle d'archéologie, 2016)

Dans le cadre du projet SICAVOR, le FARO®, utilisé par les archéologues, a servi à scanner des caves et carrières orléanaises qui présentaient un intérêt (archéologique ou historique) et/ou une complexité (plusieurs niveaux par exemple). Le ZEB, lui, a été utilisé à quatre reprises durant ces six mois de stage. Les cavités scannées au ZEB étaient des carrières présentant des instabilités ou ayant servi pour une étude. En effet, une comparaison entre les scanners FARO® et ZEB a été réalisée dans une carrière du centre d'Orléans, afin de mettre en évidence les avantages et inconvénients des deux produits, dans le cadre de l'évaluation du risque lié aux cavités (§V.5).

V - Résultats et analyse

V.1 - Synthèse géologique

V.1.1 - Géologie observée

Au cours des différentes visites des cavités, la géologie a rarement été visible du fait de la présence de maçonnerie. Dans les caves, la maçonnerie présente à 100 % n'a jamais permis d'observer la géologie locale. Dans les carrières, la maçonnerie pouvait être présente à 100 % mais, le plus souvent, elle l'était à 70 – 80 % (selon la carrière). Seules deux cavités, non maçonnées, ont permis une observation de la géologie orléanaise.

La géologie, lorsqu'elle était observable, se composait majoritairement de calcaire blanc à crème, avec une texture tendre à pâteuse. Le calcaire observé possède des blocs pluricentimétriques à pluridécimétriques de calcaire dur. L'ensemble est toujours entrecoupé de bancs de meulière d'épaisseur souvent centimétrique, mais rarement décimétrique, ne dépassant pas un volume de 10 %. (*Illustration 11*). Il est également possible d'observer des lentilles et des poches d'argiles. Souvent d'épaisseur centimétrique, elles ne dépassent probablement pas un volume de 5 %. Exception faite dans une carrière du centre d'Orléans, où une poche d'argile, issu d'une altération prononcée du calcaire atteinte une épaisseur pluridécimétrique (*Illustration 12*). Enfin, des figures karstiques sont observées dans un calcaire un peu plus massif (*Illustration 13*). Ces figures consistent en des dissolutions des poches d'alluvions sableuses soutirées de la surface jusque dans la masse calcaire.



Illustration 11 : Petits bancs de meulière, exemple de la carrière du 20 Place Croix-Morin, 05/07/2017



Illustration 12 : Poche d'argiles présente dans la cave-carrière du 20 Place Croix-Morin, 05/07/2017.



Illustration 13: poche d'argile sableuse probablement due à un réseau karstique, exemple de la carrière du 11 rue du Tabour, 06/04/2017.

V.1.2 - Synthèse géologique

Une bonne connaissance de la géologie de la zone d'étude permet de réaliser une meilleure étude de stabilité des cavités anthropiques. La géologie des formations de Beauce étant très complexe, il a paru intéressant de tenter de réaliser des coupes géologiques de la zone d'étude. La Banque du Sous-Sol (BSS) permet d'obtenir les résultats de sondages et de forages du sol, et ainsi, permet de connaître la géologie du sous-sol en un point donné. Cependant, malgré un nombre correct de points, il a été difficile de réaliser des coupes géologiques. En effet, un nombre non négligeable de ces points n'ont pas pu être utilisés pour les raisons suivantes :

- aucune donnée géologique ;
- données géologiques ne paraissant pas fiables ou utilisant des termes pouvant prêter à confusion dans l'élaboration des coupes et
- erreurs de la BSS (mauvaise localisation et doublons de points).

Cependant, il a été possible de réaliser trois coupes géologiques, grâce à 14 points de la BSS (*Illustrations 14, 15 et 16*).

Les trois coupes géologiques mettent en évidence des altitudes comprises entre 90 et 107 m NGF, avec les plus petites altitudes retrouvées au plus proche de la Loire.

Résultats et analyse

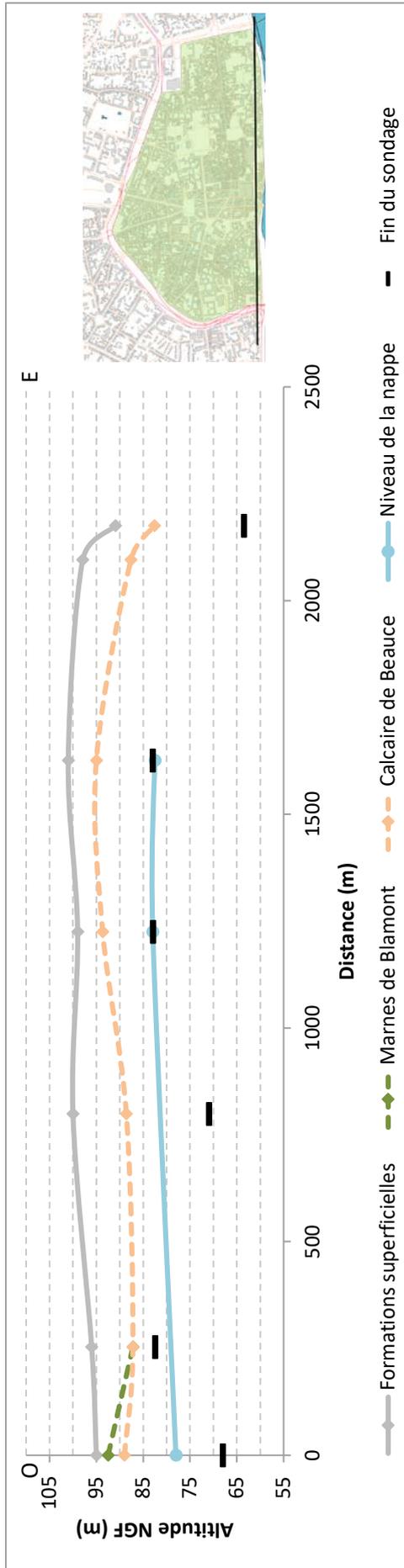


Illustration 14 : Coupe géologique numéro 1

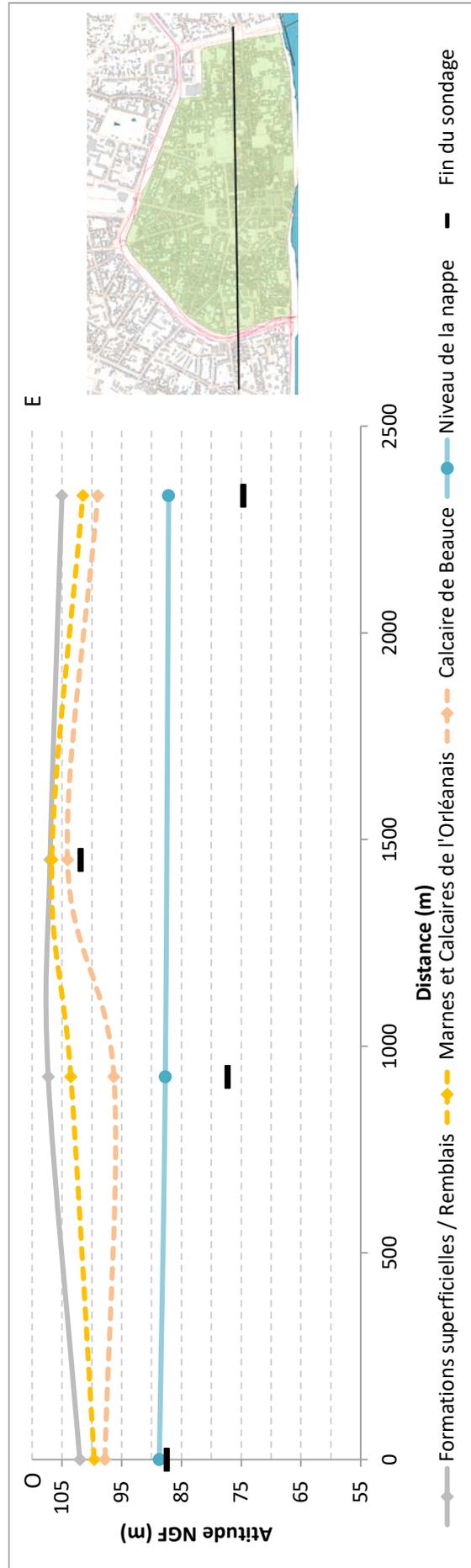


Illustration 15 : Coupe géologique numéro 2

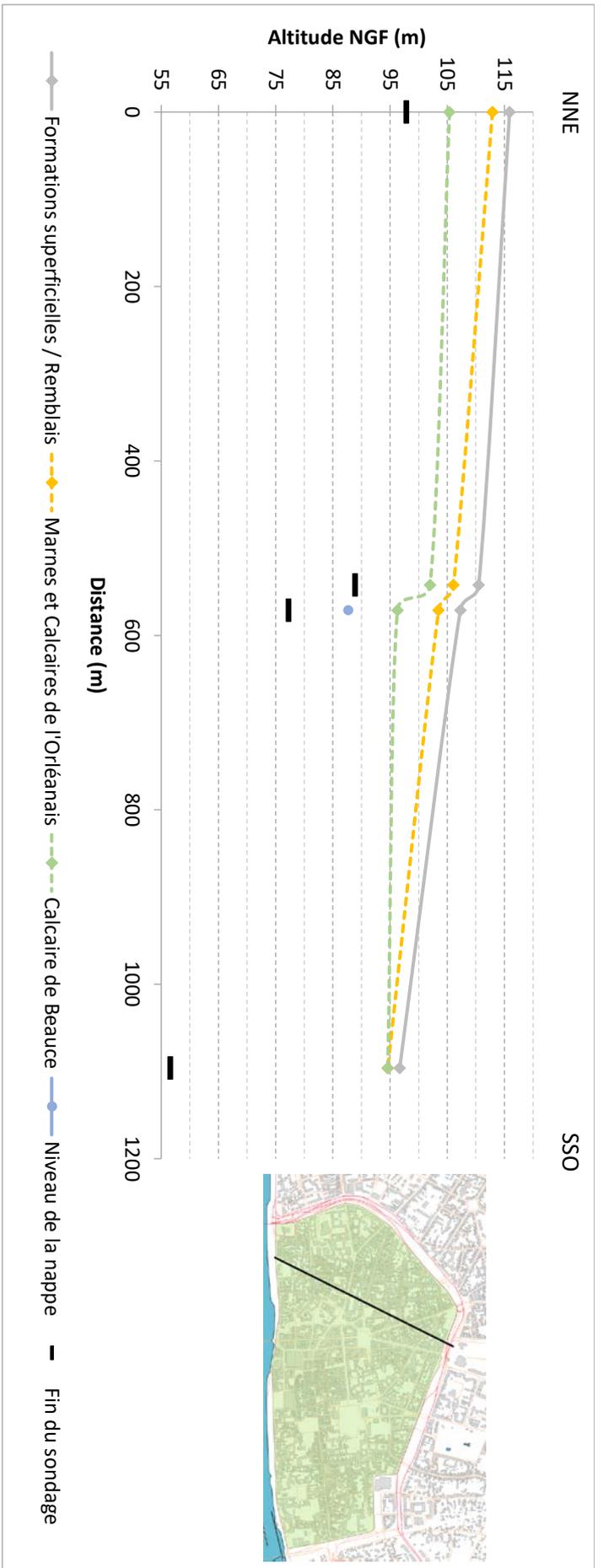


Illustration 16 : Coupe géologique numéro 3

Le sous-sol du centre orléanais est composé :

- de formations superficielles (les remblais historiques) d'épaisseurs très variables : de 1 m à 12 m. Cette variabilité d'un point BSS à un autre est due à l'histoire de la ville, qui, localement, a subi plus ou moins de changement ;
- des marnes et calcaires de l'Orléanais d'une épaisseur maximale de 7 m. À noter l'absence de ce substrat géologique dans la troisième coupe géologique, proche du bord de Loire et
- des formations de Beauce. Le toit du calcaire de Beauce se situe entre 2 m et 12 m de profondeur, avec une moyenne de 7,5 m de profondeur.

Le niveau de la nappe est compris entre 78 et 88 m NGF, soit entre 13 et 20 m de profondeur. À noter la présence, très localisée, des marnes de Blamont, dans la première coupe géologique. Cette quasi-absence tend à confirmer que les marnes de Blamont ne se trouvent qu'à des endroits très localisés du sous-sol orléanais. De plus ces résultats reflètent les observations de terrains, puisqu'en aucun cas, il a été possible d'affirmer la présence de ce substrat géologique.

Ces niveaux sont cependant à nuancer car, du fait du manque de points BSS, la moitié des points utilisés sont des points rapportés, c'est-à-dire qu'ils n'appartenaient pas au profil géologique choisi mais à son voisinage.

V.2 - Typologie des cavités

Comme dit précédemment, sur une durée de six mois, 12 cavités anthropiques ont pu être visitées et étudiées (*Tableau 1 et Illustration 17*). Durant ces visites, une fiche descriptive, un résumé, un croquis et des photographies ont été prises, afin de garder une trace des études réalisées et de pouvoir facilement reconnaître la cavité, les instabilités et les confortements qui lui sont liés (*Annexes 8 à 20*).

Tableau 1 : Adresses et dates des visites des cavités de Mars à Août 2017

Numéro	Date de visite	Adresse	Typologie de la cavité
1	3 avril 2017	55 rue de la Bretonnerie	Cave-carrière
2	5 avril 2017	4 rue Coligny	Cave-carrière
3	6 avril 2017	11 rue du Tabour	Cave-carrière
4	7 avril 2017	21 rue Saint-Etienne	Cave-carrière
5	12 avril 2017	9 cloître Saint-Aignan	Cave
6	24 avril 2017	4ter rue des 4 fils Aymon	Cave
7	25 avril 2017	26 rue des Ormes Saint-Victor	Cave
8	16 mai 2017	11 rue des Aydes	Carrière
9	5 juillet 2017	20 Place Croix-Morin	Cave-carrière
10	5 juillet 2017	2 rue des Trois Maries	Cave
11	5 juillet 2017	4b rue de Limare	Cave-carrière
12	5 juillet 2017	4 rue de Limare	Cave-carrière

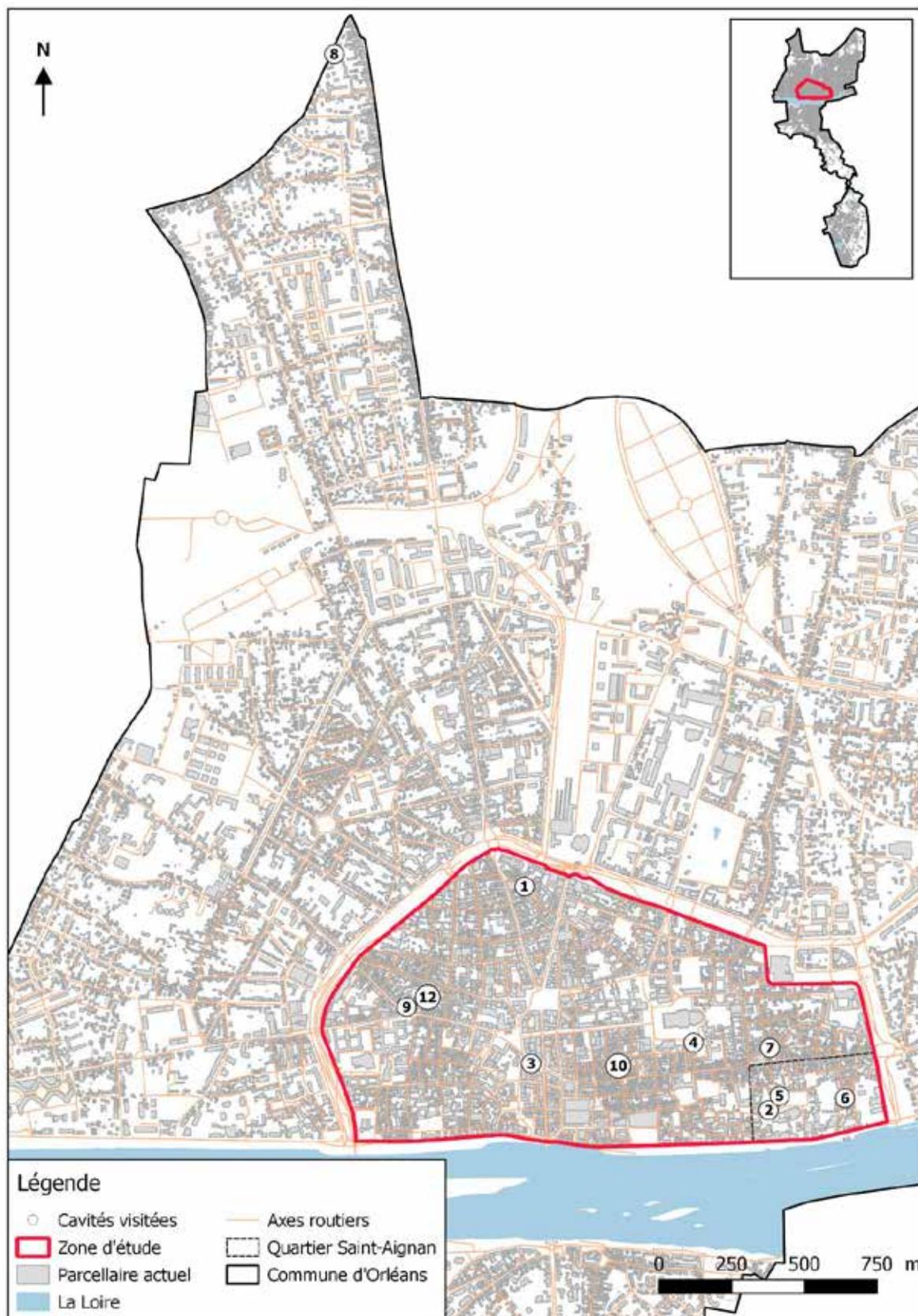


Illustration 17 : Carte d'Orléans localisant les visites des cavités de Mars à Août 2017

Parmi les 12 cavités anthropiques étudiées, nous distinguons les caves, les caves-carrières et les carrières.

V.2.1 - Les caves

Durant les six mois de stage, quatre caves ont été étudiées, soit 33 % des cavités anthropiques visitées. Situées en premier niveau de sous-sol, elles peuvent se composer d'un ou plusieurs étages. Ici, une seule cave ne possède qu'un seul étage : celle située 4^{ter} rue des 4 fils Aymon (cavité numéro 6). Les autres caves (numéro 5, 7 et 10) possèdent deux étages. Les deux étages sont superposés, excepté pour la cave 7 (26 rue des Ormes Saint-Victor), où ils sont accolés et joints via un escalier (*Annexe 14*). Cependant, le second étage est plus profond que le premier (*Illustration 18*). L'organisation de cette cave s'explique par le fait que les deux étages étaient, très probablement, deux caves différentes, appartenant à deux parcelles différentes. Au fur et à mesure de l'évolution de la ville, les deux parcelles ont été regroupées en une seule et les deux caves ont été jointes par l'escalier. Toutes les caves possèdent un ou plusieurs soupiraux, permettant une constante aération (*Illustration 19*).

100 % des caves étudiées sont entièrement maçonnées. Les parois sont consolidées grâce à des moellons de calcaire liés par du mortier (*Illustration 20*). Les plafonds ont été maçonnés avec l'aide de planches de bois qui permettaient de soutenir les maçonneries pendant le temps de séchage. Par la suite ces planches étaient retirées et il est encore possible aujourd'hui d'observer leur empreinte (*Illustration 21*).



Illustration 18 : Différence de niveau entre les étages 1 et 2 de la cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor (n°7), 25/04/2017.



Illustration 19 : Exemple de soupirail, en fond de cave, au 9 Cloître Saint-Aignan (n°5), 12/04/2017.



Illustration 20 : Maçonnerie du mur à l'aide de moellons liés par un mortier, cave du 9 cloître Saint-Aignan (n°5), 12/04/2017.



Illustration 21 : Empreintes laissées par les planches de bois, cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor (n°7), 25/04/2017.

La cave située au 2 rue des Trois Maries (n°10) a un premier étage de cave plus haut que les autres caves étudiées (plus de 4 m de hauteur). La présence d'arc brisés sous-entend que cette cave est très ancienne et il est probable que son utilisation originelle ne soit pas comme lieu de stockage (*Illustration 22*).



Illustration 22 : Cave du 2 rue des 3 Maries, 05/07/2017.

V.2.2 - Les caves-carrières

Une cave-carrière se définit comme étant une cavité anthropique composée d'au moins deux niveaux de sous-sol : le premier étant un niveau de cave et le second un niveau de carrière. Ainsi, sept cavités anthropiques étudiées sont des caves-carrières (58 %). Il faut garder en tête que la plus forte proportion de caves-carrières visitées, par rapport aux caves, ne reflète en rien la réalité des cavités orléanaises *intra-muros*. L'étude des six derniers mois s'est concentrée sur les carrières du fait de la convention passée entre les spéléologues et la mairie d'Orléans, et des opportunités qui se sont présentées. Comme le montre la bdcavité, les cavités orléanaises sont en grande partie des caves, même si la quantité de carrières est loin d'être négligeable, pour une si petite zone d'étude (environ 140 ha) (*Illustration 23*).

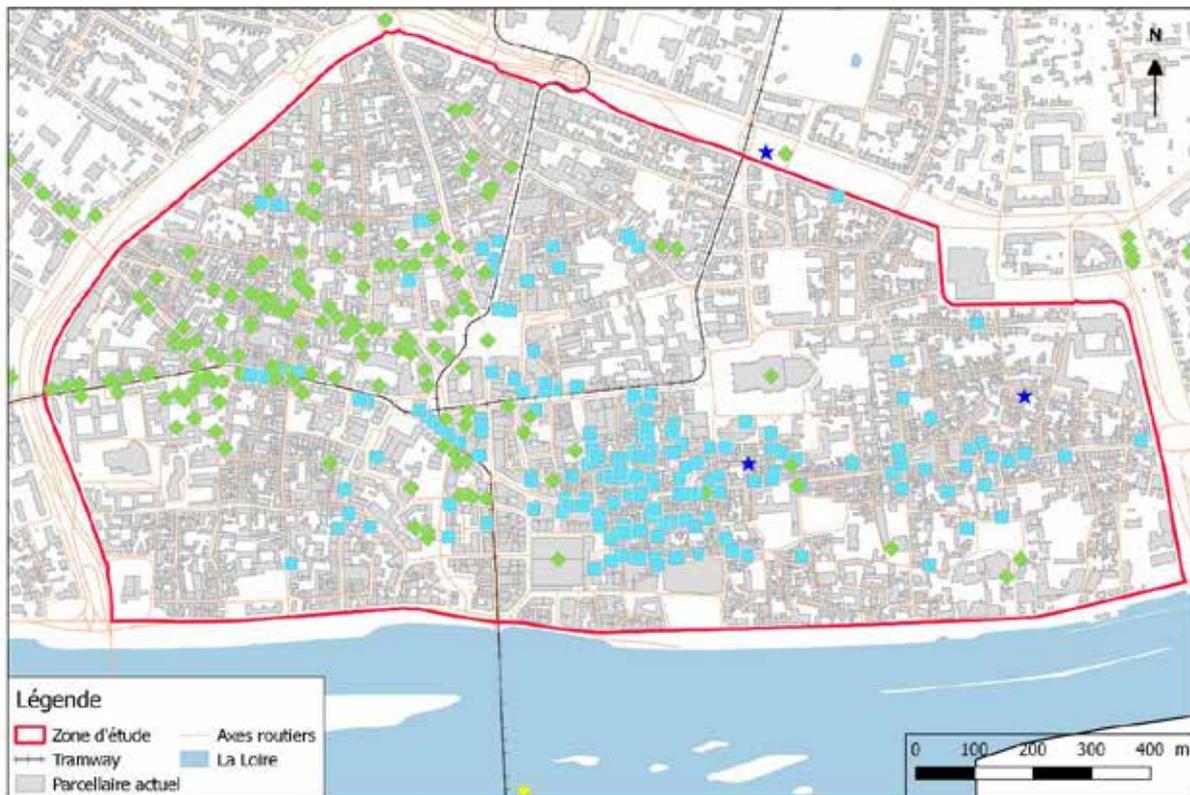


Illustration 23: Localisation des caves (figurés bleu clair), des carrières (figurés verts) et des ouvrages civils (figurés bleu foncé) dans la zone d'étude du projet SICAVOR (d'après la bdcavité du BRGM, modifiée).

Les caves-carrières étudiées comportent toutes la même base typologique : au moins un niveau de cave et un niveau de carrière. Cependant, la plupart des cavités possède une particularité dans leur configuration comme :

- la cavité du 4 rue Coligny (Crypte Saint-Serge et Bacchus, n°2) qui possède une cave semi-excavée (*Illustration 24*) et
- Les cavités du 4b et du 4 rue de Limare (n°11 et 12) qui se compose bien d'un niveau de cave et d'un niveau de sous-sol, cependant, le niveau de cave n'est pas directement accessible via l'escalier mais par une planche (*Illustration 25*).



Illustration 24 : Cave semi-excavée de la cave-carrière du 4 Rue Coligny (n°2), 05/04/2017.

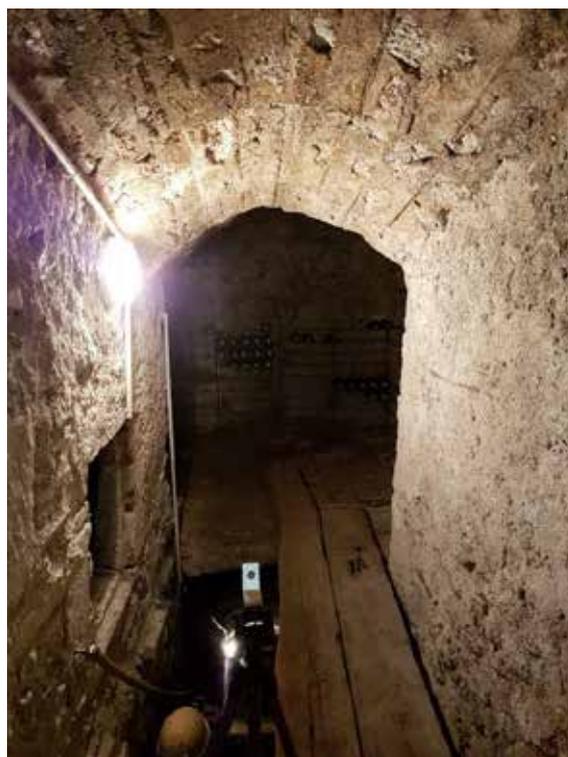


Illustration 25 : Accès à la cave du 4b rue de Limare (n°11), 05/07/2017.

Le niveau de carrière des caves-carrières a été exploité de deux manières différentes : en chambres ou en galerie. 57 % des niveaux de carrières étudiés, ont été exploités en galeries contre 42 % en chambres. Parmi les exploitations en chambres, seules celles situées au 21 rue Saint-Étienne (n°4) et au 4b rue Limare (n°11) possèdent un pilier (*Annexes 11 et 18*). Toutes les caves-carrières ne possèdent pas de puits. En effet, les carrières du 4 rue Coligny (n°2) et du 4 rue de Limare (n°12) n'en possèdent pas alors que les carrières du Centre Charles Péguy (rue du Tabour, n°3) et du 20 Place Croix-Morin (n°9) possèdent deux puits. La carrière de la Place Croix-Morin possède même un puisard, en plus des deux puits. Enfin, les autres carrières possèdent un seul puits (*Annexes 8, 11 et 18*).

De plus, les carrières des caves-carrières étudiées peuvent présenter ou non des maçonneries. Alors que la Crypte Saint-Serge et Bacchus (4 rue Coligny, n°2) est entièrement maçonnée, la carrière du 20 Place Croix Morin est maçonnée à moins de 10 % (petites maçonneries aux parois divisant probablement la carrière pour respecter les limites parcellaires). La carrière du Centre Charles Péguy (11 rue du Tabour, n°3), est maçonnée à 80 %. Le substrat géologique est uniquement observable entre les voûtes d'ogives, au ciel de la carrière. Enfin, les carrières du 55 rue de la Bretonnerie (n°1), du 21 rue Saint-Étienne (n°4), du 4b et du 4 rue de Limare (n°11 et 12) sont maçonnées à 50 % ; c'est-à-dire que seules les murs des carrières (et parfois uniquement certains murs) sont soutenus à l'aide de moellons. Cependant, quel que soit la cave-carrière, lorsqu'un puits est présent, il sera toujours maçonné.

La diversité des caves-carrières résulte très certainement de leur exploitation artisanale : l'exploitant prenait seulement ce qu'il avait besoin. De plus, l'âge des cavités, plus ou moins récentes, ainsi que le régime de propriété (privé) a permis à l'exploitant de suivre plus ou moins la législation de l'époque (si elle existait).

V.2.3 - Les carrières

Parmi la liste des cavités visitées (*Tableau 1*), seule la cavité rue des Aydes (n°8), est une carrière. Elle se situe hors du cadre d'étude du projet SICAVOR. Si elle a été étudiée, c'est d'abord en raison de l'opportunité qui s'est présentée (topographie des spéléologues), mais également afin d'avoir une comparaison entre les cavités *intra-muros* et *extra-muros*. Il faut cependant admettre, qu'une seule cavité *extra-muros* ne peut être représentative de l'ensemble des cavités présentes en dehors de la zone d'étude du programme. Une seconde cavité *extra-muros* a été relevée par les spéléologues durant les six derniers mois (*Annexe 21*). Cette carrière a été découverte de façon particulière : le propriétaire a découvert un fontis de 11 mètres de profondeur dans son jardin. Suite à cela, les spéléologues sont venus relever la cavité à l'aplomb du fontis et ont découvert une carrière emprise sur six propriétés. Ces deux carrières se situent en premier niveau de sous-sol et sont constituées d'une galerie (*Annexes 15 et 21*).

V.3 - Essais de calculs géotechniques : la carrière du 20 Place Croix Morin

Des calculs de stabilité ont tenté d'être réalisés dans les carrières où nous avons des données. C'est notamment le cas de la carrière située au 20 Place Croix Morin. Cette carrière a été relevé le 5 juillet 2017, grâce au ZEB-REVO. Voici les données utilisées, obtenues à partir de coupes transversales de la carrière (*Annexe 22*) :

- hauteur moyenne de vide : 2,16 m ;
- hauteur moyenne de recouvrement : 8,46 m ;
- hauteur moyenne de voûte : 0,66 m et
- largeur moyenne de la galerie : 3,07 m.

Des calculs de stabilité, via une méthode analytique ont tenté d'être réalisés. Selon le guide réalisé par l'IFSTTAR (2014), la méthode de l'aire tributaire ou les méthodes locaux de toit peuvent être utilisées (*Annexe 23*). L'absence de pilier dans cette carrière élimine d'office la méthode de l'aire tributaire. De plus, du fait de la présence d'une voûte et l'absence d'un banc dur caractéristique au niveau du toit, il n'est pas possible d'utiliser la méthode de la plaque et de la poutre (nécessite de donner une valeur d'épaisseur de poutre correspondant à l'épaisseur du premier banc composant le toit).

À partir des données obtenues grâce au post-traitement des nuages de points du ZEB-REVO, il est possible de déterminer, de façon semi-empirique, la hauteur des matériaux impactés par une remontée de voûte, qui entrainerait un état d'équilibre. Pour ce faire, c'est la méthode de Terzaghi qui a été utilisée. Cette méthode se base sur l'hypothèse que le chargement sur l'ouvrage résulte de la décompression d'une partie du massif encaissant. Elle s'appuie sur une classification des milieux rocheux en neuf catégories en fonction d'observations de la géologie (*Annexe 24*). La formule est la suivante :

$$h_v = K(D' + H_t)$$

Avec h_v la hauteur de voûte, K le coefficient variable dépendant de la nature du terrain, D' la largeur de la galerie et H_t la hauteur du vide

Dans le cas de la carrière du 20 Place Croix-Morin, nous obtenons :

$$h_v = 0,25 \text{ à } 0,35 (D + H_t), \text{ soit } h_v = 0,25 \text{ à } 0,35 (3,07 + 2,16) = 1,30 \text{ à } 1,83 \text{ m}$$

Ainsi, la hauteur de voûte qui permettrait une stabilité du toit serait comprise entre 1,30 m et 1,83 m. Sachant que nous avons une hauteur de voûte actuelle d'environ 0,66 m dans la carrière du 20 Place Croix Morin, la méthode de Terzaghi affirme que la voûte actuelle est instable. Il est vrai que sur le terrain, des instabilités ont été remarquées (cloches de fontis) mais il est primordial de garder en tête que cette méthode est semi-empirique et donc très largement insuffisante pour donner un avis sur la stabilité de la carrière. Il aurait été intéressant de tenter de modéliser la carrière souterraine en prenant en compte la géométrie des vides et les caractéristiques mécaniques de matériaux. Cependant, par manque de données et de temps, il n'a pas été possible de pousser la réflexion.

V.4 - Evaluation du risque mouvement de terrain des cavités

V.4.1 - Définition du risque mouvement de terrains lié aux cavités

Les cavités souterraines anthropiques, peuvent, en cas d'instabilité, engendrer des phénomènes de mouvements de terrains. Ces mouvements de terrains sont de trois types (*Illustrations 26, 27 et 28*) :

- les affaissements ;
- les effondrements localisés et
- les effondrements généralisés

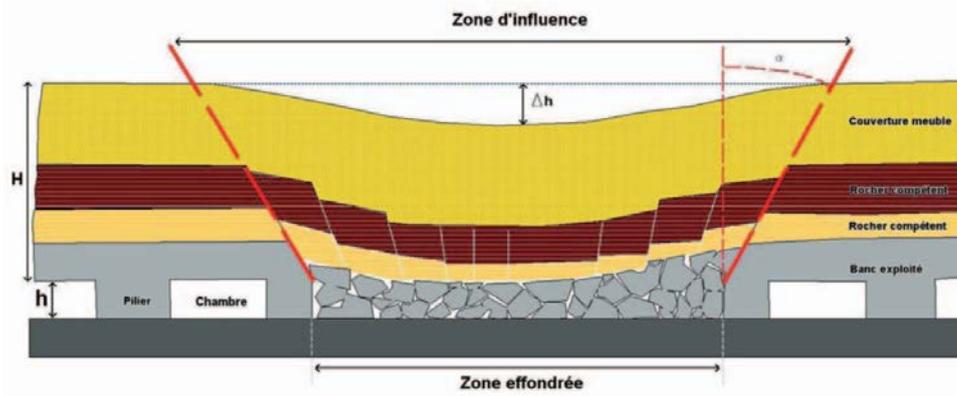


Illustration 26 : Schéma type d'un affaissement dû à la présence d'une cavité souterraine (d'après IFSTAR, 2014).

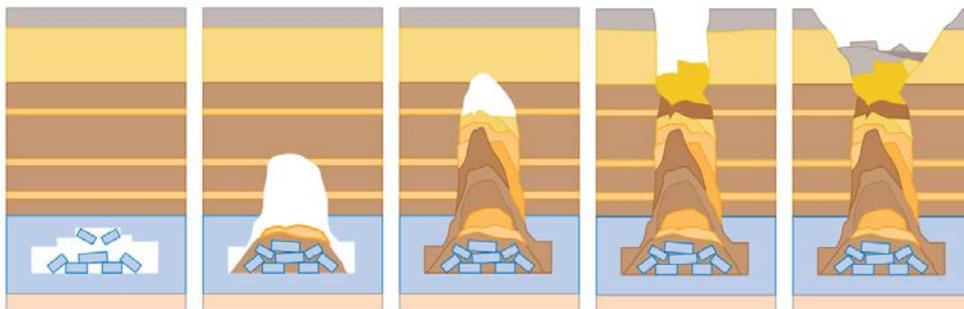


Illustration 27 : Schéma type de la survenue d'un effondrement localisé : un fontis (d'après IFSTAR, 2014).

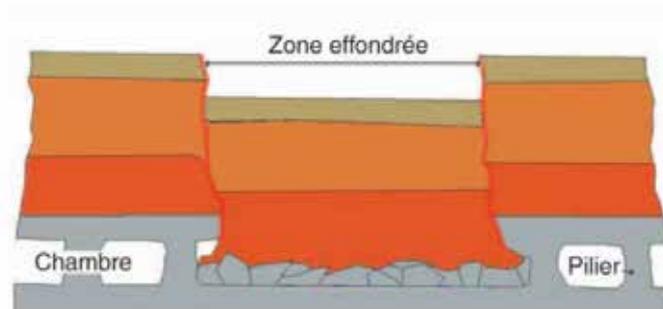


Illustration 28 : Schéma type d'un effondrement généralisé dû à la présence d'une cavité souterraine (d'après IFSTAR, 2014).

Pour contrer la survenue de l'un de ces phénomènes, il est nécessaire de surveiller les facteurs qui vont influencer la stabilité de la carrière étudiée. Ces facteurs peuvent être intrinsèques à la carrière (Illustration 29) et/ou externes.

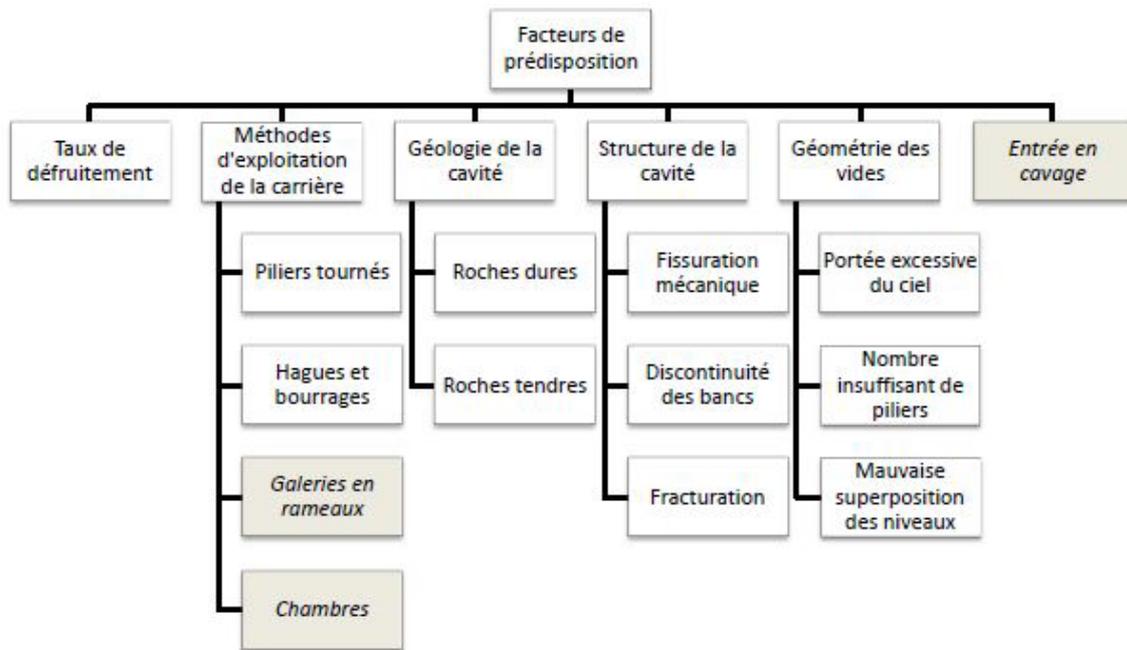


Illustration 29 : facteurs de prédisposition au risque de mouvements de terrains, lié à la présence d'une cavité anthropique.

Les cavités anthropiques orléanaises *intra-muros*, ne répondent pas à tous ces facteurs de prédisposition. Comme vu précédemment, les carrières sont exploitées en galeries ou en chambres. De plus, au vu de leur taille, il est évident que les méthodes d'exploitation vont jouer un rôle quasi-nul dans la stabilité. Aucune de ces carrières n'a d'entrée en cavage (depuis un coteau) : ce facteur ne va donc pas entrer en compte dans le diagnostic de stabilité. Enfin, les formations des calcaires de Beauce, dans laquelle se situe les carrières d'Orléans, ne possèdent pas de réels bancs, ni de fracturation. La structure de la cavité sera donc un facteur à surveiller mais son importance est à relativiser comparé aux facteurs restants. Le taux de défrèvement, la géologie de la cavité et la géométrie des vides sont les facteurs de prédisposition à surveiller de très près, pour l'étude des cavités anthropiques *intra-muros*.

Outre les facteurs de prédisposition, les facteurs externes, dits facteurs aggravants, vont jouer un rôle très important dans la stabilité d'une carrière souterraines. Ceux à prendre en compte dans le cas d'étude SICAVOR sont :

- l'eau ;
- la végétation et
- le facteur humain.

L'eau est, sans nul doute, le phénomène externe qui va le plus aggraver la stabilité d'une carrière souterraine calcaire. La présence d'eau peut être la conséquence d'infiltration, dans le substrat géologique, des eaux météorites ou des eaux d'origine anthropique. Les cavités orléanaises étant en dessous du centre-ville, la présence d'une canalisation en mauvais état peut avoir des conséquences non négligeables, à plus ou moins long terme, sur la stabilité de la cavité. Concrètement, l'eau va diminuer la résistance mécanique des roches calcaires, pouvant conduire, à terme, à une déstructuration du substrat géologique. Du fait du contexte géologique et hydrogéologique, le développement de réseaux karstiques est un phénomène à prendre en compte dans l'évaluation du risque liés aux cavités anthropiques. Enfin, une mauvaise aération d'une carrière peut entraîner une augmentation de l'hygrométrie et accentuer la dégradation de la cavité.

La croissance des végétaux, s'accompagnant par le développement de son système racinaire, il est nécessaire de prendre en compte ce phénomène pour l'évaluation de la stabilité. La présence de racines dans des cavités anthropiques peut être le signe d'une faible hauteur de recouvrement, ce qui constitue un risque d'instabilité. De plus, la présence de racine peut déstructurer le massif rocheux, entraînant un passage préférentiel pour l'eau, qui pourrait conduire à une modification physico-chimique de l'encaissant et donc à une altération de la stabilité de la cavité.

Enfin, le facteur humain, qu'il soit au sein de la cavité étudiée ou en surface, constitue un facteur à surveiller. Une carrière souterraine réemployée en lieu de stockage, par exemple, sous-entend qu'elle est entretenue. Cet entretien ralentit la dégradation. De plus, la présence d'un défaut de stabilité, lorsqu'une carrière est entretenue, permet d'apporter une action préventive très rapide. Une carrière abandonnée, sans entretien, dont les accès sont parfois murés, empêche tout diagnostic. Il est également probable que cette dernière ait une mauvaise aération, entraînant une augmentation de son humidité et une accélération de la dégradation. L'occupation humaine en surface constitue également un facteur à surveiller. Par exemple, une modification des écoulements des eaux en surface, ou la construction d'un bâtiment (terrassements), sont autant de facteurs à prendre en compte dans la surveillance et le diagnostic d'une carrière souterraine.

V.4.2 - Analyse des observations de terrains

Les observations de terrains ont permis de mettre en avant la présence d'instabilités dans certaines cavités et la présence de confortements, dans la plupart des cavités anthropiques. Les annexes 8 à 20 permettent de localiser et d'illustrer les instabilités et les confortements, pour chacune des cavités anthropiques visitées.

- **Les instabilités**

L'instabilité la plus retrouvée dans les carrières visitées (à 50 %), est la poche d'argile (*Illustration 30*). Ces poches d'argiles, de taille décimétrique à pluridécimétrique, résultent de l'altération du calcaire. Parfois, du sable se mêle à l'argile : c'est la preuve de la présence d'un réseau karstique (*Illustration 31*). Le déboufrage de ces poches est un risque d'instabilité pouvant conduire à un effondrement localisé. Il est donc important de les notifier et de suivre leur évolution. Parmi les cavités étudiées, aucune ne présente de désordres en surface.



Illustration 30 : poche d'argile, carrière du 21 rue Saint-Étienne (n°4), 07/04/2017.



Illustration 31 : poche d'argile sableuse, carrière du 11 rue du Tabour (n°3), 06/04/2017.

Il est également possible de retrouver des instabilités liées à la géologie régionale. En effet, bien que les carrières soient en partie confortées, il est possible d'observer le calcaire qui s'effrite mais également un faciès de calcaire argileux composés de petits blocs de calcaires se retirant relativement facilement (*Illustrations 32 et 33*).



Illustration 32 : Effritement du calcaire de la paroi de la carrière, 55 rue de la Bretonnerie (n°1), 03/04/2017.



Illustration 33 : Calcaire argileux composé de petits blocs de calcaires, 21 rue Saint-Etienne (n°4), 07/04/2017.

La carrière du 20 Place de la Croix Morin (*Annexe 16*) est très peu maçonnée et permet donc une bonne observation des instabilités liés aux calcaires de Beauce. Le calcaire présent dans cette carrière s'effrite facilement au touché. La présence de meulière, en petits bancs, permet, probablement, une meilleure stabilité de la carrière (*Illustration 34*). Cependant, il est possible de trouver deux remontées de cloches de fontis récentes, ayant évolué entre la visite des spéléologues, courant décembre 2016 – janvier 2017, et le 5 juillet 2017 (absence d'un fontis lors de la première visite), ainsi qu'une importante altération du calcaire, dans une niche de l'escalier, dû probablement au mauvais état d'une canalisation (*Illustrations 35, 36 et 37*). Un des puits de la carrière présente un agrandissement à sa base très important, résultant de la destruction de la maçonnerie de la base du puit (*Illustration 38*). Enfin, en fond de carrière, il est possible d'observer un effondrement du toit de la carrière, ayant emporté un banc de meulière (*Illustration 39*).



Illustration 34 : Banc de meulière de la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.



Illustration 35 : Remontée de cloche de foyers à côté d'un puitsard de la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.



Illustration 36 : Remontée de cloche de foyers en fond de la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.



Illustration 37 : Zone d'altération prononcée du calcaire de Beauce dans la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.



Illustration 38 : Intérieur du puit agrandi avec des restes de sa maçonneries dans la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.



Illustration 39 : Effondrement du toit au fond de la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.

La présence d'eau (précipitation de carbonates de calcium, écoulement de l'eau etc.) et de racines a été observé dans 37 % et 25 % des carrières visitées (*Illustrations 40, 41 et 42*).



Illustration 40 : Précipitation de carbonate de calcium dans la carrière du 55 rue de la Bretonnerie (n°1), 03/04/2017.



Illustration 41 : Ecoulement d'eau au sol de la carrière du 11 rue du Tabour (n°3), 06/04/2017.



Illustration 42 : Racines au toit de la carrière du 11 rue des Aydes (n°8, hors SICAVOR), 16/05/2017.

Enfin, des instabilités sont parfois présentes au niveau des confortements de la cavité. Ces instabilités peuvent être une altération du mortier liant deux blocs de pierre de taille, un effritement de la maçonnerie ou encore la présence de fissures (*Illustrations 43, 44, 45 et 46*). Ces instabilités sont la preuve qu'une maçonnerie se dégrade au fur et à mesure du temps et qu'il est important de surveiller l'évolution d'une carrière, même si elle est entièrement maçonnée.



Illustration 43 : Altération du mortier entre deux blocs de pierre dans la carrière du 21 rue Saint-Etienne (n°4), 07/04/2017.



Illustration 44 : Exemple d'effritement d'une paroi maçonnée dans la cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor (n°7), 25/04/2017.



Illustration 45 : Fissure dans le linteau d'une niche, présente dans les escaliers de la cavité du 21 rue Saint-Etienne (n°4), 07/04/2017.



Illustration 46 : Exemple de fissure au niveau de la maçonnerie d'un puits dans la carrière du 20 Place Croix-Morin (n°9), 05/07/2017.

- **Les confortements**

Les confortements sont présents dans les 12 cavités anthropiques étudiées. Tous les niveaux de caves sont entièrement maçonnés et tous les niveaux de carrières possèdent au moins une partie d'un mur maçonné, en plus de la maçonnerie des escaliers et des puits. Les confortements sont parfois très anciens (issus de la campagne de confortement du Moyen-Âge) comme c'est le cas pour les carrières du Centre Charles Péguy, de la Crypte Saint-Serge et Bacchus et, probablement, pour la première partie de la carrière du 4 rue de Limare. Ils se distinguent des autres confortements par la présence de voûtes d'ogives qui confortent le ciel de la carrière (*Illustrations 47 et 48*).

Outre ce type de confortement, les caves et les carrières peuvent être maçonnées à l'aide de moellons, d'appareillage plus ou moins petit et ordonné. Ils peuvent recouvrir une partie ou la totalité de la hauteur d'un mur, ou même le plafond d'une cave. Parfois ces moellons sont recouverts d'un enduit (*Illustration 49*). Il est également possible de trouver des maçonneries modernes, preuve de l'âge récent de la carrière et/ou de la cave, ou d'un bon entretien de la cavité, avec une reprise des maçonneries plus anciennes (*Illustration 50*).



Illustration 47 : Exemple de voûtes d'ogives observées dans la carrière du 11 rue de Tabour (n°3), 06/04/2017.



Illustration 48 : Exemple de voûtes retrouvées dans la carrière du 4 rue de Limare (n°12), 05/07/2017.



Illustration 49 : Exemple de maçonnerie enduite, observé dans la cave du 4ter rue des 4 fils Aymon (n°6), 24/04/2017.



Illustration 50 : Exemple de maçonnerie récente, reprenant une maçonnerie ancienne, observé dans la carrière du 11 rue de Tabour (n°3), 06/04/2017.

Enfin, un confortement inhabituel a été observé dans la carrière du Centre Charles Péguy (*Annexe 10*). Ce dernier est à surveiller car possiblement dangereux (*Illustration 51*).



Illustration 51 : Confortement du ciel avec des briques et des tiges de fer, observé dans la carrière du 11 rue du Tabour (n°3), 06/04/2017.

V.4.3 - Analyse de la base de données des interventions d'Orléans Métropole

La base de données des interventions réalisées par le service risque d'Orléans Métropole, suite à des désordres en surface, notamment liés aux cavités anthropiques, permet de prendre du recul sur le risque lié à la présence des cavités anthropiques (*Annexe 25*).

Ainsi, de janvier 2010 à mai 2017, 260 interventions ont été effectuées par le service risques d'Orléans Métropole. 99 sont liées à des cavités anthropiques, 118 sont liées à d'autres phénomènes naturels et 43 (situés tous en dehors d'Orléans *intra-muros*) à des phénomènes naturels non clairement identifiés avec la base de données. Ainsi, de 2010 à 2017, 18 % des interventions ont concernées des cavités *intra-muros*, contre 17 % en *extra-muros* et 3 % en agglomération. À noter la marge d'erreur non négligeable pour les interventions extra-muros et en agglomération, due au manque de précision sur le phénomène à l'origine de l'intervention d'Orléans Métropole (*Illustration 52*).

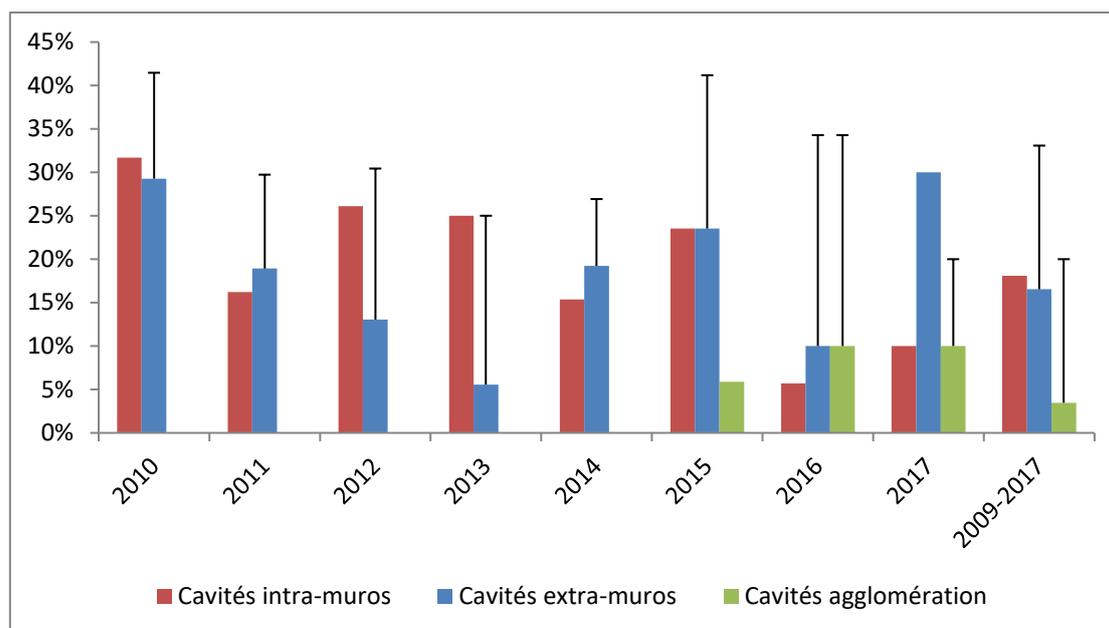


Illustration 52 : Graphique des interventions intra-muros, extra-muros et en agglomération liées à la présence de cavités souterraines anthropiques, entre 2010 et 2017, obtenues par la base de données d'Orléans Métropole.

Les années 2010, 2012, et 2013 possèdent une forte proportion d'interventions *intra-muros*, comparée aux interventions *extra-muros*. Elles comptent respectivement, 32 %, 26 % et 25 % des interventions *intra-muros* liées à la présence de cavités anthropiques. Il faut cependant remettre ces résultats dans leurs contextes. En 2010 et 2011, d'importants travaux ont été entrepris dans le centre d'Orléans, pour la construction de la seconde ligne de tramway. En 2012 et 2013, d'autres travaux ont été entrepris pour la construction d'un parking souterrain dans le centre d'Orléans et pour la rénovation de la Place du Martroi, place centrale de la ville (Illustration 53). Ainsi, des cavités ou puits ont pu être découverts durant ces différentes périodes et, sans ces travaux, ces excavations n'auraient pas forcément été découvertes.

Grâce à la base de données des interventions d'Orléans Métropole, nous pouvons constater qu'environ une vingtaine de désordres liés aux cavités souterraines sont dus à d'importants travaux. Cependant, des désordres liés aux cavités existent, et ceux, en dehors des périodes ou des zones de travaux.

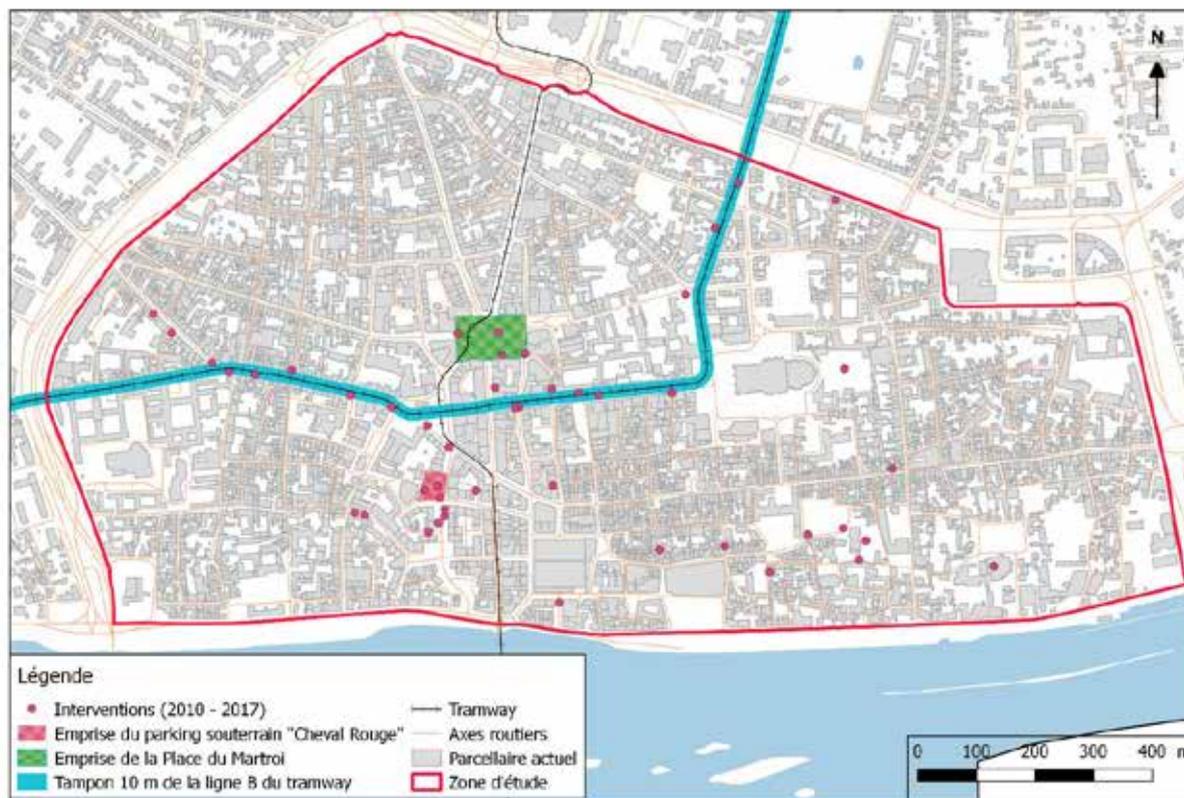


Illustration 53 : Localisation des interventions du service risque d'Orléans Métropole et des importants travaux, entre 2010 et 2017.

V.4.4 - Evaluation du risque lié aux cavités anthropiques intra-muros

Les observations faites lors des visites des cavités souterraines permettent d'émettre un avis sur le risque lié aux cavités (Tableau 2 et Annexe 20)

Tableau 2 : Etat des cavités étudiées de mars à août 2017

Numéro	Adresse	Etat de la cavité	
		Cave	Carrière
1	55 rue de la Bretonnerie	Bon	Bon
2	4 rue Coligny	Moyen	Bon
3	11 rue du Tabour	Bon	Bon
4	21 rue Saint-Etienne	Bon	Bon
5	9 cloître Saint-Aignan	Bon	/
6	4ter rue des 4 fils Aymon	Bon	/
7	26 rue des Ormes Saint-Victor	Bon	/
8	11 rue des Aydes	/	Bon
9	20 Place Croix-Morin	Bon	Moyen
10	2 rue des Trois Maries	Bon	/
11	4b rue de Limare	Bon	Bon
12	4 rue de Limare	Bon	Bon

Une seule cave possède réellement des instabilités : la cave du 4 rue Coligny. L'instabilité de cette cave porte uniquement sur son entrée car plusieurs claveaux formant l'arc d'entrée se sont effondrés récemment (*Annexe 9*).

Une seule carrière possède réellement des instabilités importantes qui nécessite une intervention : la carrière du 20 Place Croix-Morin. Elle est l'unique carrière étudiée qui montre des remontées de cloches de fontis actuelles, ayant évolué en l'espace de six mois, et un effondrement de toit (en fond de carrière). De plus, l'élargissement du puits à sa base est un phénomène important à prendre en compte. Il est fort probable que le phénomène s'amplifie, entraînant une désolidarisation de plus en plus importante du puit (*Annexe 16*).

D'une manière générale, les puits sont les zones de faiblesses les plus importantes dans une carrière souterraine :

- La carrière du 11 rue du Tabour (n°3) a probablement subi un effondrement de puits (*Annexe 10*).
- Les carrières du 11 rue des Aydes (n°8, hors SICAVOR) et du 20 Place Croix-Morin possèdent des puits avec d'importantes fractures (*Annexe 15*).
- La carrière du 20 Place Croix-Morin possède un puits élargi à sa base et une remontée de cloche de fontis à l'aplomb d'un puisard (*Annexe 16*).

Les puits sont cependant importants pour la stabilité d'une carrière car, s'ils ne sont pas bouchés, ils permettent une bonne aération de la carrière. Paradoxalement, ce sont les zones qui se dégradent le plus facilement et qui peuvent être à l'origine de la dégradation d'une carrière. Les puits sont des zones préférentielles pour les infiltrations d'eau. L'eau va pouvoir se frayer un chemin à travers la maçonnerie des puits, entraînant au fil du temps, des fissures. Les fissures vont progressivement s'aggraver et c'est, probablement ce qui a entraîné la dégradation de la maçonnerie de la base du puit, de la carrière du 20 Place Croix-Morin. L'eau continuera de s'infiltrer dans ce puit, entraînant une désolidarisation de plus en plus importante de la maçonnerie. A terme, le puits s'effondrera et une ouverture se formera à la surface.

Les profondeurs et les épaisseurs de recouvrement sont des critères importants dans l'évaluation du risque lié aux cavités souterraines (*Tableau 3*). Dans les cas étudiés, les profondeurs sont très variables, allant de 5,3 à 16,8 m de profondeur pour les caves-carrières et de 3 à 8,2 m pour les caves, avec des épaisseurs de recouvrement allant de 3,3 à 12,7 m pour les carrières et de 0 à 1,4 m pour les caves. Une cavité profonde, et donc ayant une forte épaisseur de recouvrement, aura moins de risque de voir apparaître des désordres à la surface. En effet, même si les charges que doit supporter la carrière sont plus importantes, en cas de remontée de cloche de fontis, la probabilité d'une remontée à la surface est plus faible. Les matériaux tombés dans la carrière pourront venir combler le fontis : c'est l'auto-comblement. Ce phénomène ne peut survenir seulement si l'épaisseur de recouvrement est suffisant.

Tableau 3 : Détermination de la profondeur, des hauteurs de vide et des épaisseurs de recouvrement pour chaque cavité étudiée

Adresse	Topographie actuelle (NGF)	Profondeur (m)		Altitude du sol (NGF)		Hauteur de vide (m)		Epaisseur de recouvrement (m)	
		Terrain	ZEB-REVO	Terrain	ZEB-REVO	Terrain	ZEB-REVO	Terrain	ZEB-REVO
55 rue de la Bretonnerie	117,1	15,2	16,8	101,9	100,3	2,5	2,6	12,7	14,2
4 rue Coligny	102,7	5,3	/	97,4	/	2	/	3,3	/
11 rue du Tabour	108	12,2	12,6	95,8	95,4	2	2,6	10,2	10
21 rue Saint-Etienne	110,8	11,8	/	99	/	2,5	/	9,3	/
9 cloître Saint-Aignan	108,5	6,1	/	102,4	/	6	/	0,1	/
4ter rue des 4 fils Aymon	101,2	3	/	98,2	/	3	/	0	/
26 rue des Ormes Saint-Victor	106,9	4,4	/	102,5	/	4	/	0,4	/
11 rue des Aydes	111,8	7,2	/	104,6	/	2,5	/	4,7	/
20 Place Croix-Morin	110,5	/	10,6	/	99,9	2	2,2	/	8,5
2 rue des Trois Maries	108,4	8,4	8,2	100	100,2	7	6,8	1,4	1,4
4b rue de Limare	110,6	9,9	/	100,7	/	2,5	/	7,4	/
4 rue de Limare	110,5	7,8	/	102,7	/	2,5	/	5,3	/

Aucune des cavités étudiées ne présente de risque important. La carrière du 20 Place Croix-Morin possède des fontis, mais ces derniers ne sont pas proche de la surface. Cependant, comme ils évoluent encore, il est nécessaire de surveiller cette carrière et, au mieux de la combler. La base de données des interventions d'Orléans Métropole montre que le risque de désordre en surface n'est pas nul puisque chaque année survient des désordres en surface. Ces désordres n'ont cependant jamais fait de victime et, une partie non négligeable est la conséquence de travaux d'aménagements.

De plus, dans l'optique d'une prévention à long terme (les 100 prochaines années), il faut prendre en compte l'évolution de la géologie. Etant donné que la plupart des cavités sont en partie ou complètement maçonnées, ces dernières auront une meilleure stabilité à long terme. Il convient de vérifier la qualité des confortements qui se dégradent avec le temps. Les poches d'argiles ainsi que les réseaux karstiques sont également à surveiller car particulièrement évolutifs au fil du temps. Le recouvrement des cavités étant composé de marnes et calcaires de l'Orléanais et de remblais historiques, la prédisposition à l'affaissement est limitée. La survenue d'effondrement est plus probable que la survenue d'un affaissement.

En plus de la géologie, de l'altération du calcaire et des réseaux karstiques, les cavités étant relativement petites (ne dépassant pas les limites parcellaires), les largeurs des galeries et les portées du toit sont faibles. Ainsi, la prédisposition à l'effondrement d'une cavité est faible. Cependant, le fait que plusieurs centaines de cavités soient présentes dans une zone d'étude fortement urbanisée et que des désordres en surface se soient déjà produit, tend à affirmer que la probabilité d'occurrence du phénomène est moyenne.

V.5 - Apport du ZEB dans la gestion des cavités

Comme dit précédemment, une comparaison entre le FARO® Focus 3D et le ZEB-REVO a été réalisée afin de déterminer les avantages et les inconvénients de chacun des scanners, pour la gestion du risque associé aux cavités anthropiques. Pour se faire, le site d'étude retenu pour la comparaison des appareils est celui du Centre Charles Péguy, situé au 11 rue de Tabour, à Orléans (n°3) (*Illustration 54 et Annexe 10*). Ce site se compose de deux niveaux de sous-sol. Le premier niveau est constitué de deux pièces et le second niveau correspondant à la carrière, se compose d'une galerie est (la plus petite) et d'une galerie ouest, les deux jointes par une galerie transverse. Une autre pièce (niveau -1,5) se trouve à mi-parcours de l'escalier reliant les niveaux de sous-sol -1 et -2. Enfin, il existe une autre galerie, située au niveau -0,5, avec une entrée située dans l'escalier reliant le niveau -1 au rez-de-chaussée. Cependant, cette dernière n'a pas été incluse dans la comparaison, car non scannée par le FARO.

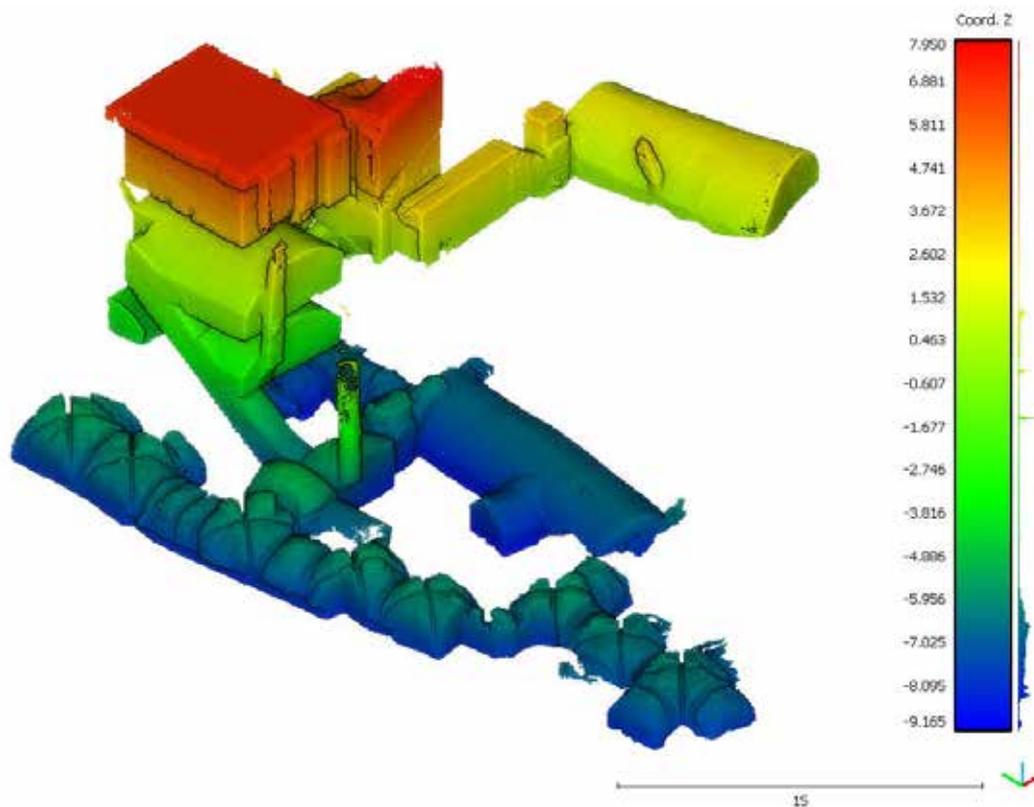


Illustration 54: Représentation 3D du site du Centre Charles Péguy (en mètre), réalisée avec le ZEB-REVO le 06/04/2017.

Le levé au FARO® Focus 3D et son post-traitement (logiciel SCENE) ont été réalisés par l'archéologue Daniel Morleghem. Ce traitement de données a consisté à recalé les 41 nuages de points issus du relevé, à partir de repères artificiels (sphères blanches) et de repères plus « naturels » (les angles de pierres par exemple). Le traitement des données du ZEB-REVO a été réalisé à partir du logiciel libre CloudCompare. Il a consisté à assembler et recalé les quatre boucles constituant le relevé de la cavité.

Deux nuages de points (un FARO® et un ZEB) ont été obtenu et utilisé pour la comparaison des deux instruments.

En premier lieu, il convient de comparer les caractéristiques des fichiers dans leur globalité :

Tableau 4: Comparaison des caractéristiques générales des nuages de points FARO® et ZEB

	FARO® Focus 3D	ZEB-REVO
Poids des nuages de points	21,4 Go	2,05 Go
Nombre de points	1 150 735 843	110 236 614
Durée d'acquisition	3 heures	50 minutes
Durée de post-traitement	2 h 30 min	40 minutes

Le nuage de point final du ZEB-REVO est dix fois moins lourds que celui du FARO® Focus 3D et présente dix fois moins de points. Un nombre plus important de points entraîne une différence de temps d'acquisition et de post-traitement qui n'est pas négligeable (trois fois plus de temps avec le FARO® pour recueillir les données et les traiter).

Afin de clairement comparer les deux appareils, un calcul de la distance entre les deux nuages de points a été entrepris. Ce calcul a révélé de grands écarts du fait de la présence d'objets ou de personnes dans l'un des nuages de points uniquement (présence du trépied du ZEB dans le nuage de points ZEB mais absent dans le nuage de points FARO® notamment). Ainsi, comme l'ont fait M. Eyre et al, en 2016, 3 % des points sont considérés comme extrêmes sur le modèle et sont donc exclus de l'analyse. Les 97 % de données restantes sont comprises entre l'intervalle de distance 0 et 0,2 m.

Comme le montre l'histogramme (*Illustration 55*), 50 % des données du ZEB se situent dans les 24,4 mm des données FARO® et 25 % des données dans 7,8 mm. Ces données, couplées à l'illustration 56, permettent de mettre en évidence, en partie, le phénomène de dérive du ZEB. Logiquement, une plus grande distance entre les deux nuages de points (zone rouge de l'illustration) suggère une dérive d'un des deux appareils, dans notre cas le ZEB, sachant que la référence pour le calcul était le nuage de points FARO®. Il faut cependant prendre en considération la présence des voûtes d'ogives, car si le ZEB se tient à la main et peut aller dans de petits recoins, ce n'est pas le cas du FARO®. Pour obtenir ces données, il est nécessaire pour le FARO® de multiplier les stations de relevées. Ainsi, des recoins ont pu ne pas être scannés, notamment dans la galerie ouest.

La galerie est montrée une dérive du ZEB (zone rouge au fond de cette galerie). De plus, cette zone est particulièrement lisse, comparée à la galerie ouest, et il est donc plus compliqué pour l'appareil de trouver ses points de repères pour constituer le nuage de points, expliquant plus facilement ce phénomène de dérive. Même si la dérive est présente, elle est à relativiser car sa valeur est au maximum de 20 cm, ce qui reste très satisfaisant dans le domaine de la gestion du risque cavité.

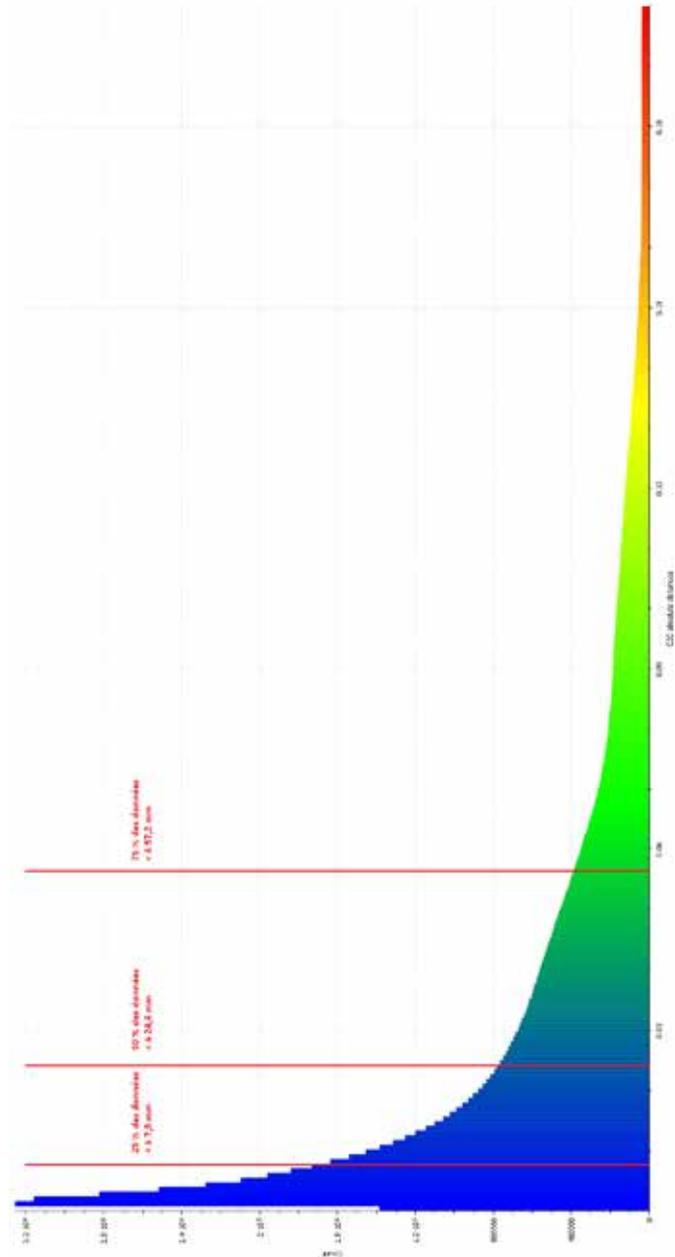


Illustration 55 : Histogramme représentant la distance entre les deux nuages de points ZEB et FARO, permettant de déterminer la dérive du scanner laser ZEB

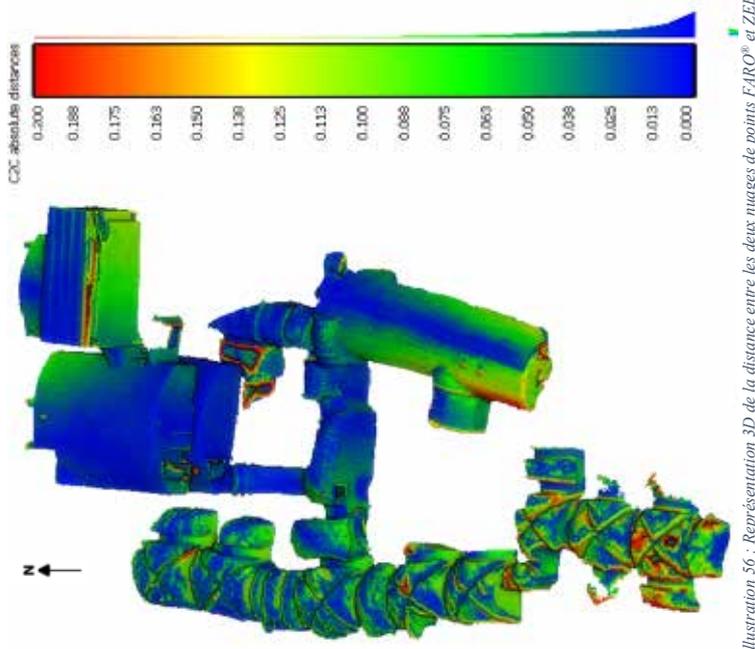


Illustration 56 : Représentation 3D de la distance entre les deux nuages de points FARO et ZEB

Enfin, pour compléter l'étude comparative entre les deux appareils, une analyse de la dispersion des points a été réalisée. Pour se faire, deux coupes transversales des galeries de la carrière et une coupe longitudinale du sol du niveau -1 ont été engagées (*Illustrations 57 à 62*) (*Annexe 26*). Les coupes transversales révèlent une bonne précision pour les deux nuages de points. Cependant, force est de constater la forte présence de bruits dans les coupes du ZEB. La coupe longitudinale quantifie la dispersion des deux nuages en fonction d'un plan moyen, calculé à partir de chacun des nuages. La quantité de points présent sur la coupe ZEB est de 78 698 contre 469 094 sur la coupe FARO®. La coupe longitudinale ZEB comporte donc cinq fois moins de points que la coupe longitudinale FARO®.



Illustration 57 : Coupe transversale de la galerie est de la carrière du 11 rue du Tabour, relevé avec le ZEB-REVO le 06/04/2017.

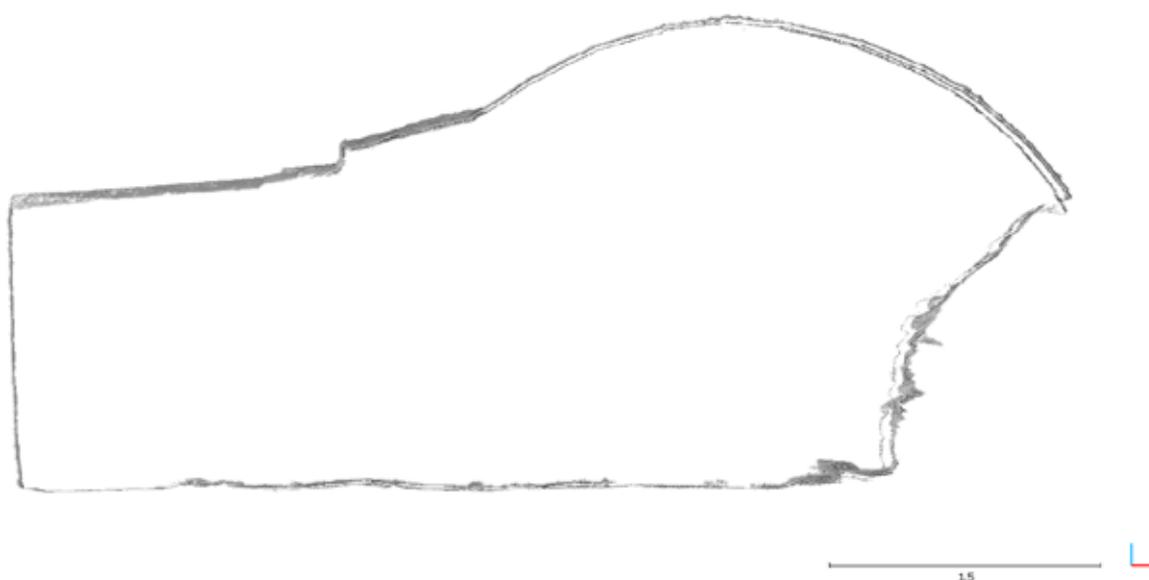


Illustration 58 : Coupe transversale de la galerie est de la carrière du 11 rue du Tabour, relevé avec le FARO® Focus 3D le 06/04/2017.



Illustration 59 : Coupe transversale de la galerie ouest de la carrière du 11 rue du Tabour, relevé avec le ZEB-REVO le 05/04/2017.



Illustration 60 : Coupe transversale de la galerie ouest de la carrière du 11 rue du Tabour, relevé avec le FARO® Focus 3D le 05/04/2017.



Illustration 61 : Coupe longitudinale du sol du 1^{er} niveau de cave au 11 rue du Tabour, relevé avec le ZEB-REVO le 05/04/2017.

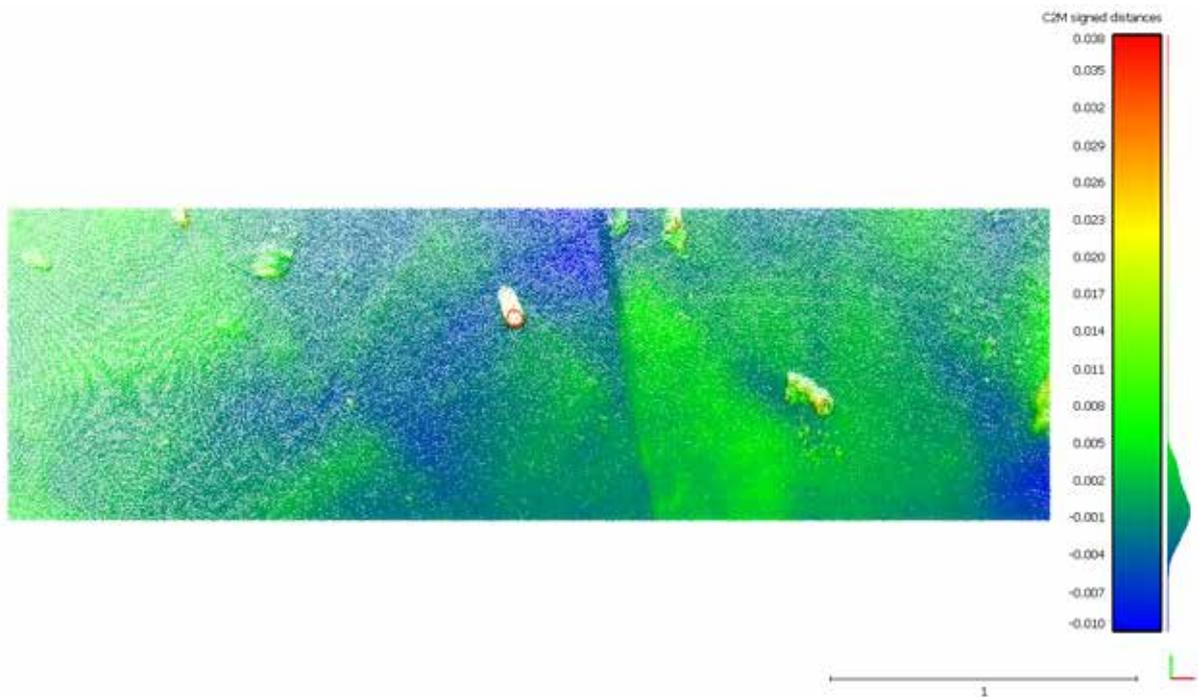


Illustration 62 : Coupe longitudinale du sol du 1^{er} niveau de cave au 11 rue du Tabour, relevé avec le FARO® Focus 3D le 05/04/2017.

L'ensemble de l'étude semble indiquer de meilleurs résultats en faveur du FARO®. Il faut cependant remettre l'étude dans son contexte, c'est-à-dire montrer l'appareil le plus adéquat pour la gestion du risque lié aux cavités. Pour la gestion du risque, il est possible de se retrouver dans deux cas de figure : le danger est imminent ou non. Lorsque le danger est imminent, il est primordial d'effectuer un diagnostic très rapide de la cavité et du risque. Pour se faire, le ZEB convient tout à fait. La rapidité d'acquisition et du traitement de donnée est un point fort : en peu de temps, il est possible de relever une carrière, de déterminer l'emprise de cette dernière sur la surface et ainsi de prendre les mesures qui peuvent s'imposer. Lorsque le danger n'est pas imminent, les deux scanners peuvent convenir. Le FARO® possède une très bonne précision mais plus la précision demandée est importante, plus le temps d'acquisition sera long. Le ZEB, même s'il est moins précis que le FARO®, fournit des données satisfaisantes et sa vitesse dépend uniquement de la taille de la cavité. Il ne sera peut-être pas à même de relever les plus petites fissures mais il sera capable de mettre en évidence les instabilités d'une cavité anthropique, chose primordiale dans la gestion du risque.

D'une façon générale, chaque appareil possède des points positifs et négatifs que le manipulateur sait adapter en fonction de ses besoins.

Tableau 5 : Comparaison des caractéristiques du FARO® Focus 3D et du ZEB-REVO.

	Points positifs	Points négatifs
FARO® Focus 3D	<ul style="list-style-type: none"> - Très grande précision - Grande portée (> 50 m en intérieur) - Possibilité de coloriser les nuages de points - Possibilité de modifier les paramètres d'acquisition 	<ul style="list-style-type: none"> - Besoin impératif d'un trépied - Fixe donc multiplication du nombre de scan - Acquisition et post-traitement longs - Taille des fichiers important
ZEB-REVO	<ul style="list-style-type: none"> - Portable et maniable - Rapidité d'acquisition et de post-traitement - Relevé dans des zones difficiles d'accès - Relevé en continu 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de dérive - Absence de contrôle dans les calculs - Calculs difficile dans des zones homogènes - Faible portée (30 m en intérieur)

VI - Perspectives

VI.1 - Fin du projet SICAVOR

Le programme SICAVOR se conclura par l'organisation d'un colloque à visée internationale, sinon européenne, les 4, 5 et 6 octobre 2017, à Tours. Il permettra de mettre en avant les avancées scientifiques dans la compréhension des cavités et des celliers urbains mais également, les avancées dans les méthodes d'analyses

Après trois ans de recherche, le projet a permis d'étudier plusieurs centaines de cavités anthropiques, regroupées uniquement dans le centre urbain orléanais. Toutes les cavités présentes dans l'*intra-muros* d'Orléans n'ont probablement pas été découvertes mais une grande majorité a pu être étudiée. La recherche systématique entreprise dans le quartier Saint-Aignan a permis de construire une méthodologie systématique d'étude, qui pourrait être utilisée dans le futur. Il est cependant dommage que le volet axé sur les risques liés à ces cavités anthropiques intervienne uniquement lors de la troisième année d'étude. En effet, durant les deux premières années, bon nombre de cavités ont été étudiées et il aurait été intéressant d'observer leurs instabilités. Si à terme, un attribut risque ou instabilité est inclus dans le SIG de projet, il s'avère dommage de ne pouvoir indiquer l'état et/ou les instabilités seulement pour 11 cavités anthropiques. C'est pourquoi, il serait intéressant qu'un tel projet soit reconduit. Cela permettrait de découvrir de nouvelles cavités anthropiques et de pouvoir appliquer la recherche systématique des cavités à l'ensemble de la zone d'étude.

VI.2 - L'utilisation du ZEB pour la gestion des cavités

Le scanner 3D ZEB-REVO est un outil très intéressant pour l'étude des cavités anthropiques et donc, par extension, pour la gestion du risque lié aux cavités. Le rapport précision / rapidité d'acquisition des données et de post-traitement permet de réaliser un diagnostic d'état d'urgence. En effet, en cas, par exemple, de remontée de cloche de fontis à la surface due à une cavité souterraine, il est possible de faire un relevé de la cavité (si elle est accessible) très rapidement. Evidemment, la durée de l'étude dépendra de la grandeur de la cavité et de son état. Cependant, en une journée, il est possible de déterminer l'emprise de la cavité, sa profondeur, de localiser les instabilités, et cela avec une précision largement suffisante. Il est ainsi possible d'intervenir très vite, pour prévenir du danger. De plus, ce scanner 3D étant portable, il est très facile de relever des zones obstruées. Il n'y a aucune contrainte d'espace sachant qu'aucun trépied n'est réellement nécessaire pour effectuer le relevé d'une cavité. A partir du moment où le manipulateur peut passer dans une zone, le relevé de cette zone pourra se faire.

Enfin, il est à notifier que cette technologie n'est qu'à ses débuts. Avec le développement des voitures autonomes, entre autre, il est à parier que ce genre d'instrument risque de très vite évoluer. La précision sera sûrement améliorée, tout comme le domaine de la photographie. En effet, même si le ZEB-REVO peut, actuellement, être muni d'une caméra (la ZEB-CAM), l'apport d'une vidéo ou de photographies n'est pas encore au point. Le fait de travailler dans le domaine souterrain, avec la plupart du temps peu de lumière, ne permet pas d'obtenir de belles images qui pourraient venir compléter un diagnostic de stabilité. L'amélioration de la prise d'image permettrait de pouvoir coloriser un nuage de points, de mettre en évidence les instabilités d'une cavité et, à terme, permettre une surveillance de ces cavités en relevant les zones instables régulièrement, afin d'observer leur évolution.

VI.3 - Vers une approche à long terme de la gestion du risque lié aux cavités anthropiques

Localiser et étudier les cavités souterraines de façon systématique est le meilleur moyen de gérer le risque « mouvements de terrain » lié à leurs présences. Même si ce travail peut paraître fastidieux et coûteux, il est dans l'obligation de protéger la population face aux risques naturels. L'avancée des technologies devrait permettre de localiser rapidement l'emprise des cavités souterraines de façon précise. C'est un premier pas vers la gestion du risque à long terme.

Le service risque développé à Orléans, et dans d'autres villes jugées « à risques importants », permettent de répondre rapidement à d'éventuels phénomènes naturels et désordres en surface. De plus, la convention passée entre les spéléologues du CDS 45 et la ville d'Orléans, conduit et va conduire à la découverte et à la topographie du sous-sol orléanais. De tels partenariats entre différents organismes spécifiques aux cavités souterraines, et aux risques qui leurs sont liés, doivent être encouragés et multipliés afin de répondre à la problématique.

Enfin, le développement de moyens de communication à l'intention de la population (réunions publiques, visites de cavités, films, conférences...) permettrait de sensibiliser les personnes aux risques liés à la présence de cavités anthropiques, et de pouvoir les prémunir de ce phénomène.

VII - Conclusion

Le projet SICAVOR « Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans » a aidé à mettre en lumière un réseau de cavités anthropiques orléanaises encore méconnues du grand public. Creusées dans les calcaires de Beauce, formation lacustre très hétérogène de l'Aquitainien, les cavités observées peuvent être des caves, des caves-carrières ou des carrières.

La zone d'étude du programme de recherche correspond au centre urbain d'Orléans, plus particulièrement à l'emprise de la quatrième et dernière enceinte de la ville, édifiée entre le XV^{ème} et le XVI^{ème} siècle. En sous-sol, elle se compose de centaines de cavités de taille, de profondeur et d'âge variables.

Durant les six mois de stage, 11 cavités *intra-muros* ont été étudiées afin de mettre en évidence le risque « mouvement de terrain ». Il s'avère que les cavités sont en grande partie maçonnées, moyennant quelques exceptions. Les instabilités (poches d'argiles, poches de sables, effritement de parois, remontée de cloches de fontis etc.) sont la preuve de l'évolution des cavités. L'étude a révélé que le risque de survenu de désordres en surface lié à la présence de cavités souterraines était moyen.

Ces six mois ont également permis de développer l'étude du ZEB-REVO, un scanner 3D portatif permettant de relever des cavités souterraines. La rapidité d'acquisition des données et de post-traitement en fait un instrument de premier choix pour la gestion du risque lié aux cavités souterraines. Portatif et maniable, il est possible de scanner des zones difficiles d'accès en un temps très court, tout en gardant une précision suffisante pour le domaine des risques naturels.

Au terme des trois ans de recherche du programme SICAVOR, ce sont plusieurs centaines de cavités qui ont pu être étudiées dans le centre urbain d'Orléans. Ces recherches ont permis de dater ces cavités, de mettre en évidence leur utilisation originelle, passée et actuelle et d'étudier le risque associé à ces caves et carrières. Cependant, la recherche de cavités ne s'arrête jamais et d'autres sont encore à découvrir et à étudier.

VIII -Références bibliographiques

ALIX C. 2008. L'habitat d'Orléans du 12^e siècle au début du 15^e siècle (état de la recherche : étude des élévations et apports de l'observation des caves). Revue archéologique du Loiret et de l'axe ligérien. Fédération archéologique du Loiret, pp. 123-147. <hal-01006267>.

ALIX C. dir. 2015. SICAVOR : Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans : rapport de prospection thématique pluriannuelle. Orléans : SAMO/SRA Centre. 66p.

ALIX C. dir. 2016. SICAVOR : Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans : rapport de prospection thématique pluriannuelle. Orléans : SAMO/SRA Centre. 182p.

ATHAN C. 1995. Modélisation numérique du creusement d'un tunnel à l'aide d'un bouclier à pression de boue. Thèse de doctorat : Géotechnique. École Nationale des Ponts et Chaussées. 451p.

BRGM. 1995. Piézométrie du système aquifère de Beauce : basses eaux 1994. Rap. BRGM R 38572. 33p.

CHARLES N., GRAVIOU P. 2016. Curiosités géologiques du Loiret. Orléans : BRGM éditions. 91p.

DESPREZ N., MEGNIEN C. 1972. Hydrogéologie de la Beauce. Orléans : BRGM éditions. 31p.

DESPREZ N. 1973. L'hydrogéologie des formations lacustres en Beauce et en Sologne. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 08-09/06/1972. Blois, pp. 60-67.

EYRE M., WETHERELT A., COGGAN J. 2016. Evaluation of automated underground mapping solutions for mining and civil engineering applications.

GUILLEMIN C. 1976. Les formations carbonatées dulçaquicoles tertiaires de la région Centre (Briare, Château-Landon, Berry, Beauce). Thèse de doctorat : Géologie. Orléans : Université d'Orléans. 271p.

GUTIERREZ A., BINET S. 2010. La Loire souterraines : circulations karstiques dans le Val d'Orléans. Géosciences, 12, pp 42-53.

IFSTTAR 2014. Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées – Guide méthodologie. Jouve. IFSTTAR éditions. 106p.

INERIS 2016. Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique. Rapport d'étude DRS-16-156834-00810B 61p.

JOSSET D., ALIX C., MASSAT T. 2014. Activités d'extraction de matériaux calcaires au cœur de la ville d'Orléans entre la fin du Xe siècle et le XVe siècle. Actes du 137^e congrès des sociétés historiques et scientifiques « composition(s) urbain(s) », Tours, 2012. Construire la ville : histoire urbaine de la pierre à bâtir. Lassay-les-Châteaux : Editions du Comité des travaux historiques et scientifiques, pp. 11-26

JOYEUX P. dir. 2014. Regards sur Orléans : archéologie et histoire de la ville. Orléans : Ville d'Orléans/Inrap/DRAC Centre. 148p.

LEPILLER M., JOZJA N. 2010. Le Val d'Orléans, un aquifère karstique alimenté par la Loire. Association française de karstologie. Grottes et karst de France. Karstologia Mémoires, n°19, pp 170-171.

LORAIN J-M. 1973. La géologie du calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 08-09/06/1972. Blois, pp. 14-53.

LORAIN J-M. 1973. Principe d'étude du réseau karstique de la forêt d'Orléans. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 08-09/06/1972. Blois, pp. 68-73.

MÉNILLET F. 1974. Étude pétrographique et sédimentologique des calcaires d'Étampes et de Beauce : Formations dulçaquicoles du Stampien supérieur à l'Aquitainien dans le Bassin de Paris. Thèse de doctorat : Sédimentologie. Paris : Université de Paris-sud, centre d'Orsay, 262p.

MÉNILLET F. 1980/1981. Les lithofaciès des Calcaires de Beauce (Stampien supérieur et Aquitainien) du bassin de Paris (France). Bulletin du BRGM (deuxième série), section IV, pp. 15-55.

MICHAUD-FREJAVILLE F. 1980. La forteresse d'Orléans (XIV^{ème} – XV^{ème} siècles). In : Actes des congrès de la Société des historiens médiévistes de l'enseignements supérieur public. 11^{ème} congrès, Lyon. Le paysage urbain au Moyen-Âge. Pp. 61-78 ; doi : 10.3406/shmes.1980.1360.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE 2014. Plan de prévention des risques naturels – cavités souterraines abandonnées – guide méthodologique. 79p.

PANNET P., SCHROETTER JM., avec la collaboration de **MALLARD P., MULOT M. et YILMAZ Ö.** 2011. Inventaire départemental des cavités souterraines hors mines de l'Oise. Rapport final. BRGM/RP-60320-FR. 135p.

RENAULT O., avec la collaboration de **DEBÉGLIA N., NÉDELLEC JL. et ROUZAIRE D.** 2006. Commune de Cournon (63) – Connaissance de l'aléa « effondrement de cavités souterraines » et « mouvement de terrain » - Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-54763-FR. 90p.

THUON Y., avec la collaboration de **GOBANCÉ G.** 2010. Inventaire des cavités souterraines (hors mines) du département de la Marne (51). Rapport final. BRGM/RP-59361-FR. 90p.

VANNIER S., TEMPLIER M. 1999. Orléans Souterrain. Chambray : éditions CLD. 127p.

VINCENT M., avec la collaboration de **RENAULT O., LEFEBVRE M., PONCHANT P., FRECAUT C. et PLUSQUELLEC N.** 2005. Inventaire départemental des cavités souterraines de l'Ardèche hors mines. Rapport final. BRGM/RP-53911-FR. 120p.

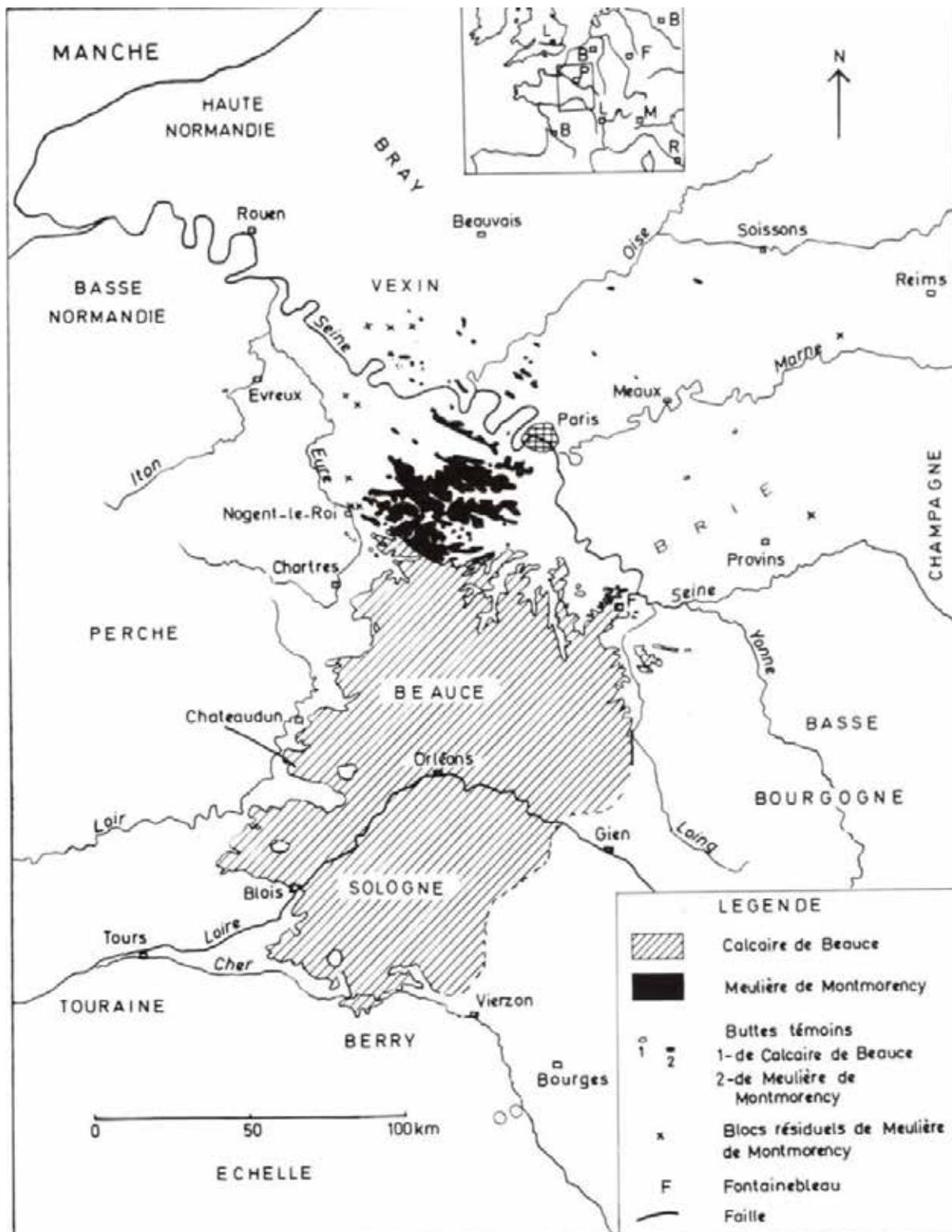
WATELET JM., MONTAGNE D., WOJNAROWICZ M. 2002. Risques d'effondrement des carrières souterraines en milieu urbain. De la prévention à la mise en sécurité. Exemple de l'îlot St-Julien à Laon (02). Revue française de la Géotechnique, pp 35-41.

XAVIER, M. 2016. Contribution à l'analyse des carrières souterraines médiévales en milieu urbain des anciennes enceintes fortifiées d'Orléans. 43p.

IX - Annexes

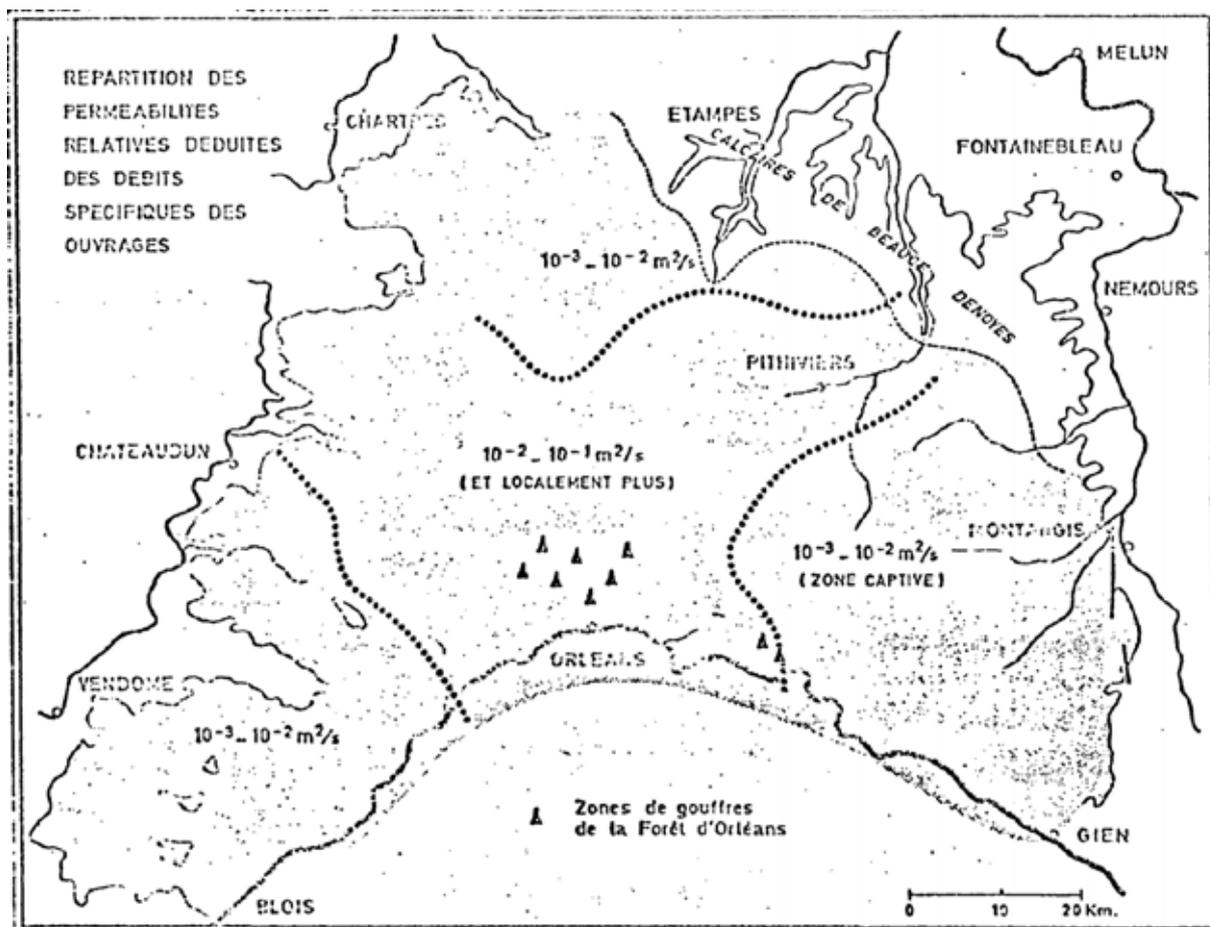
Annexe 1 : Echelle chrono-stratigraphique

Annexe 2 : Limites de la formation des calcaires de Beauce



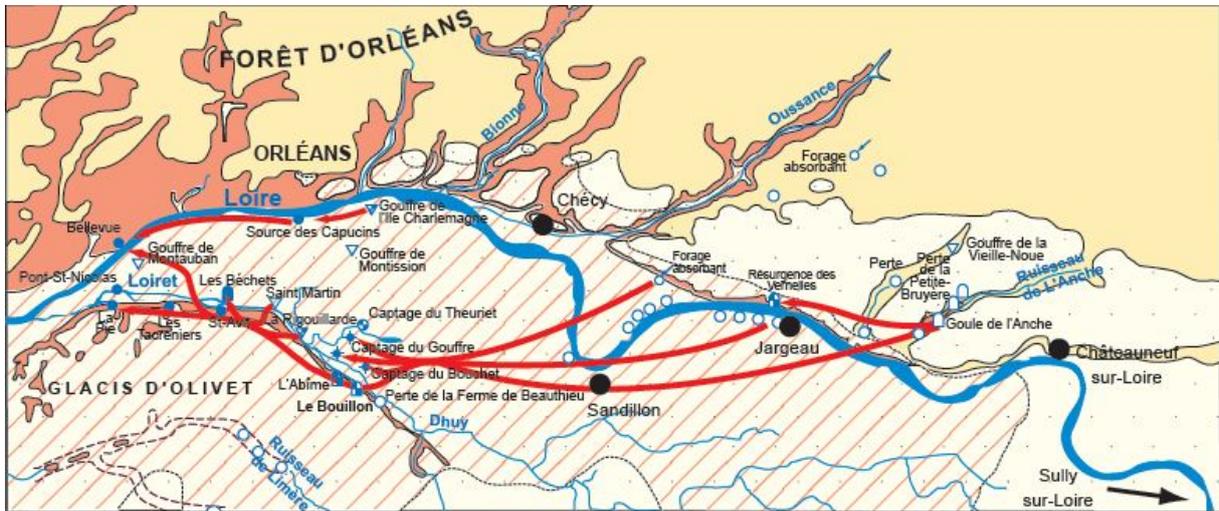
Délimitation de la formation des calcaires de Beauce (d'après Ménillet, 1980 - 1981)

Annexe 3 : Localisation des nappes libres et captives dans les formations de Beauce



Localisation des nappes libres et captives dans les formations de Beauce (d'après Desprez et Megnier, 1972)

Annexe 4 : Circulation karstique du val d'Orléans



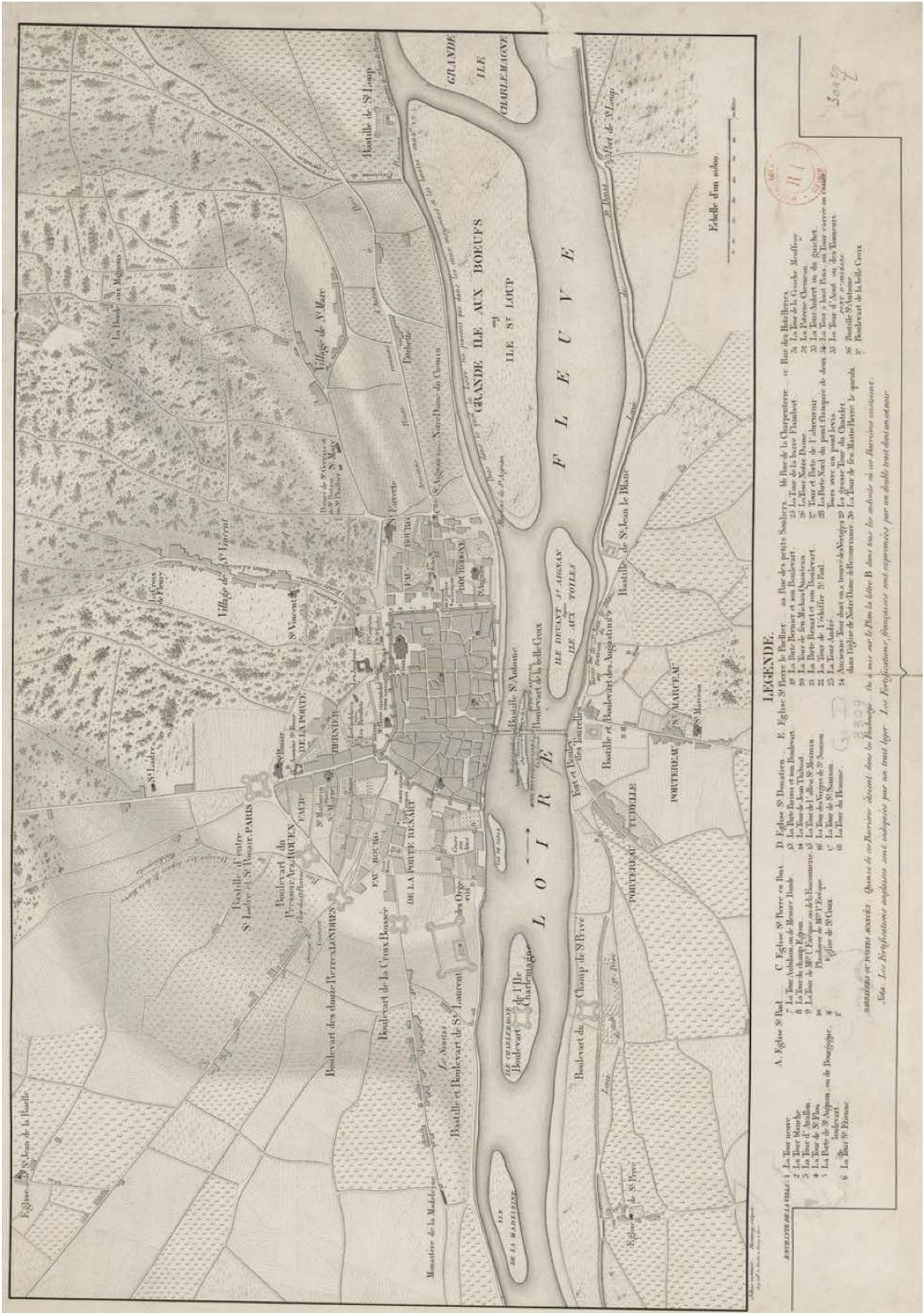
- Formation alluviale d'âge indifférencié
- Burdigalien : formation sablo-argileuse de Sologne et de l'Orléanais (peu perméable)
- Aquitanien : calcaire de Beauce (perméable)
- Calcaire de Beauce sous couverture alluviale
- Perte impénétrable
- Perte pénétrable (grotte)
- Perte pénétrable (aven)
- Émergence pérenne impénétrable
- Émergence pénétrable (grotte)
- Perte-émergence impénétrable
- Perte-émergence pénétrable
- Forage absorbant
- Forage A. E. P. (Alimentation en Eau Potable)
- Vallée peu fonctionnelle
- Liaison mise en évidence par traçage



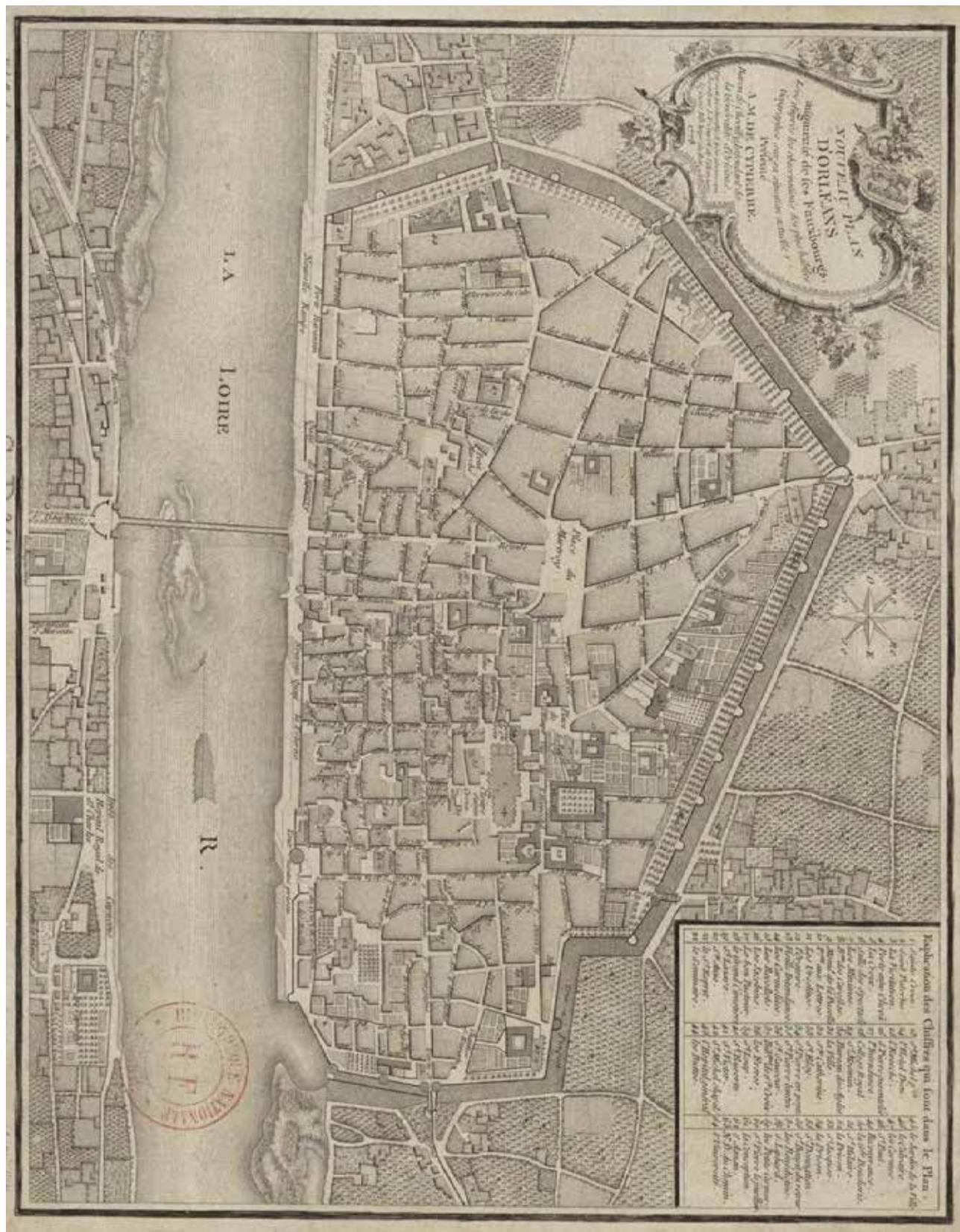
Avril 2000

Mise en évidence des circulations karstiques de la source du Loiret (d'après M. Lepiller et N. Jozja, 2010)

Annexe 5 : Cartes anciennes de la ville d'Orléans



Plan de la ville et du siège d'Orléans en 1428 (2^{ème} enceinte) (www.gallica.bnf.fr)



Plan de la ville en 1778 (4ème encense) (www.gallica.bnf.fr)

**Annexe 6 : Extrait de la loi du 13 juillet 1982, modifié le 22 juillet
1987 et du Décret d'application 90-918 du 11 octobre 1990**

Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles

Version consolidée au 11 août 2017

Article 1

Les contrats d'assurance, souscrits par toute personne physique ou morale autre que l'Etat et garantissant les dommages d'incendie ou tous autres dommages à des biens situés en France, ainsi que les dommages aux corps de véhicules terrestres à moteur, ouvrent droit à la garantie de l'assuré contre les effets des catastrophes naturelles sur les biens faisant l'objet de tels contrats.

En outre, si l'assuré est couvert contre les pertes d'exploitation, cette garantie est étendue aux effets des catastrophes naturelles, dans les conditions prévues au contrat correspondant.

Sont considérés comme les effets des catastrophes naturelles, au sens de la présente loi, les dommages matériels directs ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises.

L'état de catastrophe naturelle est constaté par arrêté interministériel.

Article 2

Les entreprises d'assurance doivent insérer dans les contrats visés à l'article 1er une clause étendant leur garantie aux dommages visés au troisième alinéa dudit article.

La garantie ainsi instituée ne peut excepter aucun des biens mentionnés au contrat ni opérer d'autre abatement que ceux qui seront fixés dans les clauses types prévues à l'article 3.

Elle est couverte par une prime ou cotisation additionnelle, individualisée dans l'avis d'échéance au contrat visé à l'article 1er et calculée à partir d'un taux unique défini par arrêté pour chaque catégorie de contrat. Ce taux est appliqué au montant de la prime ou cotisation principale ou au montant des capitaux assurés, selon la catégorie de contrat.

Les indemnisations résultant de cette garantie doivent être attribuées aux assurés dans un délai de trois mois à compter de la date de remise de l'état estimatif des biens endommagés ou des pertes subies, sans préjudice de dispositions contractuelles plus favorables ou de la date de publication, lorsque celle-ci est postérieure, de la décision administrative constatant l'état de catastrophe naturelle.

Article 3

Dans un délai d'un mois à compter de la date de publication de la présente loi, les contrats visés à l'article 1er sont réputés, nonobstant toute disposition contraire, contenir une telle clause.

Des clauses types réputées écrites dans ces contrats sont déterminées par arrêté avant cette date.

Article 4

A modifié les dispositions suivantes :

- Modifie Code des assurances - art. L431-3 (M)

Article 5

- Modifié par Ordonnance 2007-329 2007-03-12 art. 12 13° JORF 13 mars 2007 en vigueur au plus tard le 1er mars 2008

I -Paragraphe abrogé.

II - Les salariés résidant ou habituellement employés dans une zone touchée par une catastrophe naturelle peuvent bénéficier d'un congé maximum de vingt jours non rémunérés, pris en une ou plusieurs fois, à leur demande, pour participer aux activités d'organismes apportant une aide aux victimes de catastrophes naturelles.

En cas d'urgence, ce congé peut être pris sous préavis de vingt-quatre heures.

Le bénéfice du congé peut être refusé par l'employeur s'il estime qu'il aura des conséquences préjudiciables à la bonne marche de l'entreprise. Ce refus doit être motivé. Il ne peut intervenir qu'après consultation du comité d'entreprise ou d'établissement ou, à défaut, des délégués du personnel.

Article 5-1 (abrogé)

- Créé par Loi n°87-565 du 22 juillet 1987 - art. 43 JORF 23 juillet 1987
- Abrogé par Loi n°95-101 du 2 février 1995 - art. 18 JORF 3 février 1995

Article 6 (abrogé)

- Abrogé par Loi n°90-509 du 25 juin 1990 - art. 2 JORF 27 juin 1990 en vigueur le 1er août 1990

Article 7

Sont exclus du champ d'application de la présente loi les dommages causés aux récoltes non engrangées, aux cultures, aux sols et au cheptel vif hors bâtiment, dont l'indemnisation reste régie par les dispositions de la loi n° 64-706 du 10 juillet 1964 modifiée organisant un régime de garantie contre les calamités agricoles.

Sont exclus également du champ d'application de la présente loi les dommages subis par les corps des véhicules aériens, maritimes, lacustres et fluviaux ainsi que les marchandises transportées et les dommages visés à l'article L. 242-1 du code des assurances.

Les contrats d'assurance garantissant les dommages mentionnés aux alinéas précédents ne sont pas soumis au versement de la prime ou cotisation additionnelle.

Article 8

A modifié les dispositions suivantes :

- Modifie Code des assurances - art. L121-4 (V)

Article 9

A modifié les dispositions suivantes :

- Modifie Code des assurances - art. L111-2 (M)

Article 10

Les deux derniers alinéas de l'article L. 121-4 du code des assurances sont applicables aux contrats en cours nonobstant toute disposition contraire.

JORF n°238 du 13 octobre 1990

Décret no 90-918 du 11 octobre 1990 relatif à l'exercice du droit à l'information sur les risques majeurs, pris en application de l'article 21 de la loi no 87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs

NOR: PRME8961532D

Le Premier ministre,

Sur le rapport du ministre de l'intérieur et du ministre délégué à l'environnement et à la prévention des risques technologiques et naturels majeurs,

Vu le code de la construction et de l'habitation, notamment son article R.

123-2;

Vu le code du domaine public fluvial et de la navigation intérieure,

notamment ses articles 48 à 54;

Vu le code forestier, notamment son article L. 321-6;

Vu le code de l'urbanisme, notamment ses articles R. 111-3 et 443-7;

Vu la loi no 78-753 du 17 juillet 1978 modifiée portant diverses mesures d'amélioration des relations entre l'administration et le public et diverses dispositions d'ordre administratif, social et fiscal, notamment son article 6;

Vu la loi no 82-600 du 13 juillet 1982 modifiée relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles, notamment son article 5;

Vu la loi no 87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs, notamment ses articles 21 et 41;

Vu le décret du 20 octobre 1937 portant règlement d'administration publique pour l'application du décret-loi du 30 octobre 1935 sur le libre écoulement des eaux, modifié;

Vu le décret no 84-328 du 3 mai 1984 relatif à l'élaboration des plans d'exposition aux risques naturels prévisibles;

Vu le décret no 88-622 du 6 mai 1988 relatif aux plans d'urgence, pris en application de la loi no 87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs;

Le Conseil d'Etat (section des travaux publics) entendu,

Décète:

Art. 1er. - Le contenu et la forme des informations auxquelles doivent avoir accès, par application de l'article 21 de la loi du 22 juillet 1987 susvisée, les personnes susceptibles d'être exposées à des risques majeurs, ainsi que les modalités selon lesquelles ces informations sont portées à la connaissance du public, sont définis par le présent décret.

Art. 2. - Les dispositions du présent décret sont applicables dans les communes:

1o Où existe un plan particulier d'intervention établi en application du titre II du décret du 6 mai 1988 susvisé, ou un plan d'exposition aux risques naturels prévisibles établi en application du décret du 3 mai 1984 susvisé,

ou un plan des surfaces submersibles établi en application des articles 48 à 54 du code du domaine public fluvial et de la navigation intérieure, ou un périmètre délimité en application de l'article R. 111-3 du code de l'urbanisme;

2o Situées dans les zones particulièrement exposées à un risque sismique,

définies en application de l'article 41 de la loi du 22 juillet 1987 susvisée;

3o Particulièrement exposées à un risque d'éruption volcanique et figurant à ce titre sur une liste établie par décret;

4o Situées dans les régions ou départements mentionnés à l'article L. 321-6 du code forestier et figurant, en raison des risques d'incendies de forêt,

sur une liste établie par arrêté préfectoral;

5o Situées dans les départements de la Guadeloupe, de la Martinique et de la Réunion, en ce qui concerne le risque cyclonique.

Elles sont également applicables dans les communes désignées par arrêté préfectoral en raison de leur exposition à un risque majeur particulier.

Art. 3. - L'information donnée aux citoyens sur les risques majeurs auxquels ils sont soumis comprend la description des risques et de leurs conséquences prévisibles pour les personnes, les biens et l'environnement, ainsi que l'exposé des mesures de sauvegarde prévues pour limiter leurs effets.

Elle est consignée dans un dossier synthétique établi par le préfet et reprenant notamment les informations essentielles contenues dans les documents mentionnés à l'article 2. Sont exclues de ce dossier les indications susceptibles de porter atteinte au secret de la défense nationale ou aux secrets de fabrication, ainsi que celles de nature à faciliter des actes de malveillance ou à faire obstacle à l'application des mesures prévues dans les différents documents. Le dossier est transmis au maire avec les documents mentionnés à l'article 2.

Le maire établit un document d'information qui recense les mesures de sauvegarde répondant au risque sur le territoire de la commune, notamment celles de ces mesures qu'il a prises en vertu de ses pouvoirs de police. Il fait connaître au public l'existence du dossier synthétique et du document d'information par un avis affiché en mairie pendant deux mois.

Le dossier synthétique, le document d'information et les documents mentionnés à l'article 2 peuvent être librement consultés en mairie.

Le dossier synthétique et le document d'information sont tenus à jour.

Art. 4. - Les consignes de sécurité figurant dans le document d'information et celles éventuellement fixées par les exploitants ou les propriétaires des locaux et terrains mentionnés à l'article 6 sont portées à la connaissance du public par voie d'affiches.

Art. 5. - Les affiches prévues à l'article 4 sont conformes aux modèles arrêtés par les ministres chargés

de la sécurité civile et de la prévention des risques majeurs.

Art. 6. - Le maire organise les modalités de l'affichage dans la commune.
Lorsque la nature du risque ou la répartition de la population l'exige, cet affichage peut être imposé dans les locaux et terrains suivants:

1o Etablissements recevant du public, au sens de l'article R. 123-2 du code de la construction et de l'habitation, lorsque l'effectif du public et du personnel est supérieur à 50 personnes;

2o Immeubles destinés à l'exercice d'une activité industrielle, commerciale, agricole ou de service, lorsque le nombre d'occupants est supérieur à cinquante personnes;

3o Terrains aménagés permanents pour l'accueil des campeurs et le stationnement des caravanes soumis au régime de l'autorisation de l'article R.443-7 du code de l'urbanisme, lorsque leur capacité est supérieure soit à cinquante campeurs sous tente, soit à quinze tentes ou caravanes à la fois;

4o Locaux à usage d'habitation regroupant plus de quinze logements.

Dans ce cas, ces affiches, qui sont mises en place par l'exploitant ou le propriétaire de ces locaux ou terrains sont apposées, à l'entrée de chaque bâtiment, s'il s'agit des locaux mentionnés aux 1o, 2o et 4o de l'alinéa précédent et à raison d'une affiche par 5000 mètres carrés, s'il s'agit des terrains mentionnés au 3o du même alinéa.

Art. 7. - Le ministre d'Etat, ministre de l'économie, des finances et du budget, le ministre de l'intérieur, le ministre de l'industrie et de l'aménagement du territoire, le ministre de l'équipement, du logement, des transports et de la mer, le ministre délégué à l'environnement et à la prévention des risques technologiques et naturels majeurs, et le ministre délégué auprès du ministre de l'intérieur sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret, qui sera publié au Journal officiel de la République française.

**Annexe 7 : Extrait du journal de la République de Centre, paru le
mardi 9 mai 2017**

12 MARDI 9 MAI 2017 LA RÉPUBLIQUE DU CENTRE

dossier

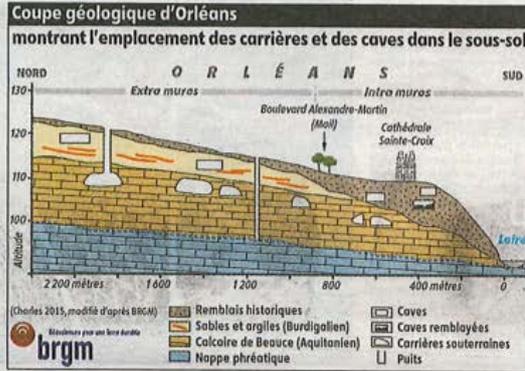
Sous vos pieds

La cité johannique dévoilée

On parle souvent du sous-sol orléanais comme d'un « gruyère ». La réalité est plus complexe. Surtout, peu de gens ont conscience de l'importance de ce monde souterrain, qui en dit long sur la ville d'aujourd'hui.

Marlon Bonnot
marlon.bonnot@centrefrance.com

Un labyrinthe de galeries souterraines qui serpenteraient sous Orléans, un tunnel creusé sous le fleuve royal, ou bien, comme le prétendait la rumeur en 1969, des femmes qui disparaissaient dans les cabines d'essayage par des trappes donnant accès à des caves, jusqu'à être exfiltrées par un sous-marin mouillant en Loire... Le sous-sol orléanais fait l'objet de bien des légendes et des fantasmies. La réalité est beaucoup plus terre à terre.



Pour répondre à cette question : « qu'y a-t-il sous nos pieds ? », nous nous sommes tournés, vers un géologue du Bureau des recherches géolo-

giques et minières (BRGM), organisme national spécialisé dans la question et qui plus est basé à Orléans.

Un peu d'Auvergne sous nos pieds...

Remontons le temps. Orléans, il y a 20 millions d'années, était recouvert par un vaste lac marécageux. Lequel lac, en se retirant, a laissé une couche

de calcaire lacustre : le calcaire de Beauce. On le retrouve sous tout le centre historique d'Orléans.

« Certains de ces blocs calcaires multimillénaires affleurent directement en surface, par exemple en bord de Loire ou dans le lit du fleuve, signale Nicolas Charles, géologue au BRGM. En ville, on peut l'observer dans les anciennes carrières souterrai-

nes. »
Au-dessus de ce calcaire de Beauce se trouve une couche de sable et d'argile. « Celle-ci s'est formée aux alentours de 16 millions d'années. Ces sables proviennent de l'érosion du Massif Central, transporté par des cours d'eau. » Il y a donc un peu d'Auvergne sous nos pieds !

Directement sous nos routes et nos places se trouve ce que le géologue nomme le « remblai historique », ou les « terrains anthropiques ». C'est la strate qui intéresse les archéologues, car elle est liée à l'activité humaine. « Elle se situe entre 0 et 9 mètres de profondeur », indique Thierry Massat, archéologue à l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap).

... mais pas de pétrole !

Au sud de la Loire, la nature du sous-sol est différente. « On est dans ce qu'on appelle le Val », détaille Nicolas Charles. Un terrain constitué d'alluvions de la Loire (sable et

bancs limoneux), propice à l'agriculture.

Ce sous-sol est-il riche en ressources ? Pourrait-on y dénicher du gaz ou, pourquoi pas, du pétrole ? La réponse est non. Le géologue est formel.

Les principales ressources contenues dans le sous-sol sont l'eau (la nappe de Beauce et la nappe alluviale) et le calcaire, utilisé pour les constructions.

Plusieurs centaines de carrières ont été recensées (lire par ailleurs). Elles ont été exploitées jusqu'au XIX^e siècle. Les poches d'argile, également, ont permis par le passé de fabriquer des briques, que l'on retrouve par exemple à l'hôtel Grosloir. L'île Charlemagne enfin est une ancienne carrière de sable.

« La population imagine peu à quel point notre vie quotidienne est liée au sous-sol, souligne Nicolas Charles, que ce soit dans l'organisation de la ville, les risques, mais aussi son architecture et son patrimoine historique. » Comme quoi les dessous, ça compte beaucoup !



« Il y a 20 millions d'années, la région était recouverte par un immense lac »

NICOLAS CHARLES Géologue au BRGM

Vivre avec le risque d'effondrement

Récemment, des habitants du quartier Saint-Marc ont eu la désagréable surprise de voir un fontis se former dans leur terrain : une cavité de 3 mètres de diamètre sur 10 mètres de profondeur.

Des centaines d'Orléanais vivent avec ce risque d'effondrement, sans parfois même le savoir. Une autre particularité du sous-sol orléanais est en effet de présenter des « cavités karstiques ». « L'eau de pluie, en s'infiltrant, dilue le calcaire et le creuse », décrit le géologue Nicolas Charles.



PEUR SOUS LA VILLE. Des cavités apparaissent souvent à l'occasion de travaux publics. ARCHIVES

Informez les habitants

À ces galeries naturelles s'ajoutent plus de 600 anciennes carrières et caves connues à ce jour. Certaines sont réparties sous le centre ancien et les faubourgs. Aucun secteur n'est épargné. Les salles de certaines de ces carrières peuvent mesurer jusqu'à 2.000 m².

De temps en temps, ces réseaux souterrains se rappellent aux bons souvenirs des Orléanais. À l'occasion de travaux pu-

blis ou d'affaissement de terrain chez des particuliers. Des phénomènes aussi imprévisibles que

dangereux. Pour tenter de mieux cerner les risques, la mairie a entrepris, en lien

Que faire en cas d'affaissement ?

Comment réagir, si une cavité se forme brusquement dans votre jardin ? Il faut avertir les pompiers si l'excavation présente un danger immédiat ou s'il y a des blessés, et prévenir la mairie. Si le trou se trouve à proximité de l'habitation : couper si possible l'eau, l'électricité et le gaz et quitter les lieux. Ne pas courir ni revenir sur ses pas. Ensuite, il conviendra de prendre contact avec votre assureur pour réaliser une déclaration de sinistre.

REPÈRES

VOCABULAIRE
Bîmes ou fontis : « Bîme » est le nom local donné au fontis dans le val d'Orléans. Elle désigne un effondrement de forme circulaire dû à l'effondrement d'une carrière souterraine ou d'une galerie karstique (source : Guide géologique du Val de Loire, de Nicolas Charles).

avec son service archéologique, le BRGM et le comité départemental de spéléologie entre autres, de recenser et de cartographier toutes ces cavités. Le travail est colossal.

« L'emplacement de certaines carrières est connu de longue date, mais on en ignore les dimensions, ou bien on en redécouvre les accès par hasard », explique Jean-Luc Front, président du Groupe d'amis spéléologues. D'autres ne sont tout simplement pas connues. L'an passé, par exemple, deux carrières ont été découvertes rue du Nécotin à l'Argonne, signale-t-il.

Le résultat de ce travail d'inventaire se trouve sur le site www.georisques.gouv.fr. « Le but est d'informer les habitants, notamment en cas de changement de propriété. »

« Moi, spéléologue... »

Les spéléologues sont souvent les premiers hommes à pénétrer dans une galerie naturelle ou une cave murée depuis des siècles.

Mais qu'est-ce qui peut bien pousser une personne raisonnable à vouloir s'enfoncer ainsi sous la surface de la terre ?

« Ce qui nous plaît, c'est le côté scientifique, et l'aspect découverte », répond Jean-Luc Front, du Groupe d'amis spéléologues.

L'explorateur orléanais évoque aussi la notion d'engagement, psychologique et physique. « On sait qu'il faudra forcément remonter à un moment donné » - et

l'« esprit d'équipe ».

Surtout, pour le spéléologue, ce sont les « paysages » souterrains sont aussi variés qu'en surface.

« Parfois on tombe sur des roches très blanches, avec des concrétions magnifiques qui scintillent, parfois sur des roches très mates, très noires. Les impressions sont totalement différentes. C'est vrai que ça peut paraître spécial comme attirance, mais on voit des choses que les autres ne voient pas ! »

➔ D'autres associations. Il existe d'autres associations locales de spéléologues : SSI (spéléologie subaquatique Loiret) et SNT (Society no telephone).



EXPLORATEUR. Jean-Luc Front a exploré sa première grotte à 12 ans, alors qu'il était en centre de vacances.

Sous vos pieds

dossier

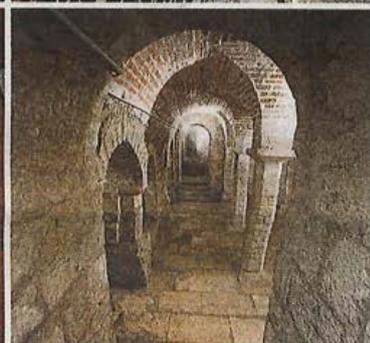
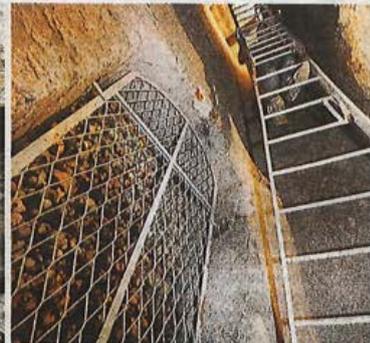
la beauté de ses dessous

EN BREF

Habitants. Toutes inhabitées les caves et carrières orléanaises ? Pas vraiment. Plusieurs d'entre elles servent de refuge aux chauves-souris. Les chiroptères font l'objet d'un suivi régulier de la part d'associations de protection de l'environnement.

Défense passive. À l'époque de la Seconde guerre mondiale, les caves orléanaises ont fait l'objet d'un inventaire, dans le cadre de la « défense passive ». L'objectif était qu'elles puissent servir d'abris en cas de bombardement. Sous le collège Anatole-Bailly (rue Jeanne-d'Arc) par exemple, « les numéros des classes sont encore peints sur les murs, pour indiquer aux élèves dans quelle partie ils devaient se rassembler », cite Sébastien Jesset, responsable du pôle archéologie de la ville d'Orléans.

Monument historique. Sous la préfecture (rue de Bourgogne), une cave-carrière du 13^e-14^e siècle est classée Monument historique. Comportant des loges latérales et des voûtes d'ogives, elle est l'archétype des caves-carrières orléanaises, explique Sébastien Jesset.



PATRIMOINE. De haut en bas et de gauche à droite : une ancienne carrière du 13^e-14^e siècle située sous le centre Charles-Péguy, les catacombes sous l'église Notre-Dame-des-Miracles, la porte Bannier, sous la place du Martroi, et la crypte Saint-Avit, située sous l'emprise du collège Jeanne-d'Arc.

Sur les traces de nos ancêtres

Bien sûr, Orléans n'est pas Rome mais quand même, « quand on creuse, on trouve des choses intéressantes », souligne Thierry Massat, directeur adjoint scientifique et technique de l'Inrap.

« Avant les années 1940 et l'apparition de la pelle mécanique, les gros travaux d'évacuation des gravats devaient se faire manuellement, donc on préférait reconstruire par-dessus. Plus on se situe dans le centre historique et plus la couche archéologique est épaisse. On peut retenir cette image de plusieurs villes qui se superposent », suggère l'archéologue.

Un sous-sol riche en vestiges

Plusieurs villes qui se succèdent sur l'échelle du temps et du sol avec, chacune, ses quartiers d'habitats, ses institutions, édifices religieux, aqueducs, voies de circulation, murs d'enceinte, fortifications, nécropoles, etc. C'est ce puzzle en trois dimen-



FOUILLES. Les archéologues de la ville sont en train de mener des fouilles à côté du lycée Saint-Euverte. PHOTO ERIC AMALOF

sions qu'essaient de reconstituer les archéologues, tentant de déjouer les « pièges » du sous-sol. « Par exemple, la ville gauloise se situe à moins 7 mètres sous la cathédrale mais directement sous le cinéma place de la Loire, indique Thierry Massat. Les autres niveaux ont été arasés. » Depuis plus d'un siècle, de nombreux sites ont été fouillés à Orléans. Et les archéologues commen-

cent à connaître beaucoup de choses sur l'Orléans gaulois, romain, médiéval. Mais il reste encore bien des mystères à percer. « Nous n'avons pas encore trouvé la limite nord de la ville gauloise. Le forum romain, qui se trouve sous le secteur de la cathédrale et de la préfecture, est mal connu. Tout comme on sait peu de chose sur les premiers temps de la christianisation, énumère Thierry Massat. On n'a pas

réussi, également, à identifier clairement les nécropoles antiques qui ceinturaient la ville. » On le voit, le travail est loin d'être terminé et le sous-sol n'a pas encore fini de faire parler de lui !

Pour en savoir plus. Deux portails Internet recensent les découvertes archéologiques réalisées à Orléans : celui de l'Inrap (multimedia.inrap.fr/orleans/orleans) et celui du pôle archéologique de la ville (larcheologie.orleans-metropole.fr).

DES TRÉSORS ARCHÉOLOGIQUES



Gobelet dit « de Tating »
Ce tesson de terre cuite a été découvert sur le site du parking du Cheval-rouge en 2012. Caractéristique des VIII^e et IX^e siècles, cette précieuse céramique a été mise en évidence uniquement à trois reprises sur le territoire français.



Statuette de Mercure
Cette statuette de Mercure en bronze vient d'être mise au jour sur le site du lycée Saint-Euverte. Les fouilles en cours ont révélé l'existence d'un quartier d'habitation assez cossu du I^{er} et II^e siècles et une nécropole gallo-romaine.



Chaussures à la poulaïne
Ces fragments de chaussures en cuir ont été retrouvés dans le comblement du fossé du boulevard médiéval de la porte Bannier, actuelle place du Martroi. Ils sont datés du XV^e siècle. Un cordonnier, Guillaume Le Fons, officiait à proximité de la porte.

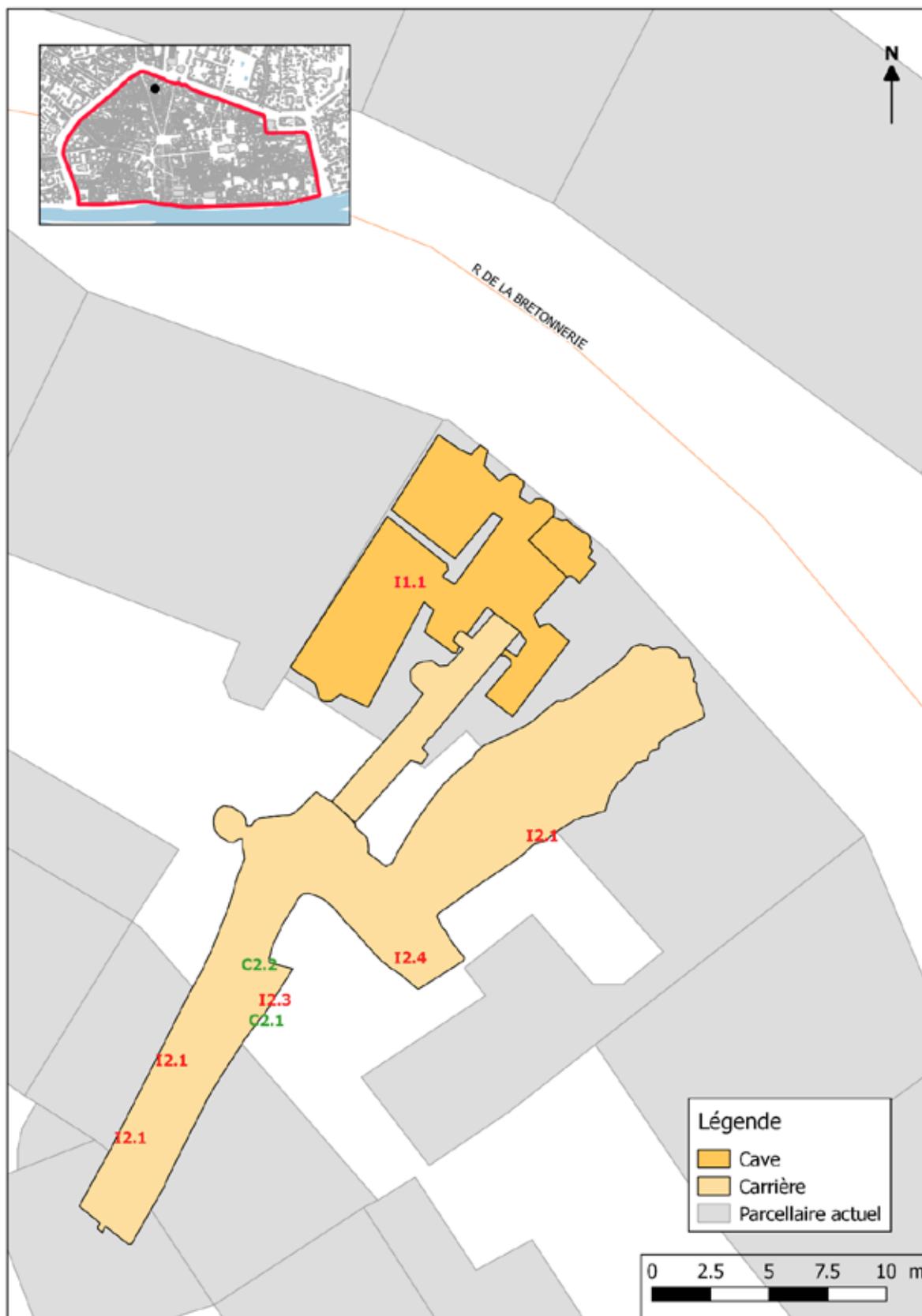


Bolles de jeu de paume
Ces trois bolles de jeu de paume, ou « esteufs », ont été découvertes au fond d'un trou, à l'occasion de l'étude de la façade du 8, rue des Gobelets. Elles sont datées très largement entre le XIV^e et le XVIII^e siècles.

**Annexe 8 : Cave-carrière du 55 rue de la Bretonnerie : fiche
descriptive, relevé ZEB-REVO et photographies**

Auteur : N. Froidevaux	Date : 03/04/2017	N° cavité : 1 Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire : 55 rue de la Bretonnerie 45000 Orléans
<p style="text-align: center;"><u>Généralités</u></p> Type d'accès : Escalier Utilisation d'origine : Extraction de calcaire Utilisation ancienne : Utilisation actuelle : Aucune Date de création : Fin 18ème siècle Niveau : Second Niveau de sous-sol Nombre d'étages : 1 étage Superficie : 142,4 m ² Hauteur des vides : 2,6 m Epaisseur de recouvrement : 14,2 m Géologie : Calcaire de Beauce Piliers : <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Nombre de piliers :		<p style="text-align: center;"><u>Diagnostic</u></p> Etat général : <input checked="" type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais Instabilités observées : Effacement localisé des parois. Roches d'argiles Ancienne rampe de visite Humidité (escaliers et parois localisées de la carrière). Argile charnière au mur entièrement maçonné Confortement : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Type de confortement : Escalier maçonné dans des galeries maçonnées en partie. Une console pas tous les murs. Daignerie complète d'un mur qui semble soutenir et conforter une zone instable Mode d'occupation en surface : Habitation, court-à-longeur de l'immeuble Désordres en surface : Aucun	
Commentaires : Réalisation d'un relevé au ZEB - FARO Probable solution de la galerie via des poutres de bois (en milieu de galerie, anciens soutènements)			

Fiche descriptive de la cave-carrière du 55 rue de la Bretonnerie



*Emprise de la cave-carrière du 55 rue de la Bretonnerie montrant les informations importantes (I) et les confortements (C).
Obtenu grâce au relevé du ZEB-REVO.*



Présence d'argiles derrière un mur maçonné (I2.3)



Mur maçonné dans la carrière (C2.2)



Résidus de roche provenant de l'effritement des parois de la carrière (I2.1)



Mur maçonné qui semble protéger une zone instable (C2.1)



Fissure le long d'un pilier maçonné de la cave (I1.1)



Concrétion de calcaires résultant d'un écoulement d'eau (I2.4)

Annexe 9 : Cave-carrière du 4 rue Coligny (Crypte Saint-Serge et Bacchus) : fiche descriptive, croquis et photographie

Auteur : N. Froidevaux	Date : 05/09/2017	N° cavité : 2 Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire : 4 Rue Coligny 45 000 Orléans
<h3 style="text-decoration: underline;">Généralités</h3> Type d'accès : Escaliers Utilisation d'origine : Cave Utilisation ancienne : Cave Utilisation actuelle : Cave Date de création : Restauration au 19 ^e - 19 ^e siècle Niveau : Premier niveau de sous-sol Nombre d'étages : 1 étage Superficie : 7 m ² Hauteur des vides : 4 m Epaisseur de recouvrement : 0 m Géologie : Aucune géologie observable Piliers : <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Nombre de piliers :		<h3 style="text-decoration: underline;">Diagnostic</h3> Etat général : <input type="checkbox"/> Bon <input checked="" type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais Instabilités observées : Effondrement récent d'un cloison de l'arc constituant l'entrée de la cave le reste de l'arc menacé de s'effondrer le reste de la cave est sain Confortement : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Type de confortement : Cave entièrement maçonnée Mode d'occupation en surface : Cave Désordres en surface : Aucun	
Commentaires : Présence d'un escalier menant à la crypte saint Sene et Bacchus Appareilatif car non meuble			

Fiche descriptive de la cave du 4 rue Coligny

Auteur :
A. Freudenreich

Date :
05/04/2017

N° cavité : 2
Si complexe, n° sous-cavité :

Adresse et propriétaire : 4 Rue Celiguy
45000 Orléans

Généralités

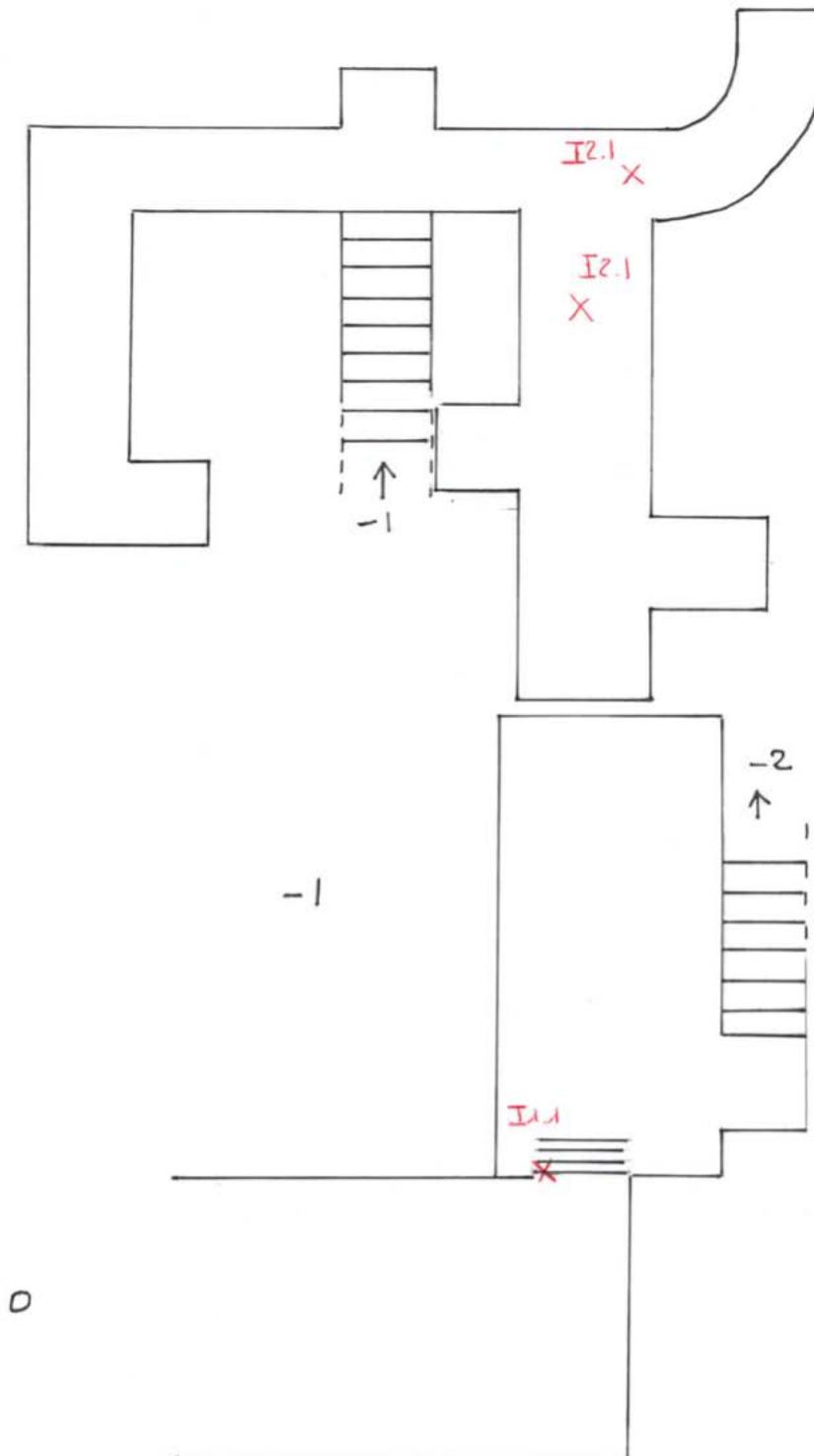
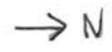
Type d'accès : Escaliers.....
 Utilisation d'origine : Extraction de calcaire.....
 Utilisation ancienne :
 Utilisation actuelle :
 Date de création : Antérieur au 13^e - 19^e siècle.....
 Niveau : Second niveau de sous-sol.....
 Nombre d'étages : 1 étage.....
 Superficie : 1.....
 Hauteur des vides : 2 m.....
 Epaisseur de recouvrement : 3, 3 m.....
 Géologie : Aucune géologie cherchée.....
 Piliers : Oui Non
 Nombre de piliers : 1.....

Diagnostic

Etat général : Bon Moyen Mauvais
 Instabilités observées : Humidité localisée et
 limitée à quelques parties du ciel de
 la cave.....
 Rése. Pratique affectant une partie
 d'un mur.....
 Confortement : Oui Non
 Type de confortement : Carrière entièrement
 maçonnée (parois, ciel).....
 la maçonnerie date du 13^e - 14^e siècle.....
 Mode d'occupation en surface : Jardin et
 habitat proche.....
 Désordres en surface : Aucun.....

Commentaires : Carrière connue sous le nom de Crypte Saint-Serge et Bacchus.....
 Apparemment car on mesure.....

Fiche descriptive de la carrière du 4 rue Celiguy (dite Crypte Saint-Serge et Bacchus)



Croquis de la cave-carrière du 4 rue Coligny (échelle non respectée)



Effondrement de plusieurs claveaux de l'arc constituant l'entrée de la cave (11.1)



Débris des claveaux tombés au sol montrant que le phénomène est récent et encore actif (11.1)



Trace d'humidité au ciel maçonné de la carrière (12.1)

Annexe 10 : Cave-carrière du 11 rue du Tabour (Centre Charles Péguy) : fiche descriptive, relevé ZEB-REVO et photographies

Auteur :
N. Froidevaux

Date :
06/04/2017

N° cavité : 3
SI complexe, n° sous-cavité :

Adresse et propriétaire : Centre Charles Péguy
11 rue du Tabour - 45000 Orléans

Généralités

Type d'accès : Escaliers
 Utilisation d'origine : Extraction de calcaire
 Utilisation ancienne : Visite touristique
 Utilisation actuelle : Aucune
 Date de création :
 Niveau : Second niveau de sous sol
 Nombre d'étages : 1 étage
 Superficie : $\approx 935,6 \text{ m}^2$
 Hauteur des vides : 9,6 m
 Epaisseur de recouvrement : 10 m
 Géologie : Calcaire de Beauce
 Piliers : Oui Non
 Nombre de piliers : 3

Diagnostic

Etat général : Bon Moyen Mauvais
 Instabilités observées : Roche d'argile, sablaise
 perches d'argiles, fosse anthropique,
 moulins sulfureux et vacuolaire dans
 un réseau de la galerie souterraine
 Réseau d'écoulement de puit (niveau)
 Humidité au sol
 Confortement : Oui Non
 Type de confortement : Ne pas venir plus car
 mureaux accolés d'une partie des murs de
 la cavité
 Murets d'argiles
 ciel maçonné
 Mode d'occupation en surface : Bâtiment et cour
 extérieure du Centre Charles Péguy
 Désordres en surface : Aucun désordre observé

Commentaires : Réalisation d'un relevé au ZER-REVO
 cette cavité a été choisie pour réaliser une comparaison entre les sections ZER-REVO et FRAO
 focus 3D

Fiche descriptive de la cave-carrière du 11 rue du Tabour (Centre Charles Péguy)



Emprise de la cave-carrière du 11 rue du Tabour montrant les informations importantes (I) et les confortements (C). Obtenu grâce au relevé du ZEB-REVO.



Ancienne fosse anthropique (12.3)



Poche d'argile sableuse (12.1)



Meulière siliceuse vacuolaire (12.4)



Poche d'argileuse avec un peu de sable (12.2)



Probable effondrement de puit (12.6)



Poche d'argile avec un peu de sable (12.5)



Trace d'humidité au sol de la carrière (I2.7)



Maçonnerie des parois de la carrière (C2.1)



Reprise récente d'une maçonnerie de la carrière (C2.1)

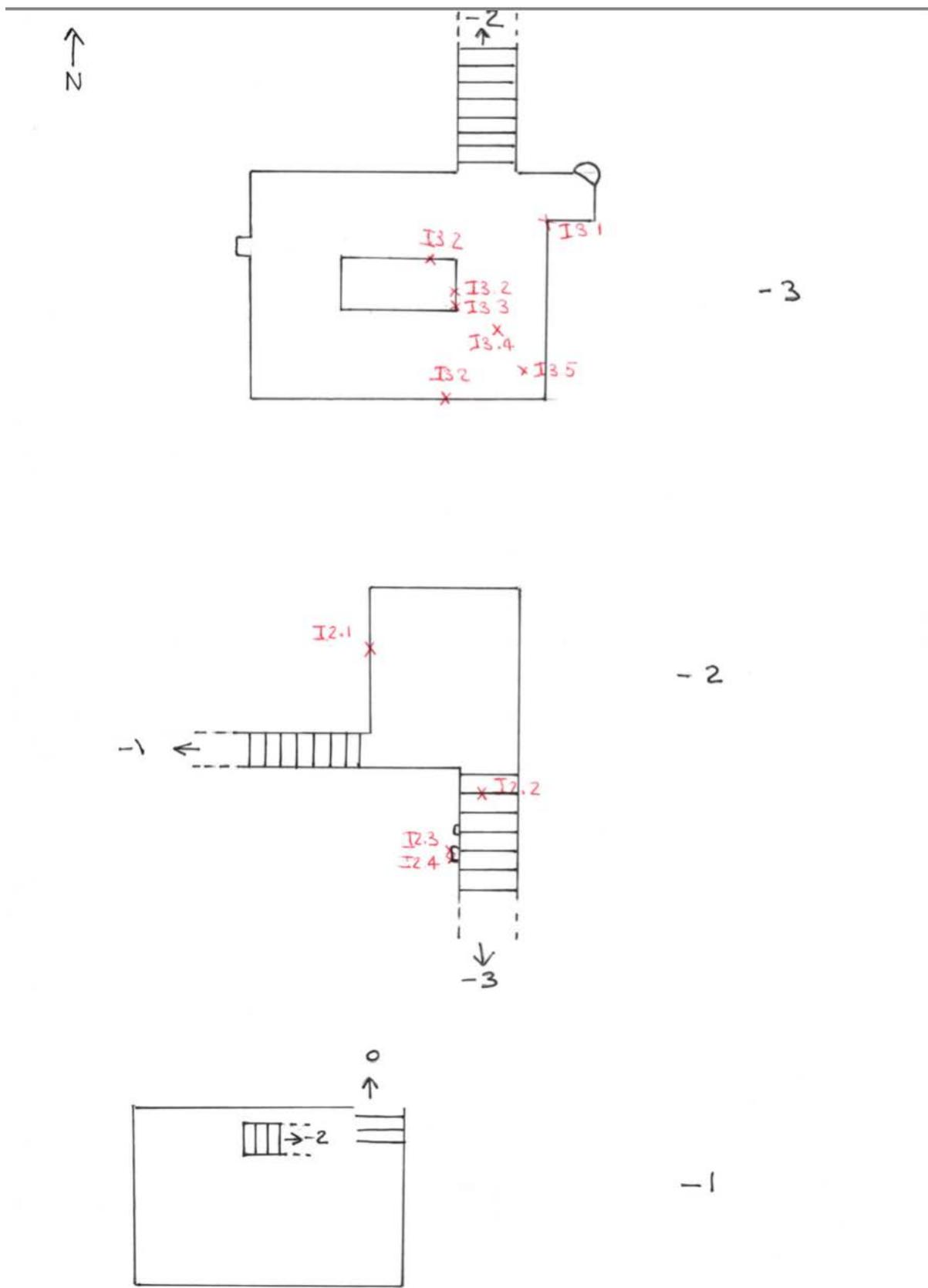


Confortement récent en brique (C2.2)

**Annexe 11 : Cave-carrière du 21 rue Saint-Étienne (Rectorat de
l'Académie Orléans-Tours) : fiche descriptive, croquis et
photographies**

Auteur : N. Froidoux	Date : 07/04/2017	N° cavité : (SICAVOR 130) 4 Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire : Rectorat Académie Orléans-Tours - 21 rue Saint Etienne 45000 Orléans
<h3 style="text-align: center; color: red;">Généralités</h3> Type d'accès : Escalier Utilisation d'origine : Extraction de calcaire Utilisation ancienne : Utilisation actuelle : Aucune Date de création : 13 ^e siècle probablement Niveau : Troisième Niveau de sous-sol Nombre d'étages : 1 étage Superficie : 1 Hauteur des vides : 2m 50 Epaisseur de recouvrement : 9,3m Géologie : Calcaire de Beauce Piliers : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Nombre de piliers : 1			<h3 style="text-align: center; color: red;">Diagnostic</h3> Etat général : <input checked="" type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais Instabilités observées : Portier qui se retire facilement (protonome localise), pontons et poutres d'acier au ciel de la cave (localisés), fissuration d'un niveau dans les escaliers Humidité (localisée dans les escaliers) Confortement : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Type de confortement : Une partie des murs de la cave sont maçonnés avec des arcs pour soutenir le ciel de la cave Escalier maçonné Mode d'occupation en surface : Bâtiment et cave du rectorat Désordres en surface : Aucun désordre observé
Commentaires : Approximatif car non mesuré			

Fiche descriptive de la cave-carrière du 21 rue Saint-Etienne (Rectorat de l'Académie Orléans-Tours)



Croquis de la cave-carrière du 21 rue Saint-Etienne (échelle non respectée)



Ligne de séparation entre le substrat géologique et le substrat anthropique (I2.3)



Fissure du linteau de la niche présente dans l'escalier menant à la carrière (I2.4)



Altération du mortier servant à lier plusieurs blocs entre eux, servant de soutènement dans la carrière (I3.1)



Calcaire à pâte argileuse. De petits blocs de calcaires peuvent se retirer facilement (I3.2)



Poche d'argile (I3.3)

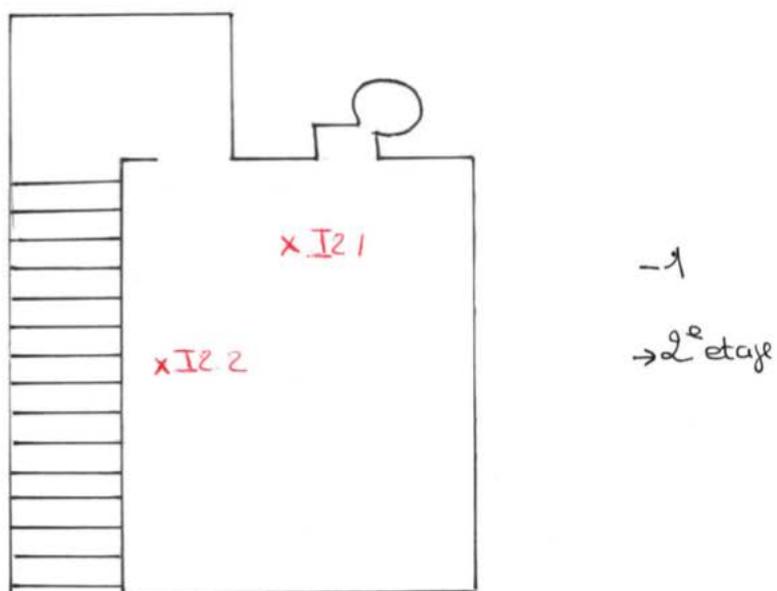
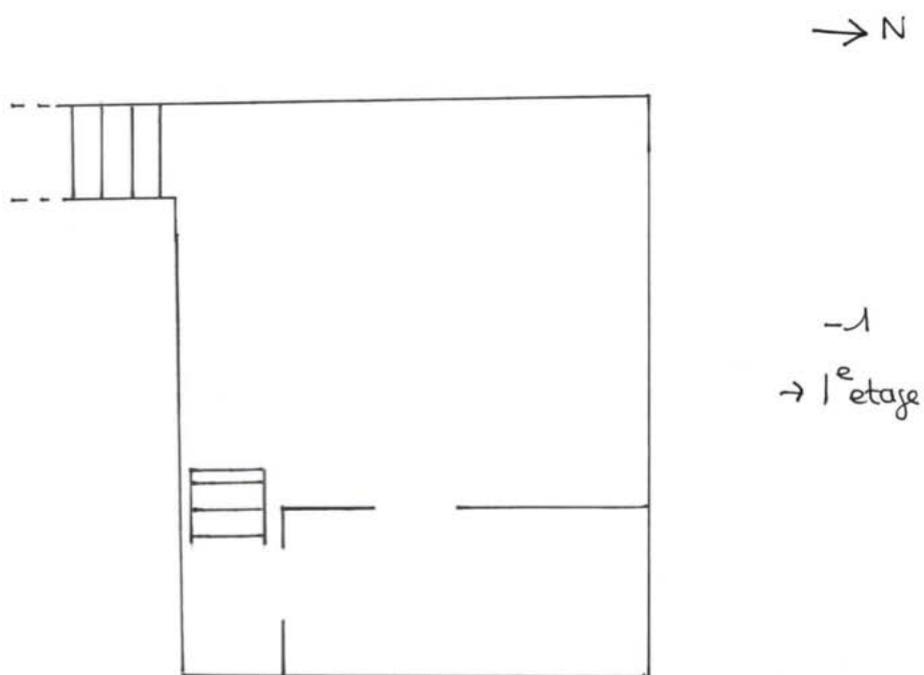


Maçonnerie recouvrant toutes les parois de la carrière

**Annexe 12 : Cave du 9 Cloître Saint-Aignan : fiche descriptive,
croquis et photographies**

Auteur : N. Frodevaux	Date : 12/04/2017	N° cavité : 5 Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire : 9 Cloître Saint-Aignan 45000 Orléans
<h3 style="text-align: center; color: red;">Généralités</h3> Type d'accès : Escaliers Utilisation d'origine : Cave Utilisation ancienne : Cave Utilisation actuelle : Cave Date de création : Niveau : Premier niveau de sous-sol Nombre d'étages : 2 étages Superficie : Hauteur des vides : Etage 1 : 2m50 ⁰ Etage 2 : 2m50 ⁰ Epaisseur de recouvrement : 9,1 m Géologie : Aucune géologie observable Piliers : <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Nombre de piliers :		<h3 style="text-align: center; color: red;">Diagnostic</h3> Etat général : <input checked="" type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais Instabilités observées : Deuxième étage : présence d'un trou au sol de la cave (peut être peu profond) ; Nageoire qui s'écaille (phénomène local) Confortement : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Type de confortement : Premier étage : mur bétonné ; plafond couvert de briques au dessus ; poutres de poutres ; Deuxième étage : masureaux aux parois et au plafond Mode d'occupation en surface : Habitation Désordres en surface : Aucun désordre observé	
Commentaires : Approximatif car non mesuré			

Fiche descriptive de la cave du 9 Cloître Saint-Aignan



Croquis de la cave du 9 Cloître Saint-Aignan (échelle non respectée)



Deuxième étage de la cave



Trou au sol du second étage de la cave (I2.1)



Effritement localisé de la maçonnerie du plafond du second étage de la cave (I2.2)



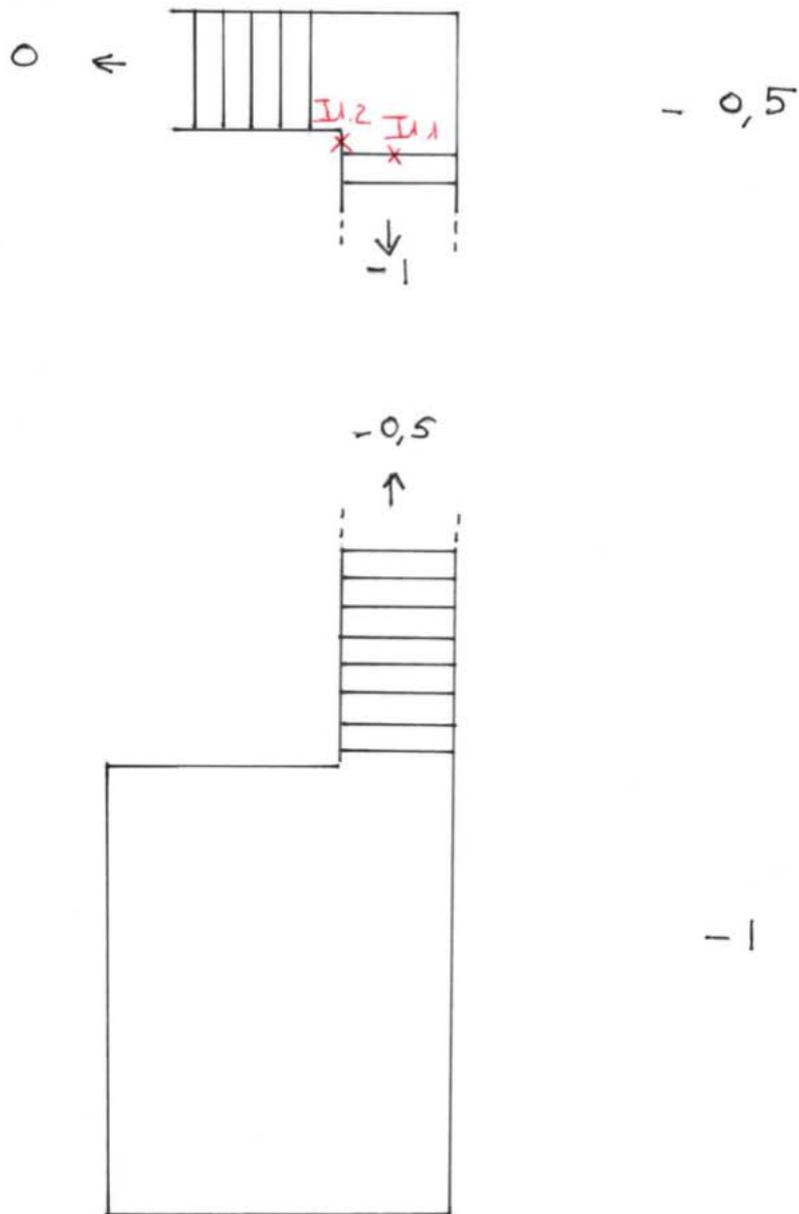
Maçonnerie des parois de la cave

**Annexe 13 : Cave du 4ter rue des 4 fils Aymon : fiche descriptive,
croquis et photographies**

Auteur : <i>N. Froidevaux</i>	Date : <i>24/04/2017</i>	N° cavité : <i>6</i> Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire : <i>4ter Rue des 4 fils Aymon 45000 Orléans</i>
<p style="text-align: center;"><u>Généralités</u></p> Type d'accès : <i>Escalier</i> Utilisation d'origine : <i>Cave</i> Utilisation ancienne : <i>Cave</i> Utilisation actuelle : <i>Cave</i> Date de création : Niveau : <i>Premier niveau de sous-sol</i> Nombre d'étages : <i>1 étage</i> Superficie : Hauteur des vides : <i>3.m</i> Epaisseur de recouvrement : <i>0.m</i> Géologie : <i>Aucune géologie observable</i> Piliers : <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Nombre de piliers :		<p style="text-align: center;"><u>Diagnostic</u></p> Etat général : <input checked="" type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais Instabilités observées : <i>Effacement murure et très localisés de la paroi dans les escaliers</i> Confortement : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Type de confortement : <i>Cave entièrement maçonnerie</i> Mode d'occupation en surface : <i>Habitation</i> Désordres en surface : <i>Aucun désordre observé</i>	
Commentaires : <i>Approximatif car non mesuré</i>			

Fiche descriptive de la cave du 4ter rue des 4 fils Aymon

N ←



Croquis de la cave du 4ter rue des 4 fils Aymon (échelle non respectée)



Vue générale de la cave



Effritement localisé de la maçonnerie du mur (11.2)

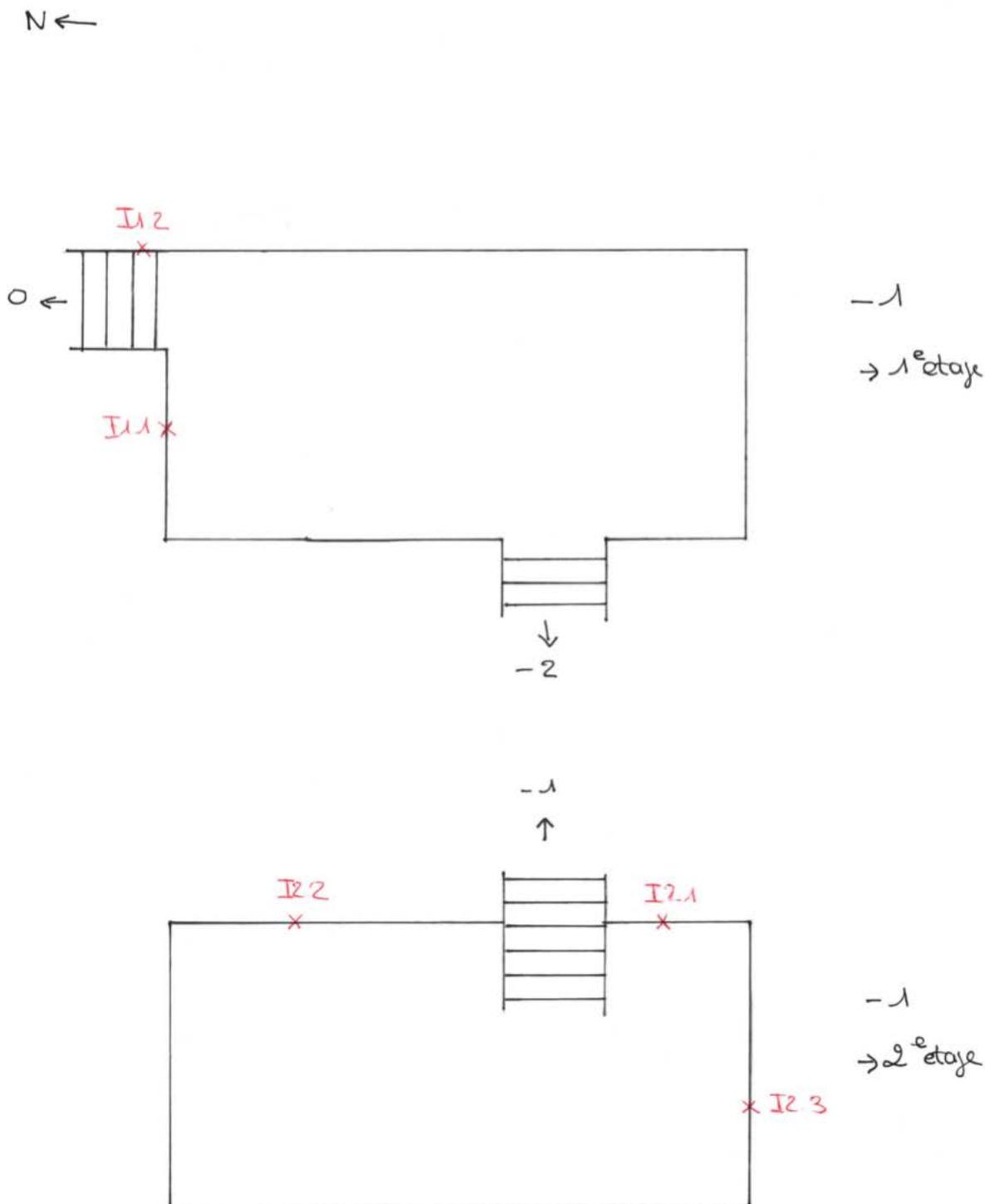


Effritement localisé de la maçonnerie du plafond de la cave (11.2)

**Annexe 14 : Cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor : fiche
descriptive, croquis et photographies**

Auteur : N. Froidevaux	Date : 25/04/2017	N° cavité : 7 Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire : 26 rue des Ormes Saint - Victor. 45000 Orléans
<p style="text-align: center;"><u>Généralités</u></p> Type d'accès : Escalier Utilisation d'origine : Cave Utilisation ancienne : Cave Utilisation actuelle : Cave Date de création : 18 ^e - 19 ^e siècle Niveau : Premier niveau de sous-sol Nombre d'étages : 2 étages Superficie : Hauteur des vides : 1 ^{er} étage : 2m50 2 ^e étage : 4m Epaisseur de recouvrement : 0,4m Géologie : Aucune géologie observable Piliers : <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Nombre de piliers :			<p style="text-align: center;"><u>Diagnostic</u></p> Etat général : <input checked="" type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais Instabilités observées : Effritement plus ou moins prononcé de certaines parties des deux étages de cave Confortement : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Type de confortement : des deux étages tout entièrement maçonné Mode d'occupation en surface : Habitation Désordres en surface : Aucun désordre observé
Commentaires : A l'origine les deux étages de cave étaient probablement séparés car appartenant à deux parcelles distinctes lors de la construction de la nouvelle bâtisse, les deux caves ont probablement été assemblées via un escalier			

Fiche descriptive de la cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor



Croquis de la cave du 26 rue des Ormes Saint-Victor (échelle non respectée)



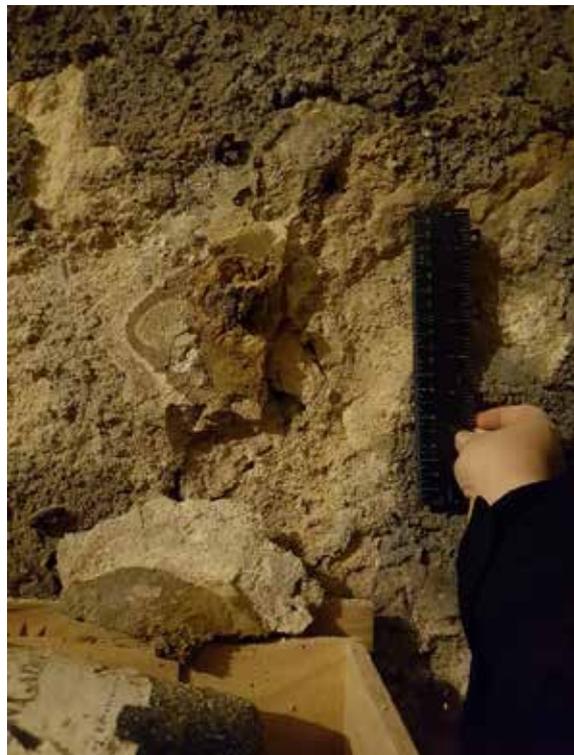
Effritement localisé de la maçonnerie du premier étage de cave (11.1)



Effritement prononcé de la maçonnerie du second étage de cave (12.1)



Effritement de la maçonnerie du second étage de cave (12.2)



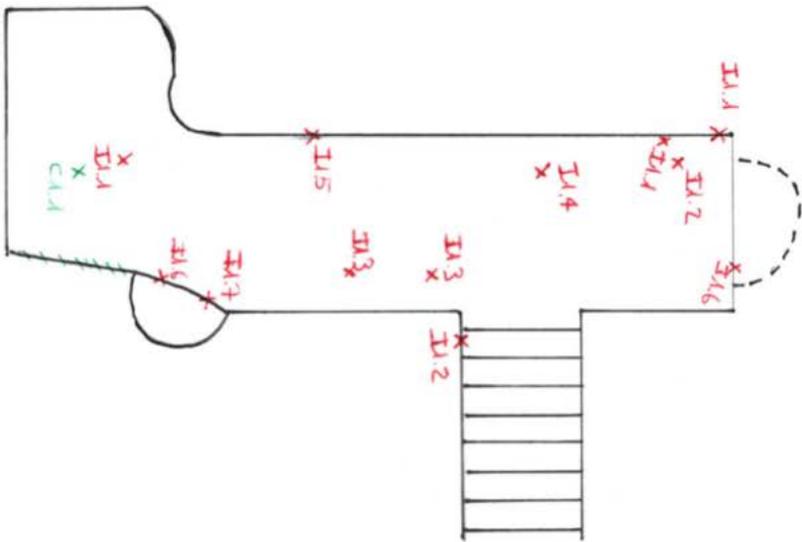
Désolidarisation d'un petit bloc de la maçonnerie du second étage de cave (12.3)

**Annexe 15 : Carrière du 11 rue des Aydes : fiche descriptive,
croquis et photographies**

Auteur : <i>N. Frodevaux</i>	Date : <i>16/05/2017</i>	N° cavité : <i>(Hors SICAVOR) 8</i> Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire : <i>11 Rue des Aydes - 45 000 Orléans</i>
<p style="text-align: center;"><u>Généralités</u></p> Type d'accès : <i>Escalier</i> Utilisation d'origine : <i>Extraction de calcaire</i> Utilisation ancienne : Utilisation actuelle : <i>Cave</i> Date de création : <i>18^e - 19^e siècle</i> Niveau : <i>Premier niveau de sous-sol</i> Nombre d'étages : <i>1 étage</i> Superficie : <i>1</i> Hauteur des vides : <i>2,5 m</i> Epaisseur de recouvrement : <i>4,7 m</i> Géologie : <i>Calcaire de Beauce</i> Piliers : <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Nombre de piliers : <i>1</i>		<p style="text-align: center;"><u>Diagnostic</u></p> Etat général : <input checked="" type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais Instabilités observées : <i>lentilles et piches d'argiles</i> <i>traces d'humidité et racines</i> <i>fixation d'une partie de la maçonnerie d'un puit</i> <i>Présence possible d'une fosse anthropique ?</i> Confortement : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Type de confortement : <i>Maçonnerie dans les escaliers</i> <i>sur de confortement en fond de cave</i> Mode d'occupation en surface : <i>pedun + terrasse</i> Désordres en surface : <i>Aucun désordre observé</i>	
Commentaires : <i>approximatif car non mesuré</i>			

Fiche descriptive de la carrière du 11 rue des Aydes

2 →



Croquis de la carrière du 11 rue des Aydes (échelle non respectée)



Ancienne fosse anthropique, aujourd'hui maçonnée (I1.4)



Mur maçonné



Poche d'argile, en partie, débourrée (I1.2)



Fissuration dans la maçonnerie du puit (I1.7)



Poche d'argile (I1.1)



Présence de racines (I1.5)

**Annexe 16 : Cave-carrière 20 Place Croix-Morin : fiche
descriptive, relevé ZEB-REVO et photographies**

Auteur : N. Froidevaux

Date : 05/07/2017

N° cavité : 9
Si complexe, n° sous-cavité :

Adresse et propriétaire : 20 Place de la Croix-Morin
45000 Orléans

Généralités

Type d'accès : Escaliers

Utilisation d'origine : Extraction de calcaire

Utilisation ancienne : ?

Utilisation actuelle : Aucune

Date de création :

Niveau : Second niveau de sous-sol

Nombre d'étages : 1

Superficie : 2 195,5 m²

Hauteur des vides : 2,8 m

Epaisseur de recouvrement : 8,5 m

Géologie : Calcaire de Beauce

Piliers : Oui Non

Nombre de piliers : 2

Diagnostic

Etat général : Bon Moyen Mauvais

Instabilités observées : Montées de cloches de foyers à proximité d'un puit, en milieu de carrière et en fin de carrière (trous actifs), élargissement de la base d'un puit, fissuration de la maçonnerie d'un puit, altération précoce du calcaire dans une zone localisée de la carrière, effacement du calcaire

Confortement : Oui Non

Type de confortement : Puits et escaliers maçonnés, maçonnerie au niveau d'un mur, mais possible rôle de séparation de la carrière pour respecter les limites parcellaires

Mode d'occupation en surface : Une partie de l'habitation + cour

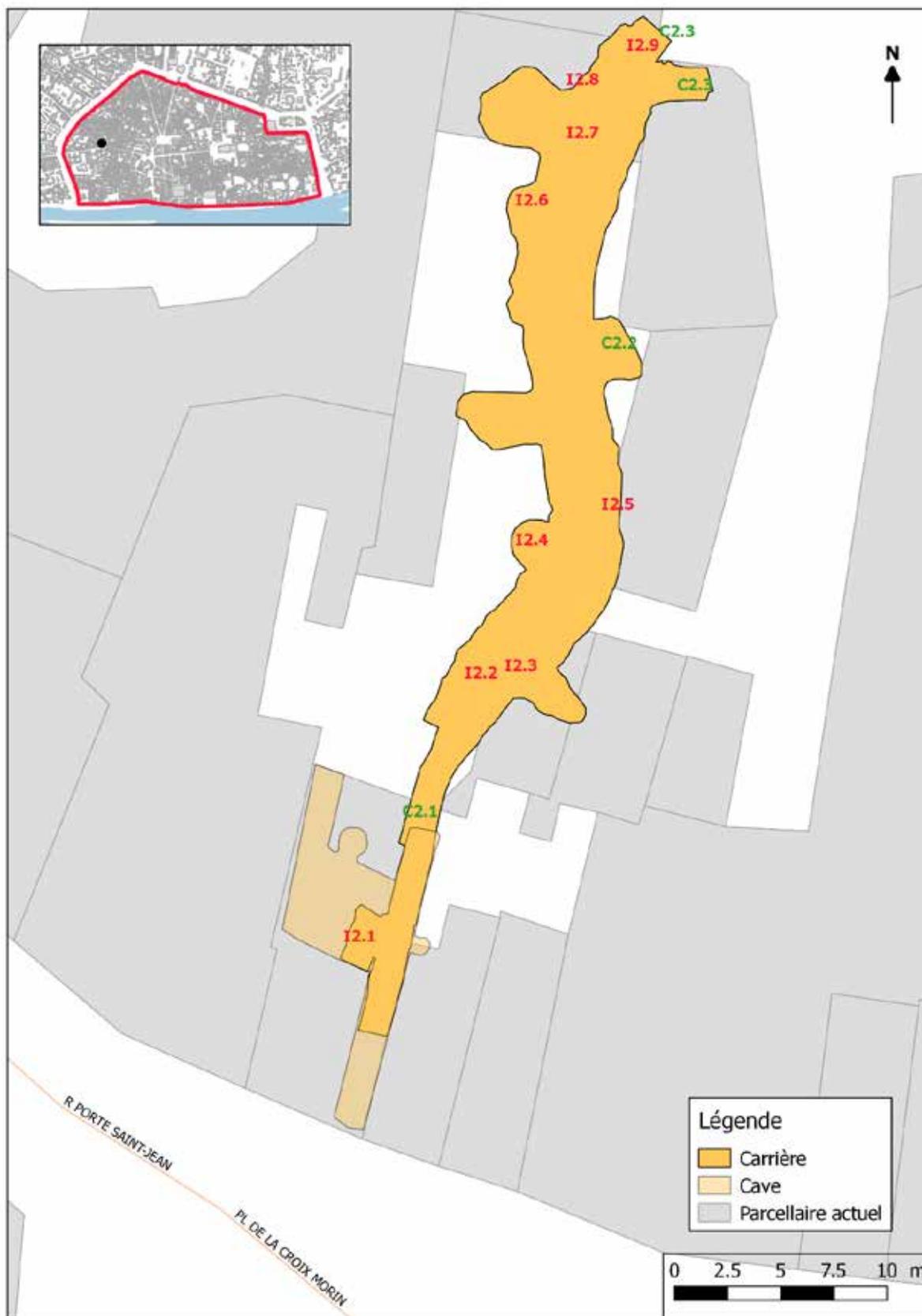
Désordres en surface : 2

Commentaires : Réalisation d'un relevé au ZEB - REVO

.....

.....

Fiche descriptive de la cave-carrière du 20 Place de la Croix-Morin



Emprise de la cave-carrière du 20 Place de la Croix-Morin montrant les informations importantes (I) et les confortements (C). Obtenu grâce au relevé du ZEB-REVO.



Remontée de la cloche de fontis, à l'aplomb d'un puisard (I2.2)



Elargissement de la base d'un puisard (I2.4)



Présence d'une canalisation dans le calcaire altéré (I2.1)



Fissure de la maçonnerie du puisard (I2.3)



Altération du calcaire très prononcée : argile avec nodules de carbonates (I2.1)



Débris de la remontée de cloche de fontis (I2.2)



Restes de maçonnerie à l'intérieur du puits (12.4)



Poche de sable (12.5)



Base abîmée du second puits de la carrière (12.6)



Fissure au niveau de la maçonnerie du second puits (12.6)



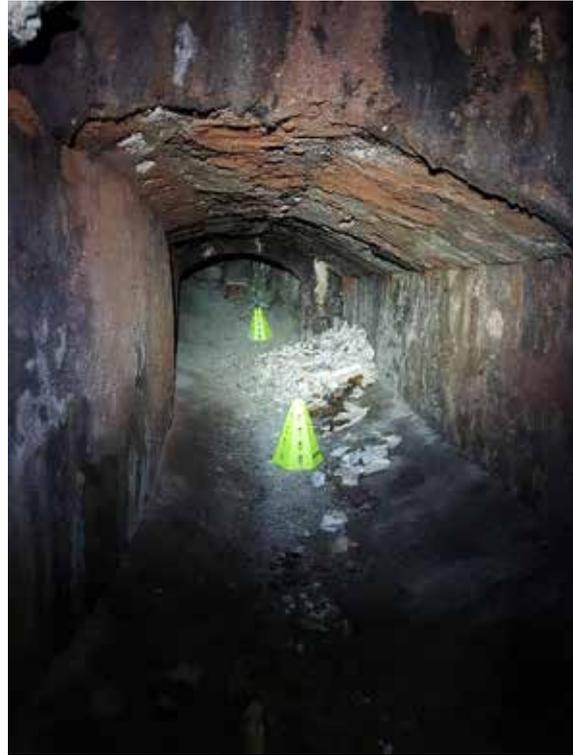
Remontée de cloche de joints (12.7)



Altération du calcaire (12.8)



Effondrement d'une partie du toit et des blocs de meulières (I2.9)



Ancien réseau d'écoulement des eaux (C2.1)



Maçonnerie sur une partie de la paroi de la carrière. La forme laisse présager que la carrière pourrait être divisée en plusieurs carrières (C2.2)



Maçonnerie en fond de carrière laissant penser que la carrière a été divisée en plusieurs carrières, pour respecter les limites parcellaires (C2.3)

**Annexe 17 : Cave du 2 rue des Trois Maries : fiche descriptive,
relevé ZEB-REVO et photographie**

Auteur : <i>N. Froidevaux</i>	Date : <i>05/07/2017</i>	N° cavité : <i>10</i> Si complexe, n° sous-cavité :	Adresse et propriétaire : <i>2 Rue des Trois-Maries 45000 Orléans</i>
<u>Généralités</u>			
Type d'accès :	<i>Escalier</i>		
Utilisation d'origine :	<i>Cave</i>		
Utilisation ancienne :		
Utilisation actuelle :	<i>Salon de restaurant - cave</i>		
Date de création :		
Niveau :	<i>premier niveau de sous-sol</i>		
Nombre d'étages :	<i>2 étages</i>		
Superficie :	<i>≈ 66 m²</i>		
Hauteur des vides :	<i>6,8 m (2 étages cumulée)</i>		
Epaisseur de recouvrement :	<i>1,4 m</i>		
Géologie :	<i>Aucune géologie observable</i>		
Piliers :	<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non		
Nombre de piliers :	<i>1</i>		
<u>Diagnostic</u>			
Etat général :	<input checked="" type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais		
Instabilités observées :	<i>✓</i>		
Confortement :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non		
Type de confortement :	<i>Entièrement massive Niveau de voûtes et de mureaux pour constituer le confortement</i>		
Mode d'occupation en surface :	<i>Habitation - cave</i>		
Désordres en surface :	<i>Aucun désordre observé</i>		
Commentaires : <i>Realisation d'un relié au ZEB - RENO</i>			

Fiche descriptive de la cave du 2 rue des Trois-Maries



Emprise de la cave du 2 rue des 3 Maries. Obtenue grâce au relevé du ZEB-REVO.

**Annexe 18 : Cave-carrière du 4b rue de Limare : fiche descriptive,
croquis et photographies**

Auteur :
N. Froidevaux

Date :
05/07/2017

N° cavité :
11
Si complexe, n° sous-cavité :

Adresse et propriétaire :
45000 Orléans
4b Rue de Limare

Généralités

Type d'accès : Escaliers.....
 Utilisation d'origine : Extraction de calcaire.....
 Utilisation ancienne :
 Utilisation actuelle : Cave.....
 Date de création :
 Niveau : Second Niveau de sous-sol.....
 Nombre d'étages : 1.....
 Superficie : 1.....
 Hauteur des vides : 2 m 50.....
 Epaisseur de recouvrement : 2,4 m.....
 Géologie : Calcaire de Beauce.....
 Piliers : Oui Non
 Nombre de piliers : 1.....

Diagnostic

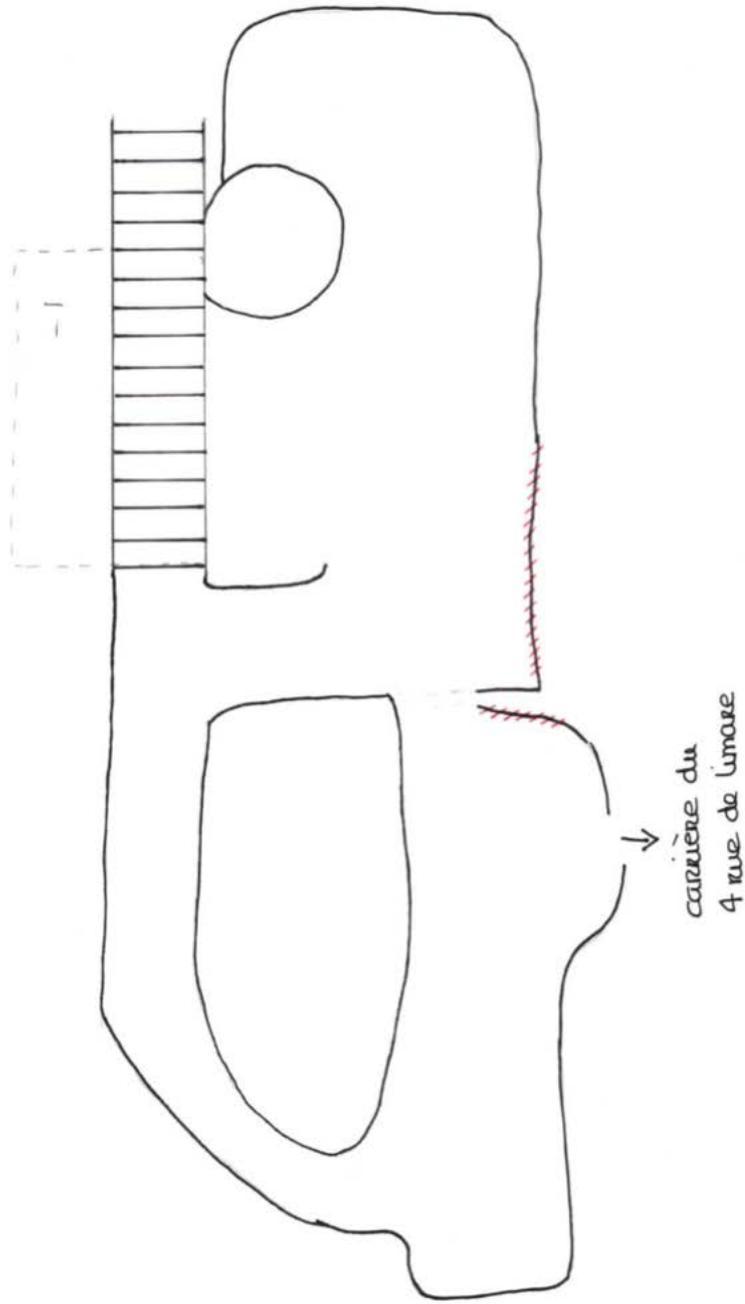
Etat général : Bon Moyen Mauvais
 Instabilités observées : Présence d'importantes
 poches de sables avec un peu d'argile
 (à la total : 1 à 50 cm du sol de la
 cave et à 1 m 80 environ du sol
 de la cave).....
 Confortement : Oui Non
 Type de confortement : Darguerie de
 l'escalier, du puit, de quelques murs
 et du puits.....
 Voute maçonnerie.....
 Mode d'occupation en surface : Habitation +
 cave.....
 Désordres en surface : 1.....

Commentaires : Caractère bien structuré par les préparations : étagées, sèches au sol (parfois
 caractérisé)
 et apparentement sur son mur.....

Fiche descriptive de la cave-carrière du 4b rue de Limare

← N

2-1



Croquis de la cave-carrière du 4b rue de Limare (échelle non respectée)



Présence de sable (traces rouges sur le croquis)



Cave de la cave-carrière



Maçonnerie du puit



Présence d'un banc sableux (traces rouges sur le croquis)



Maçonnerie des puits de la carrière



Présence de sable et d'argile (au-dessus du sable)

**Annexe 19 : Cave-carrière 4 rue de Limare : fiche descriptive,
croquis et photographies**

Auteur : N. Fricteux

Date : 05/07/2017

N° cavité : 12
Si complexe, n° sous-cavité :

Adresse et propriétaire : 4 Rue de Limare
45 000 Orléans

Généralités

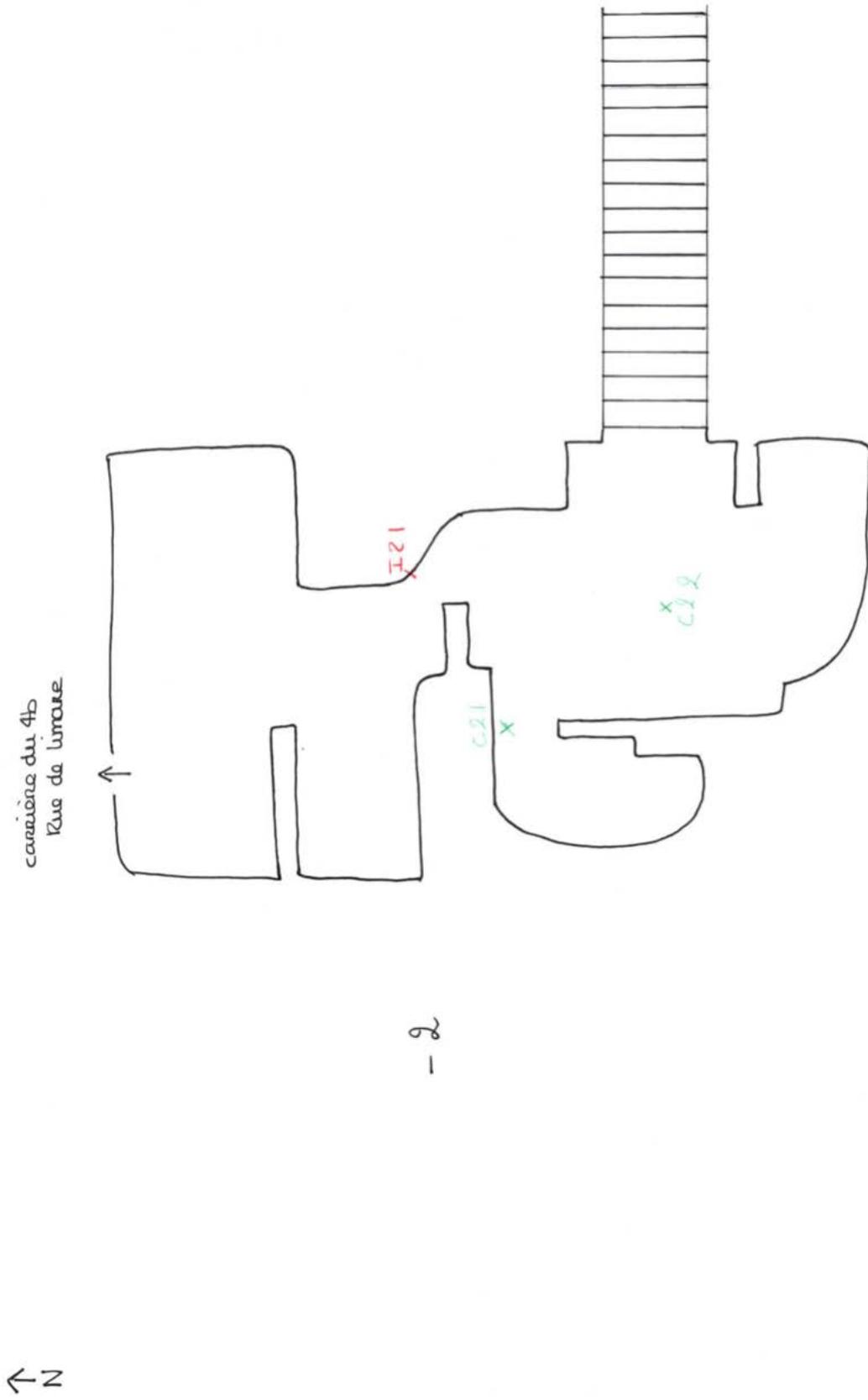
Type d'accès : Via la carrière du 4b rue de Limare
 Utilisation d'origine : Extraction de calcaire
 Utilisation ancienne :
 Utilisation actuelle : Aucune
 Date de création :
 Niveau : Second niveau de sous-sol
 Nombre d'étages : 1
 Superficie :
 Hauteur des vides : 2 m 50
 Epaisseur de recouvrement : 5, 30 m
 Géologie : Calcaire de Beauce
 Piliers : Oui Non
 Nombre de piliers : 1

Diagnostic

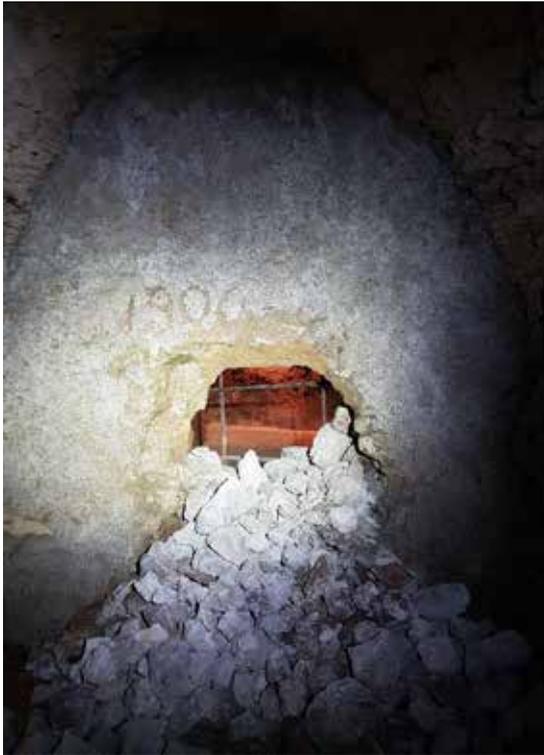
Etat général : Bon Moyen Mauvais
 Instabilités observées : Nœuds de dalle de poutres
 ancrées et au regard lui soutenu par
 des voûtes
 Confortement : Oui Non
 Type de confortement : Escaliers et certains
 murs maçonnés
 Voûtes d'ogives dans une partie de la
 carrière
 Mode d'occupation en surface : Aucun moyen de voirifier
 verpier (Habitation provisoirement)
 Désordres en surface : Aucun moyen de voirifier
 (Absence de désordres très
 probable)

Commentaires : Escaliers murs la carrière est deux relative
 voûtes d'ogives dans une seule partie de la carrière : exploitation de la carrière en deux temps ?
 Appareilatif car non mesuré

Fiche descriptive de la cave-carrière du 4 rue de Limare



Croquis de la cave-carrière du 4 rue de Limare (échelle non respectée)



Passage pour accéder à la cave-carrière, à partir de la cave-carrière du 4b rue de Limare



Ancienne remontée de cloche de fontis (I2.1)



Maçonnerie de la carrière (C2.1)



Maçonnerie et voute de la carrière (C2.2)

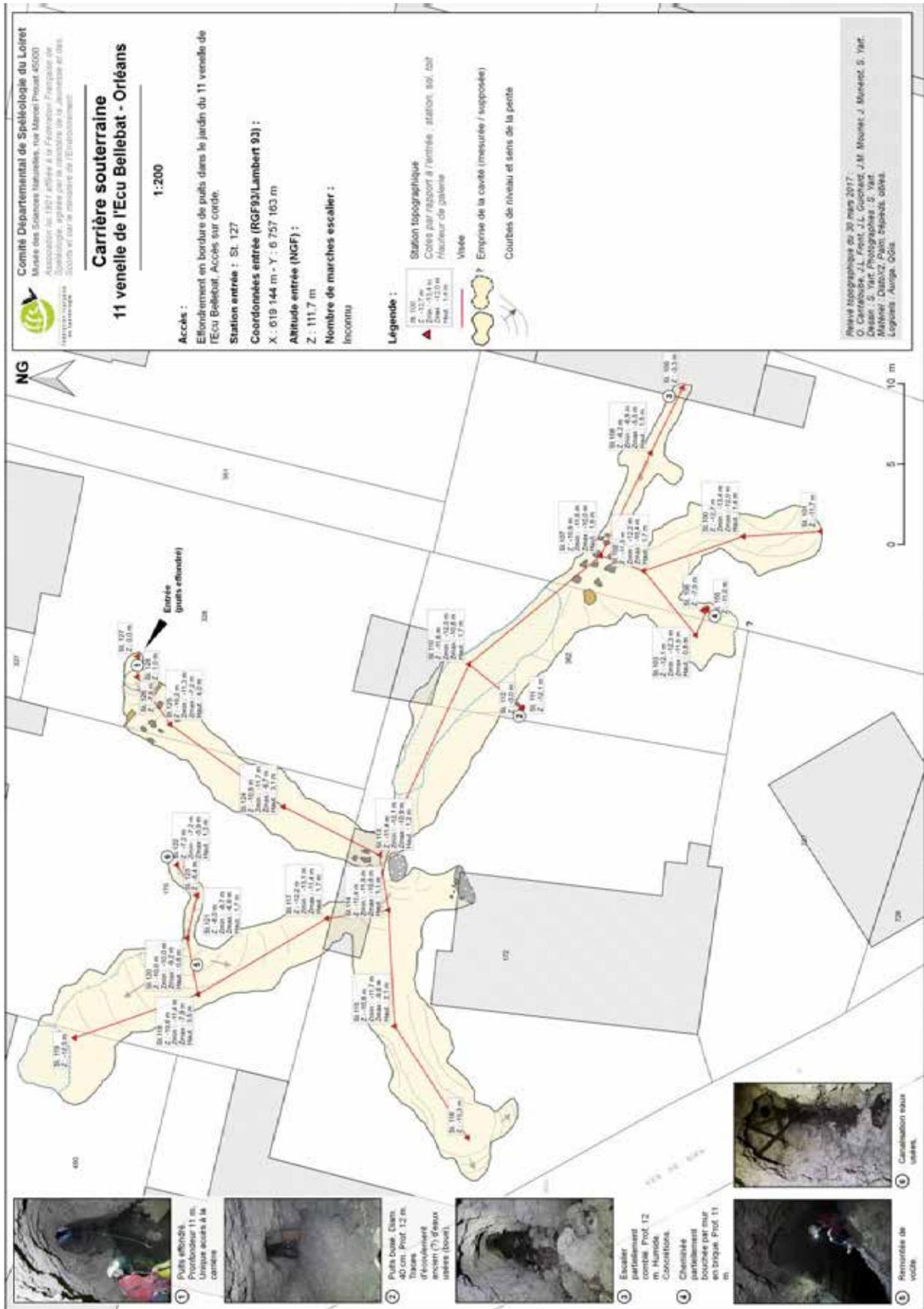
**Annexe 20 : Résumé des informations importantes et de l'état de
chacune des cavités visitées de mars à août 2017**

Date de visite	Adresse	Type de cavité	Etat général de la cavité	Instabilités / informations	Confortements
03/04/2017	55 Rue de la Bretonnerie	Cave - carrière	Bon	Effritement de certaines parties des murs (localisé), Ancienne remontée de voute, fontis remblayé ?	mur maçonnerie en partie (exception pour une partie d'une galerie)
05/04/2017	4 Rue Colligny	Cave - carrière	Cave = mauvais, Carrière = bon	Cave = effondrement d'une partie de la maçonnerie de l'entrée Carrière = infiltration localisée d'eau (minime)	Entièrement maçonnerie
06/04/2017	Centre Charles Peguy, rue du Tabour	Cave - carrière	Bon	Humidité, poches d'argiles sableuse, roches siliceuses vacuolaires (karst), effondrement d'un puit (?)	arcs, voutes, murs de maçonnerie
07/04/2017	Rectorat de l'académie Orléans - Tours. Angle rue Saint-Etienne, place du Cardinal Touchet	Cave - carrière	Bon	fissure dans un linteau (escalier), infiltration minime d'eau (escalier), lentilles d'argile, poche d'argile, mortier fragile	arcs, maçonnerie des parois, cave entièrement maçonnerie
12/04/2017	9 cloître Saint Aignan	Cave	Bon	Effritement localisé du mortier, trou au sol,	Entièrement maçonnerie au 2ème niveau, aménagée au 1er niveau (brique, bois etc.)
24/04/2017	4ter Rue des 4 fils Aymon	Cave	Bon	Effritement très localisé dans le haut des escaliers (mur et plafond)	Entièrement maçonnerie
25/04/2017	26 Rue des Ormes Saint Victor	Cave	Bon	Effritement de la maçonnerie de plusieurs parois	Entièrement maçonnerie

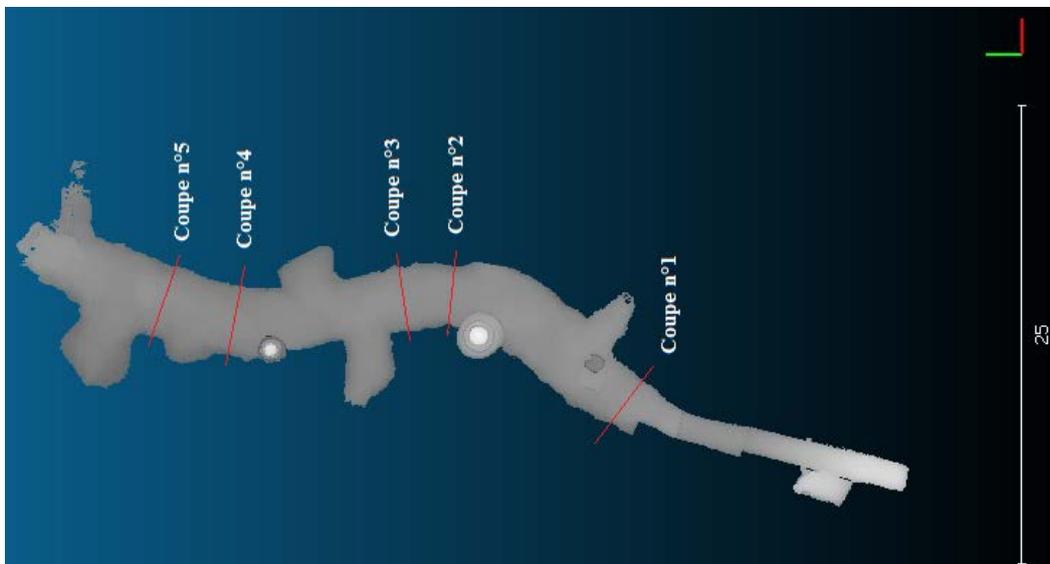
Annexes

16/05/2017	11 Rue des Aydes	Carrière	Bon	Fosse anthropique, poches d'argiles, lentilles d'argile, fragilité de certains bancs rocheux, fracturation d'une partie de la maçonnerie du puit d'aération, remontée de voûte (?)	Maçonnerie dans les escaliers, 1 mur de confortement dans la carrière, brique qui semblent "soutenir" une fosse anthropique
05/07/2017	20 Place Croix-Morin	Cave - carrière	Moyen	Remontées de cloche de fontis, agrandissement de la base d'un puit, effondrement en fond de carrière	Maçonnerie dans les escaliers, puits et puisard maçonnés,
05/07/2017	2 rue des Trois Maries	Cave	Bon	/	Entièrement maçonné
05/07/2017	4b rue de Limare	Cave - carrière	Bon	Présence de sables	Maçonnerie dans les escaliers, de la cave, de certains murs, du puit et du pilier
05/07/2017	4 rue de Limare	Cave - carrière	Bon	Ancienne remontée de voûte	Maçonnerie en voûte d'ogive dans la première partie de la carrière. Maçonnerie des murs, de la cave et des escaliers

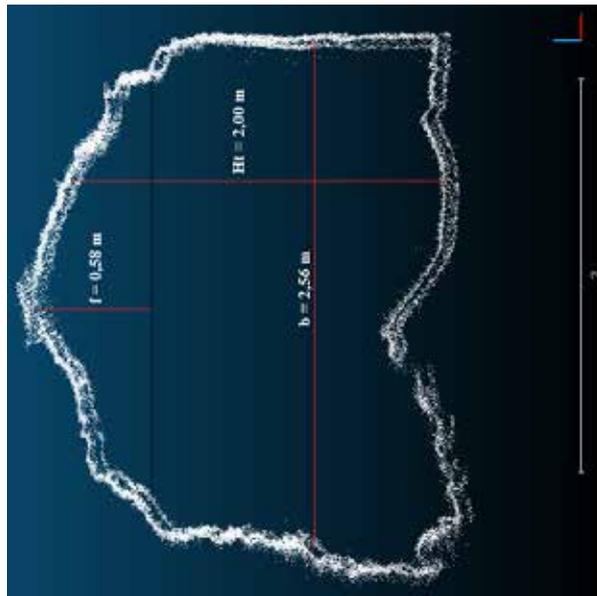
**Annexe 21 : Plan du relevé de carrière souterraine du 11 venelle
de l'Écu Bellebat, par les spéléologues du CDS 45, le 30 mars 2017**



**Annexe 22 : Mesures des hauteurs de toit, des largeurs de la
galerie et des épaisseurs de recouvrement, de la carrière du 20
Place Croix-Morin, à l'aide du nuage de points issu du relevé du
ZEB-REVO, du 05 juillet 2017**



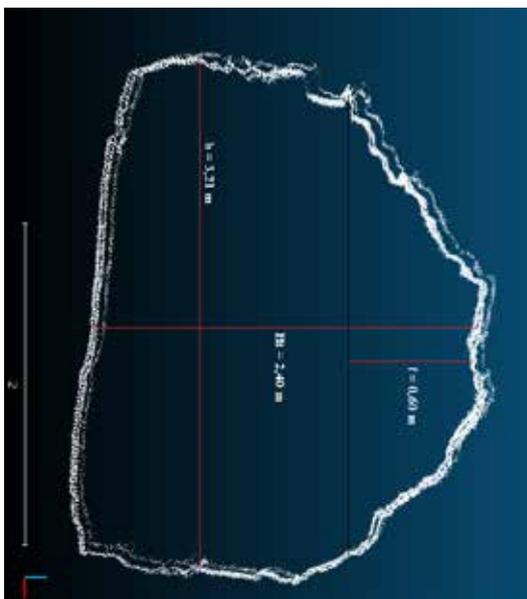
Localisation des coupes transversales faites avec le relevé de la carrière du 20 Place Croix-Morin



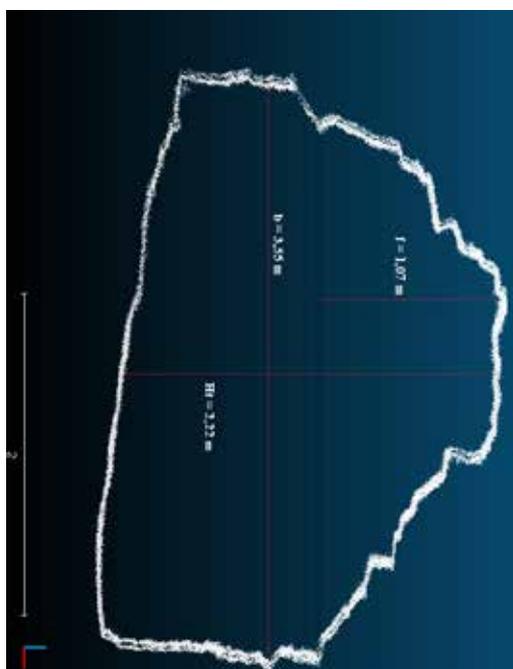
Coupe transversale n°1



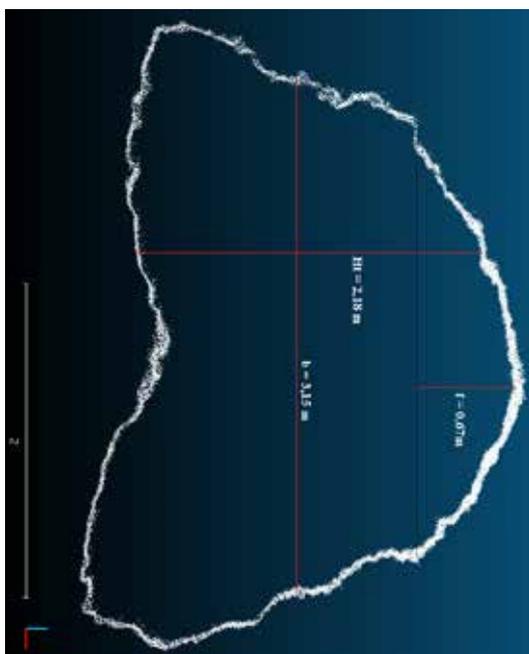
Coupe transversale n°2



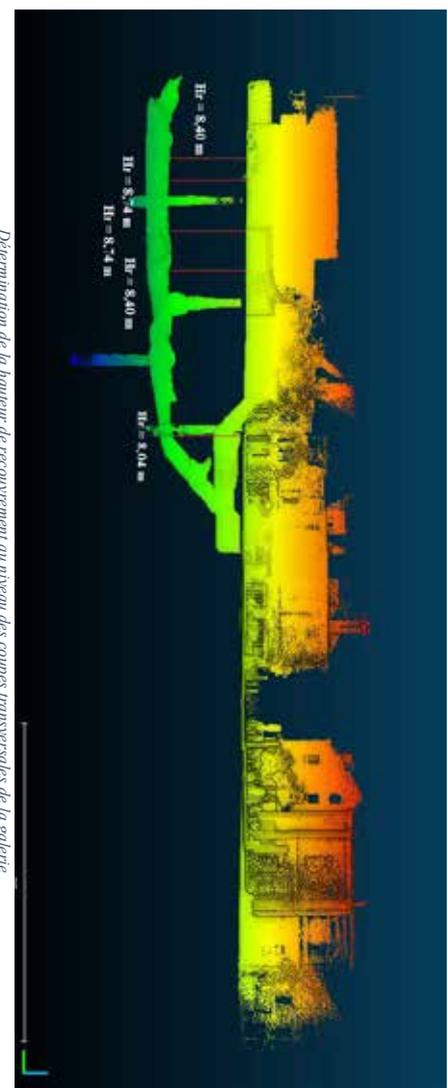
Coupe transversale n°3



Coupe transversale n°4



Coupe transversale n°5



Détermination de la hauteur de recouvrement au niveau des coupes transversales de la galerie

**Annexe 23 : Extrait du dossier de l'IFSTTAR de 2014, sur les
méthodes des aires tributaires, des plaques et des poutres**

• Méthode de l'aire tributaire

Le principe du modèle de l'aire tributaire est d'admettre que chaque pilier de l'exploitation reprend individuellement les contraintes générées par les terrains situés au-dessus de ce pilier ainsi qu'une partie de ceux qui l'entourent (fig. 122).

L'utilisation de ce modèle est notamment possible quand l'extension maximale de l'exploitation (Q) est supérieure à une fois et demie sa profondeur (H+h), dans le cadre de carrières exploitées horizontalement, avec chambres et piliers réguliers recouverts d'un matériau homogène (fig.123).

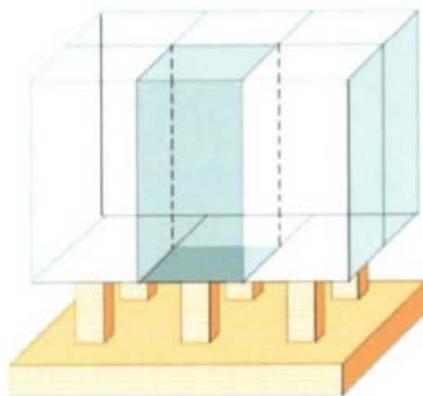


Figure 122
Schéma de principe de la méthode

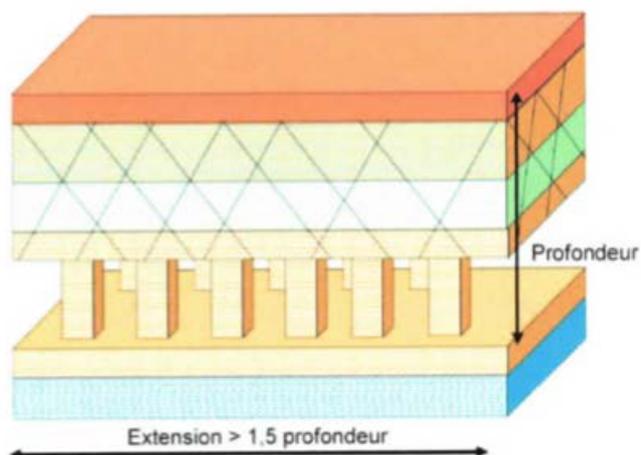


Figure 123
Cotations adoptées pour la méthode de l'aire tributaire

La méthode n'est pas adaptée dans les cas suivants :

- pour estimer avec précision la contrainte dans un seul pilier ;
- dès lors que l'on se situe en bordure d'exploitation ;
- si la voûte est fracturée et entraîne un report de charge dissymétrique ;

La contrainte verticale théorique moyenne σ_n exercée sur les piliers d'une zone type de la carrière est fonction du poids des terrains sus-jacents et du taux de défrètement de la carrière dans cette zone, elle est obtenue par :

$$\sigma_n = \gamma H / (1 - \tau)$$

où

γ est le poids volumique apparent du recouvrement (kN/m^3),

H est la hauteur de recouvrement (m),

τ est la valeur du taux de défrètement (%)

La mise en relation entre la contrainte verticale théorique σ_n et les caractéristiques mécaniques moyennes des formations en présence, en l'occurrence la résistance ultime à la compression uniaxiale R_u (Chapitre 4 paragraphe 2.5), permet de définir un facteur de sécurité F qui s'exprime par la relation :

$$F = R_u / \sigma_n$$

La représentation de la valeur de σ_n en fonction du *taux de défrètement* de la carrière (fig.124) montre l'importance d'une bonne estimation préalable du taux de défrètement.

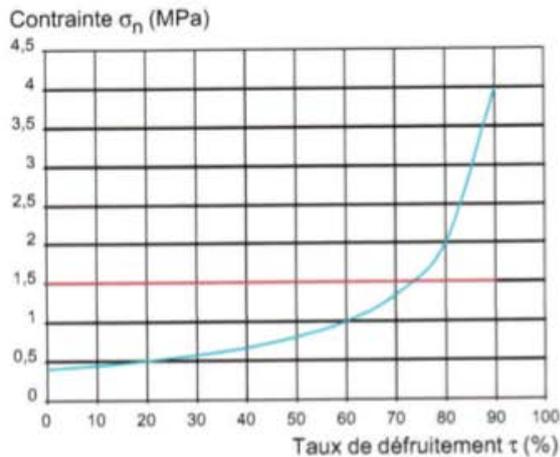


Figure 124

Valeur de σ_n théorique selon le taux de défrètement.
Au-delà de 75 % de taux de défrètement, la contrainte exercée par le massif est supérieure à la résistance d'un tuffeau.

Le calcul présenté montre la contrainte prévisible au sein d'un pilier représentatif d'une carrière située à 20 mètres de profondeur dans un tuffeau présentant une faible résistance à la compression ($R_c = 3$ MPa et donc $R_u = 1,5$ MPa, comme précisé au chapitre 4 § 2.5). On note l'importance d'une estimation précise du taux de défrètement, la stabilité étant acquise pour $\tau = 70$ % et non acquise pour $\tau = 80$ %.

Ces approches sont davantage adaptées à la détermination du dimensionnement de futures exploitations qu'au diagnostic de stabilité des carrières abandonnées. Néanmoins, elles peuvent permettre au géotechnicien de se faire une opinion sur le bien-fondé du dimensionnement de la carrière vis-à-vis des conditions de stabilité (taux de défrètement, taille des piliers, etc.).

• Modèles locaux de toit

L'estimation de la stabilité de la voûte d'une carrière peut s'appuyer sur la quantification des efforts qui lui sont appliqués. Une portée maximale mesurée dans une galerie ou encore aux carrefours de deux galeries sera considérée (prendre le cas le plus défavorable) et un modèle analytique appliqué selon le contexte géotechnique du site (matériaux résistants, nature du recouvrement, etc.).

Les modèles décrits ci-après s'appliquent dans le cas d'un ciel composé d'une dalle d'épaisseur (e) minimale 0,5 m, non fracturée verticalement et pour des matériaux ayant une structure stratifiée (matériaux sédimentaires). Ils prennent en compte un phénomène de décollement et de flexion du ciel.

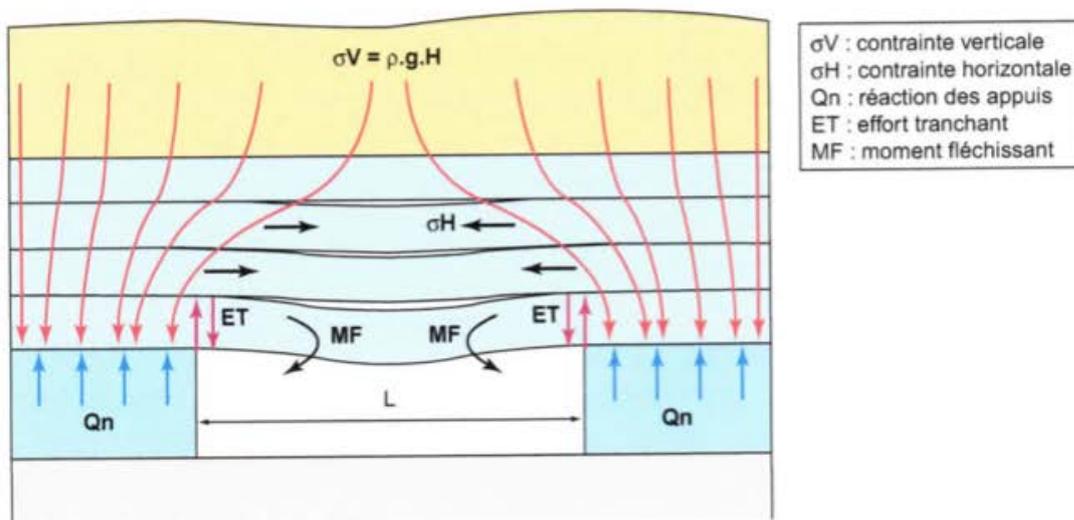


Figure 125

Schéma récapitulatif des contraintes appliquées à une dalle de toit. (LCPC - INERIS, 2002)

Deux types de modèles sont généralement employés :

- le modèle de plaque ;
- le modèle de poutre.

Modèle de plaque

Le modèle de plaque posée sur 4 appuis simples simule correctement les phénomènes rencontrés lors du croisement de deux galeries. Des abaques (Goulet et Boutin, 1996) permettent, selon la géométrie de la plaque (largeur, longueur et épaisseur de la plaque) de définir le moment maximal admissible ou l'effort tranchant maximal développé au sein de la dalle.

Pour le cas particulier d'une dalle carrée (de côté L) d'épaisseur e (avec $e \ll L$), la valeur théorique de la contrainte développée dans la fibre inférieure de la dalle au centre de celle-ci est égale à :

$$\sigma_{\text{traction théorique}} = 0,67 (qL^2 / e^2)$$

avec q contrainte unitaire s'appliquant sur la plaque en kPa

L et e en mètre,

$\sigma_{\text{traction théorique}}$ en MPa

La contrainte ainsi calculée est à comparer avec la contrainte en traction admissible par le matériau en prenant en compte un coefficient de sécurité à fixer selon la situation.

L'effort de cisaillement maximal est obtenu en bordure de la plaque à la jonction avec les appuis simples. Si le calcul de résistance des matériaux permet d'obtenir une valeur de résistance au cisaillement théorique, celle-ci est rarement exploitable car l'essai triaxial nécessaire à l'obtention de la résistance réelle est rarement mis en œuvre.

Modèle de poutre

Le modèle de poutre encadrée s'applique plus particulièrement dans le cas d'une salle rectangulaire ou d'une galerie isolée. Il peut également être appliqué à l'intersection de deux galeries en comparaison du modèle précédemment décrit (il convient alors de prendre en compte la valeur calculée la plus défavorable).

L'utilisation de ce modèle de poutre est plus facile que celui de la plaque car il ne nécessite pas la consultation d'abaques. Les données d'entrées sont :

- L portée de poutre considérée (m),
- e épaisseur de la poutre (m),
- q contrainte unitaire appliquée sur la poutre (kPa).

La valeur de contrainte à la traction théorique maximale vaut :

$$\sigma_{\text{traction théorique}} = qL^2 / 2e^2$$

Cette contrainte est obtenue en partie supérieure de la poutre (donc dans une zone non observable) au niveau de l'encastrement (au droit des piliers).

La contrainte ainsi calculée est à comparer avec la contrainte en traction admissible par le matériau en prenant en compte un coefficient de sécurité à fixer selon la situation.

Conclusions sur les modèles locaux de toit

Le modèle de poutre fléchie est représentatif de nombreux cas de figure ; cette « poutre » est partiellement encadrée à ses extrémités dans le pilier, lui-même déformable, ce qui correspond à une condition d'appui complexe : en pratique, on aura à choisir entre appuis simples ou encastrement parfait en fonction de la géométrie du site.

L'utilisation de ces deux types de modèle pose la question de la contrainte unitaire q appliquée au modèle.

Selon la configuration géotechnique du recouvrement la valeur de q variera entre :

- $q = \gamma \times e$ si l'on considère que la plaque (ou la poutre) est décollée du banc supérieur et qu'elle n'est soumise qu'à son propre poids ;

- $q > \gamma \times e$ si l'on considère que les terrains de recouvrement sont constitués de matériaux meubles ou plus déformables que le bas-toit (contraste de module de 1/5 par exemple).

La réalité se trouve souvent dans l'estimation d'une « voûte de décharge » des terrains qui constituera alors la charge maximale appliquée à l'élément porteur (valeur par excès).

On conclura sur ces modèles en notant que la valeur de traction calculée est proportionnelle à la portée et inversement proportionnelle au carré de l'épaisseur élémentaire des bancs.

En l'absence de valeur d'essai permettant de comparer la résistance à la traction réelle et théorique, il est également possible de faire un rétro-calcul en relevant la valeur minimale des portées instables (suite à une flexion) et la hauteur moyenne des bancs. On obtient alors une valeur de contrainte à la traction *in-situ*, réutilisable pour le reste de la carrière.

Annexe 24 : Tableau de la méthode de Terzaghi

Nature de la roche	Charge H_p ⁽¹⁾	Remarques
1 - Dure et intacte	0 à 0,25 D'	Quelques ancrages s'il y a chute de pierres
2 - Dure et stratifiée	0 à 0,5 D'	Soutènement léger
3 - Massive avec quelques joints	0 à 0,25 D'	La charge peut changer brusquement d'un point à l'autre
4 - Modérément ébloueuse	0,25 à 0,35 ($D' + H_i$)	Pas de pression latérale
5 - Très ébloueuse	0,35 à 1,10 ($D' + H_i$)	Peu ou pas de pression latérale
6 - Compètement broyée mais chimiquement intacte	1,10 ($D' + H_i$)	Pression latérale considérable
7 - Roche fluante à faible profondeur	1,10 à 2,10 ($D' + H_i$)	Pression latérale importante - Cintres recommandés
8 - Roche fluante à grande profondeur	2,10 à 4,50 ($D' + H_i$)	Pression latérale importante - Cintres recommandés
9 - Roche gonflante	Jusqu'à 75 m indépendant de ($D' + H_i$)	Cintres - Dans les cas extrêmes, des cintres coulissants seront utilisés

Tableau déterminant le coefficient K utilisé dans la méthode de Terzaghi de 1946 (Athar, 1995)

**Annexe 25 : Liste d'interventions (2010 – 2017) du service risque
d'Orléans Métropole, concernant des désordres liés aux cavités
souterraines intra-muros.**

Date de l'évènement	Adresses	Domanialité	Type d'incident	Traitement
23/12/2009	[REDACTED]	PUBLIC	Puits d'aération d'une carrière - travaux CLEO	comblement par l'entreprise en charge des travaux
11/02/2010	[REDACTED]	PUBLIC	Cave découverte - travaux CLEO	comblement 8 m3
24/02/2010	[REDACTED]	PUBLIC	Puits d'aération d'une carrière découvert- travaux CLEO (visite GRIMP)	découverte d'une carrière- comblement du puits à prévoir
29/04/2010	[REDACTED]	PRIVE	Excavation dans la cours	A prendre en charge semaine 21
17/05/2010	[REDACTED]	PUBLIC	Découvert lors de travaux sur réseaux par Eurovia	comblement pris en charge par l'entreprise, puits partiellement comblé
27/05/2010	[REDACTED]	PUBLIC	Découvert lors de travaux sur réseaux par Eurovia	comblement pris en charge par l'entreprise, puits partiellement comblé
24/06/2010	[REDACTED]	PUBLIC	Découvert lors de travaux sur réseaux par Eurovia CLEO	comblement pris en charge sur le marché recouvrement (16m3)
24/06/2010	[REDACTED]	PUBLIC	Découvert lors de travaux sur réseaux par Eurovia CLEO	comblement pris en charge par l'entreprise en raison du trop petit volume
01/07/2010	[REDACTED]	PUBLIC	Puits découvert (visite par le GRIMP)	comblement effectué 7?m3
01/07/2010	[REDACTED]	PUBLIC	Excavation trouvée lors de travaux Tram	comblement effectué 8 m3
01/07/2010	[REDACTED]	PUBLIC	découverte d'anciens ouvrages d'art Assainissement maçonnés en forme d'ogive de 1,3m de hauteur sur 10 m de long coté	Comblement effectué (en attente du cubage)

Annexes

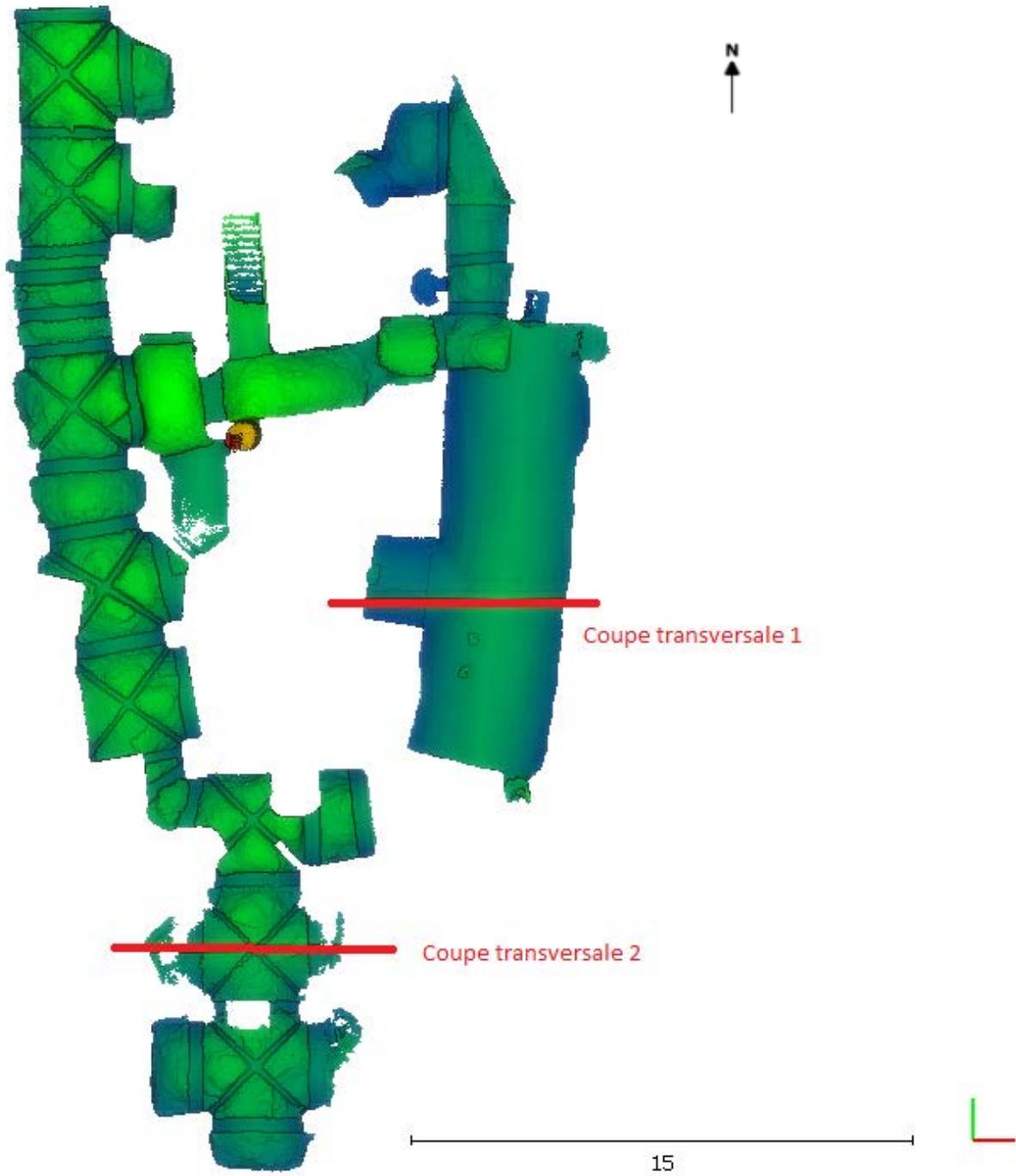
03/07/2010		PUBLIC	excavation suite à forte pluie de samedi (cavité découverte (7m X 3m (largeur) X 2m (hauteur))	Comblement effectué (environ 55m3) sondages à prévoir ??
13/07/2010		PUBLIC	Excavation lors de travaux EUROVIA	
12/08/2010		PUBLIC	Puits découvert	
		PUBLIC	Suite à travaux de voirie	Comblement effectué : 7m3
14/01/2011		PRIVE	Excavation au milieu du passage côté rue Sainte Catherine.	Prendre contact avec le Syndic pour traiter cette excavation sur domaine privé
21/02/2011		PUBLIC	Puits (1mètre diamètre/ 10mètres profondeur) dans le chantier du tram	Comblement le jour même par Eurovia (toupie sur place disponible l'après-midi même)
31/05/2011		PRIVE	Découverte d'une cave voûtée	Agrandissement ouverture, visite et comblement effectué par l'entreprise
16/11/2011		PUBLIC	Découverte d'un puits suite à travaux Tram	Comblement effectué par l'entreprise
23/11/2011		PRIVE	Découverte puits de ventilation coté façade maison.	Visite dans la cave à prévoir et méthodologie de travaux à définir.
13/12/2011		PUBLIC	Sur le chantier SEMDO, découverte d'une cave de diam 6X6X4	Inspection des lieux, comblement 9/10e sable + finition mortier
12/01/2012		PUBLIC	Excavation sur la voirie suite à travaux - découverte d'une cave ancienne	comblement par l'entreprise
16/01/2012		PUBLIC	Excavation sur la voirie suite à travaux - découverte d'une cave ancienne	comblement par l'entreprise
26/01/2012		PUBLIC	puits découvert	recensement par le service Archéologie et comblement
13/02/2012		PUBLIC	Puits découvert	recensement par le service Archéologie et comblement
05/06/2012		PUBLIC	excavation - fontis sous pilier d'une ancienne cave du XIIIe s.	Comblement par Eurovia le 07/06/2012
24/10/2012		PRIVE	Excavation dans cave (3 niveaux)	balisage sécurité par SOCOGIM
24/01/2013		PRIVE	Découverte d'un puits	pris en charge par le particulier
08/03/2013		PUBLIC	Découverte d'une niche d'une ancienne cave moyennageuse	Comblement pris en compte dans le cadre des travaux réfection voirie (Martroi)

11/03/2013			PUBLIC	Excavation lors du chantier Martroi (3m)	Comblement à prévoir
12/03/2013			PUBLIC	Découverte de la ventilation d'une cave profonde référencée.	Dalle béton à poser pour préserver la ventilation de la cave
22/03/2013			PUBLIC	Découverte d'un puits profond maçonné (10m)	Comblement effectué dans le cadre des travaux place du Martroi
26/03/2013			PUBLIC	Découverte d'un puits profond (environ 10 m - Départ Carré de 80cm diam puis circulaire > 1m)	comblement réalisé par la SRU suite à visite avec GRIMP
21/06/2013			PUBLIC	Excavation angle passage Puits Landeau	travaux à réaliser
01/07/2013			PUBLIC	Excavation dans la crypte	
30/09/2013			PRIVE	Excavation dans la cours	maçonnerie découverte. Contact archéo et travaux pris en charge par propriétaire
04/02/2014			PUBLIC	cave voûtée trouvée pendant travaux	traitement par l'entreprise sur place
08/07/2014			PRIVE/PUBLIC	Cave trouvée Zac Bourgogne	Dossier suivi par la DESP - comblement demandé
23/07/2014			PRIVE	Affaissement de voirie suite à passage camion	découverte d'une ancienne cave - travaux de comblement à prévoir - Assurances interrogées pour prise en charge
07/08/2014			PRIVE	Effondrement localisé au fond de la cave, révélant une seconde cave en dessous, qui communique avec les voisins. Probablement causé par une fuite d'eau du tuyau d'assainissement (en amiante).	Visite avec les pompiers et le 7/8/2014. Echanges le 19/8/2014 avec la mairie de quartier, la personne aurait fait réparer la fuite. A approfondir par une nouvelle visite d'Imed avec les pompier au retour de vacances.
06/03/2015			PRIVE	excavation signalée au niveau de la marche d'entrée du magasin	ancienne aération de cave. Pas de suite à donner
25/03/2015			PRIVE	Excavation dans la cours. Ouverture d'un ancien accès cave	visite du site avec C. Alix. Prescriptions de travaux donnés aux propriétaires
11/05/2015			VILLE	Découverte cave Collège Anatole Bailly	Visite avec spéléo - topo à réaliser par les spéléos
18/05/2015			PRIVE	Cavité	
05/02/2016			PUBLIC	Suite à travaux SODC grosse excavation découverte (8m profondeur ??)	Prise en charge lors de travaux de réfection de voirie

Annexes

22/04/2016			PRIVE	Importante affaissement toit de carrière dans l'habitation	Prise en charge par le nouveau propriétaire dans le cadre de travaux de réhabilitation
27/05/2016			PUBLIC	Excavation apparue lors des travaux de chauffage urbain. Importante excavation 3X3m et 3m de profondeur.	Elargissement de la zone décompressée. Affouillement et comblement en coulis de béton. Prise en charge en partie par la DESP et en partie par la DEPR
10/10/2016			PRIVE	Elargissement du puits.	La cour Isabelle Romée sert de lieu de stationnement aux habitants et commerçants du secteur. Deux puits de carrière sont ouverts jusqu'en surface. En raison du risque pour les biens et les personnes la V.O. a fait barriérer l'accès à la cour et les puits. Une demande de travaux de comblement a été demandé via les syndics aux propriétaires.
02/03/2017			PUBLIC	Excavation au 2eme niveau d'une ancienne cave	sondages géotechniques avant réhabilitation du toit prévue.

Annexe 26 : Localisation des coupes transversale pour l'étude comparative entre le FARO® Focus 3D et le ZEB-REVO



Localisation des deux coupes transversales de l'étude comparative des deux scanners 3D

MÉMOIRE D'AURÉLIE DIACRE, CARACTÉRISATION DU DÉPÔT ARCHÉOLOGIQUE SUR LES PALÉOTERRASSES DU QUARTIER SAINT-AIGNAN À ORLÉANS



UNIVERSITE D'ORLEANS
Observatoire de Sciences de l'Univers en région Centre

Licence Sciences de la Terre et de l'Environnement
3^{ème} année
2016 – 2017

Mémoire de stage en entreprise

**Caractérisation du dépôt
archéologique sur les paléoterrasses
du quartier Saint-Aignan à Orléans**

Par Aurélie DIACRE

Sous la direction de : M. ALEX Clément, M^{me} LAURENT Amélie

Service Archéologique Municipal d'Orléans (SAMO)
13 bis rue de la Tour Neuve
45000 Orléans



Remerciements :

Dans le cadre de ce stage, je tiens à remercier :

- Madame LAURENT Amélie, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage, pour sa disponibilité, son aide et les nombreuses connaissances qu'elle m'a communiquées.
- Madame SIMONNEAU Anaëlle, pour son encadrement lors de l'ouverture des sondages carottés, ainsi que pour l'aide apportée.
- Monsieur ALIX Clément et Monsieur MORLEGHEM Daniel, pour les nombreuses informations qu'ils m'ont communiquées.
- L'ISTO, pour la disponibilité des locaux et du matériel.

Au cours de ce mois à vos côtés, j'ai pu découvrir de nouveaux métiers qui apportent beaucoup au domaine que j'étudie depuis trois ans, surtout lorsqu'on se concentre sur les interactions homme/milieu. Cela m'a aussi permis de voir ce qu'est l'archéologie et le lien que cette discipline a avec la nôtre. Cet apprentissage et cette découverte ont changé mon point de vue quant au domaine de travail du géologue lorsqu'il s'intéresse à ce type d'interactions, c'est dans ce cas que ces deux disciplines sont complémentaires.

Pour finir, encore un grand merci à tous, pour le temps et l'attention que vous m'avez apportés au cours de ce stage ; j'ai énormément appris à vos côtés.

Table des matières :

Remerciements :	2
Table des illustrations :	4
Abréviations, glossaire :	6
I. Introduction :	7
II. Étude du quartier Saint-Aignan :	9
A. Site d'étude :	9
B. Procédés :	10
1. Sondages carottés :	10
2. Sondages au pénétromètre :	11
C. Topographie :	12
III. Résultats :	13
A. Sédimentaires :	13
1. Description des carottes :	13
2. Interprétation des observations :	14
B. Pénétrométriques :	16
1. Données réalisées :	16
2. Interprétation des données PANDA :	20
3. Cavités :	22
C. Autres données :	22
IV. Discussion :	23
A. Transect Nord-Ouest – Sud-Est :	23
B. Transect Nord-Sud :	24
C. Critiques :	24
V. Conclusion :	26
Références bibliographiques et sitographiques :	27
Annexe 1 : Cartes d'occupation d'Orléans à différentes époques :	28
Annexe 2 : Carte SIG des sondages géotechniques réalisés par des structures externes dans le quartier Saint-Aignan :	29
Annexe 3 : Fiche de description détaillée des carottes :	30
Annexe 4 : Fiche permettant :	31
Annexe 5 : Sondages carottés et pénétrométriques avant interprétation réalisés au jardin de l'évêché et à l'arrière de la maison Louis XI :	32
Annexe 6 : Carte SIG des sondages réalisés à proximité de l'église Saint-Euverte à Orléans :	33
Annexe 7 : Tableau dynamique croisé des valeurs calculs sur les sondages SP 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 :	34
Annexe 8 : Pénétrogrammes SP 11, 12, et 13 réalisés dans des cavités du quartier Saint-Aignan :	35
Annexe 9 : Tableau dynamique croisé représentant l'interprétation des UP en fonction de leur moyenne de Qd :	36
Résumé caractérisation du dépôt archéologique sur les paléoterrasses du quartier Saint-Aignan à Orléans :	37

Table des illustrations :

Dans la partie I :

Figure 1 : Organigramme du S.A.M.O., celui-ci montre les différents postes avec les personnes les occupant, ainsi que leur spécialité. Il faut savoir que PAO/DAO signifie Publication Assistée par Ordinateur et Dessin Assisté par Ordinateur. 7

Dans la partie II :

Figure 2 : Cartographie du quartier Saint-Aignan, encadré en rouge, afin de montrer la zone d'étude. Par ailleurs, les lignes noires représentent les deux transects à étudier. Ensuite, les points rouges et marrons nommés Sp sont la représentation des sondages pénétrométriques en jardin et cave, tandis que les points bleus nommés SC permettent de visualiser les sondages carottés..... 9

Figure 3 : Photographie du carottier à rotoperçussion avec le train de tiges permettant d'atteindre d'importantes profondeurs 10

Figure 4 : Photographie d'une demi-section de la carotte SC3 6,3-7,2 après ouverture. Cette photographie montre bien la présence de différents faciès dans les sondages carottés. 11

Figure 5 : Photographie du PANDA avec la représentation des tiges, de la tête du train de tiges, du moniteur et du boîtier..... 11

Figure 6 : Niveau optique sur trépied utilisé pour les relevés topographiques 12

Dans la partie III :

Figure 7 : Représentation des logs des carottes confrontés aux pénétrogrammes réalisés à proximité. Les pénétrogrammes sont interprétés selon les unités sédimentaires correspondant à une certaine profondeur à des unités pénétrométriques..... 15

Figure 8: Pénétrogrammes SP 1, 2, 3 et 4 interprétés, ils ont été réalisés majoritairement dans des niveaux géologiques à proximité de l'église Saint-Euverte à Orléans, zone qui se situe en dehors du quartier d'étude..... 17

Figure 9 : Pénétrogrammes interprétés des sondages : SP 8, 9 et 10 réalisés au 4 rue Coligny sur des terrasses ainsi que les SP 15 et 16 réalisé au séminaire interdiocésain à Orléans dans le quartier Saint-Aignan..... 18

Figure 10 : Résultats du tableau de traitement croisé permettant de déterminer la nature des unités pénétrométriques en fonction de leur moyenne de QdL 19

Figure 11 : Pénétrogramme interprété, celui-ci est réalisé au 8 rue Édouard Fournier 21

Figure 12 : Résultats des sondages pénétrométriques du 18 quai Fort Alleaume (LAURENT, 2015)... 22

Dans la partie IV :

Figure 13 : Transect Nord-Ouest (14 cloître Saint-Aignan) à Sud-Est (7bis rue des Quatre Fils Aymon) représentant avec les lignes noires en partie haute le niveau topographique et en partie basse le niveau du substrat géologique..... 23

Figure 14 : Transect Nord-Sud, débutant un peu avant la rue de Bourgogne jusqu'au quai Fort Alleaume, montrant une géométrie de terrasses..... 25

Annexes :

Figure 15 : Cartographie de la ville d'Orléans à plusieurs époques avec encadré en rouge le quartier Saint-Aignan.	28
Figure 16 : Carte SIG des sondages géotechniques réalisés par des personnes externes. En bleu, sont représentés les sondages disposant d'un indice de confiance de 0, ils sont donc peu fiables mais permettent tout même de se faire une idée. En rouge, sont illustrés les sondages ayant un indice de confiance compris entre 1 et 2, ils sont donc exploitables.	29
Figure 17 : Fiche de description des carottes prenant en compte, l'épaisseur des unités observées, l'humidité de celle-ci ainsi que leur teneur en eau et éléments grossier de tout type.	30
Figure 18 : Fiche d'un point MGF de la base de données du SIGOR, utilisé comme référentiel pour établir la topographie.	31
Figure 19 : Log des sondages carottés confrontés aux pénétromètres réalisés à leur proximité avant interprétation, il s'agit là des données brutes.	32
Figure 20 : Cartographie SIG d'une petite partie de la ville d'Orléans permettant la localisation des sondages pénétrométriques SP 1, 2, 3 et 4 par rapport à la zone d'étude encadrée en rouge.	33
Figure 21 : Tableau dynamique permettant ensuite la détermination de la nature des unités pour les pénétrogrammes réalisés à l'aveugle.	34
Figure 22 : Pénétrogrammes SP11 réalisés dans la carrière du 4 rue Coligny et SP12 et 13 sont eux réalisés dans la cave du 8 rue Édouard Fournier.	35

Abréviations, glossaire :

S.A.M.O. : Service Archéologique de la Mairie d'Orléans

O.S.U.C. : Observatoire des Sciences de l'Université en région Centre

GEHCO : Géo-hydrosystèmes continentaux,

PANDA : Pénétromètre

NGF : Niveau Géographique Français dont le point de référence se trouve à Marseille

UP : Unité Pénétrométrique, correspondant à une zone de changement de résistance de pointe

US : Unité Sédimentaire

Substrat : Premier niveau géologique, soit sédiment non lié à l'Homme

Mobilier archéologique : Matériel transformé par l'Homme retrouvé dans les sédiments comme les tuiles, les charbons, etc...

Remblai : Matériel apporté par l'Homme pour mettre un sol à niveau ou combler un trou

I. Introduction :

Le stage suivant est réalisé par l'encadrement de deux personnes. Tout d'abord, Madame LAURENT Amélie qui est responsable d'opération et médiéviste au Service d'Archéologie Préventive du Département du Loiret et a pour spécialité l'archéologie urbaine ainsi que l'évaluation du potentiel archéologique en milieu urbain. Ensuite, le second encadrant est Monsieur ALIX Clément qui est spécialiste en archéologie du bâti au Service Archéologique Municipal d'Orléans (SAMO).

Le Service Archéologique Municipal d'Orléans (SAMO) a été créé en 1992, devenant depuis 2011, le pôle archéologique de la ville d'Orléans lié à l'agglo. Ce service public est non académique et est actuellement dirigé par Monsieur JESSET Sébastien, archéologue de la période médiévale et céramologue. Il s'organise de la manière suivante (figure 1):

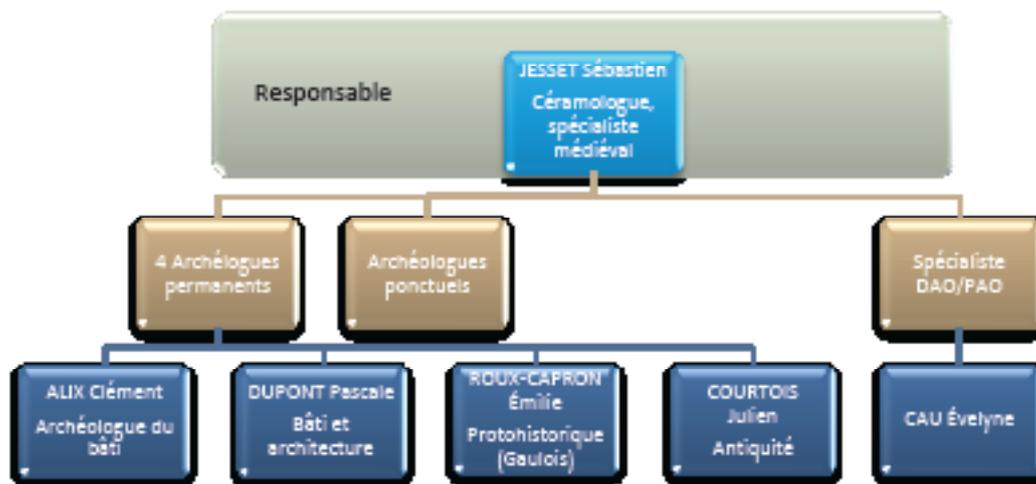


Figure 1 : Organigramme du S.A.M.O., celui-ci montre les différents postes avec les personnes les occupant, ainsi que leur spécialité. Il faut savoir que PAO/DAO signifie Publication Assistée par Ordinateur et Dessin Assisté par Ordinateur.

Les différentes missions attribuées à ce service sont d'ordres variés, allant de la gestion et la mise en valeur du patrimoine archéologique et architectural de la ville, ainsi que des vestiges, à la réalisation d'expertises telles que les fouilles ou les diagnostics. De plus, le service bénéficie d'un agrément de l'État en archéologie préventive, qui permet de faire un diagnostic archéologique avant construction pouvant entraîner l'étude des vestiges lors d'un aménagement destructif. L'action de cette structure est aussi bien publique, par le biais de visites conférences et rencontres, que scientifique, par de nombreux programmes de recherche tel que SICAVOR ; le tout est mené dans le but de compléter la carte archéologique, montrant ainsi les sites ayant un potentiel archéologique (archeologie.orleans-metropole).

SICAVOR (Système d'Informations Contextuel sur les Caves et Cavités d'Orléans) est un APR (Appel de Projet Régional), soit une réponse à un appel de projet régional porté par de nombreux laboratoires de la région Centre-Val-de-Loire académique (OSUC, GEHCO) ou non académique, comme le SAMO. Le projet débute en 2015, pour une durée de trois ans, avec pour but de recenser les caves et cavités du sous-sol orléanais pour en évaluer le facteur de risques dans les aménagements urbains. Cependant, le but de ce projet ne s'arrête pas là, car il permet aussi de retracer l'histoire d'un quartier et d'Orléans, en réalisant l'archéologie de l'habitat et de l'espace urbain, et la réponse à des questions de développement dynamique des différents quartiers, en

s'appuyant notamment sur l'estimation de l'épaisseur du sol urbain (anthropique présent sur le sol «géologique »).

Ici, il est question de participer à cette étude d'estimation du sol urbain avec pour thématique principale la quantification du dépôt archéologique sur les paléoterrasses anthropiques ou fluviatiles du quartier Saint-Aignan à Orléans. L'apport de la géologie sera donc important afin de caractériser les différents types de sols et ainsi différencier l'anthropique du naturel tout en trouvant les premières strates géologiques connues dans cette région. Pour cela, deux transects seront en particulier étudiés, pour en réaliser une coupe par la confrontation de deux méthodes de sondages, avec la particularité de réaliser une calibration du pénétromètre par l'utilisation de sondages carottés.

Le travail présenté dans ce document est articulé autour de plusieurs parties qui sont, l'étude du quartier Saint-Aignan, la présentation des résultats, leurs interprétations et la discussion de ces derniers.

II. Étude du quartier Saint-Aignan

A. Site d'étude

Le site étudié est le quartier Saint-Aignan (figure 2), qui se situe dans la partie Est d'Orléans (zone historique). Ce quartier est délimité dans sa partie Nord par la rue de Bourgogne, au Sud par la Loire ; et en Est-Ouest par la rue de la Tour Neuve et l'avenue Gaston Galloux. Une attention particulière sera portée sur deux transects choisis en fonction de l'espace de sondage disponible. Le premier transect est orienté Nord - Sud, allant de la rue Bourgogne au quai Fort Alleaume, et le second transect est orienté Nord-Ouest – Sud-Est, lequel commence au 14 Cloître Saint-Aignan au 7 Bis rue 4 Fils Aymon.



Figure 2 : Cartographie du quartier Saint-Aignan, encadré en rouge, afin de montrer la zone d'étude. Par ailleurs, les lignes noires représentent les deux transects à étudier. Ensuite, les points rouges et marrons nommés Sp sont la représentation des sondages pénétrométriques en jardin et cave, tandis que les points bleus nommés SC permettent de visualiser les sondages carottés.

D'un point de vue géologique, la zone étudiée est estimée comme étant des dépôts artificiels d'après la carte géologique d'Orléans éditée en 1969. Cependant, aux alentours, il est observé du calcaire lacustre de Beauce de l'Aquitainien (environ 20 Ma), surmonté de sables et argiles de l'orléanais en ce qui concerne notre rive de la Loire. La particularité apparente de ce calcaire dans la région est sa karstification qui crée un système de doline relativement important, notamment lié à des circulations d'eaux souterraines.

Enfin, historiquement parlant, le quartier Saint-Aignan avec sa proximité du fleuve et le fait qu'il soit sur le départ du coteau fait qu'il est animé depuis l'Antiquité et a été façonné au fil des époques par les autochtones, pour l'adapter à leur mode de vie (SICAVOR, 2015). Par exemple, à l'Ouest de la zone d'étude, une anomalie Nord-Sud est présente, il s'agit là d'un ancien talweg transformé par les habitants comme fossé de défense jouxtant une muraille dès le IV^{ème} siècle, avec pour fonction la séparation du quartier et du reste de la ville ; il était donc considéré comme faubourg. Quelques siècles plus tard à la fin du Moyen-âge, vers 1480, ce fossé est comblé et de nouveaux remparts sont créés, englobant ainsi notre quartier, avec à l'intérieur la protection de l'enceinte de la collégiale royale Saint-Aignan dont l'un des murs est toujours observable à la maison Louis XI. Ces nouveaux remparts le placent immédiatement au cœur de la ville (Annexe 1). La topographie actuelle est donc

majoritairement liée aux modifications apportées par l'Homme sur la topographie naturelle. Ensuite, à l'Antiquité, il a été montré que le lit de la Loire se trouvait plus au Nord, soit environ sur l'actuel quai Fort-Allisaume, ce qui a pu conduire à des aménagements particuliers pour limiter les crues par exemple. À cette époque, les hommes ont aussi adapté la topographie pour leur implantation, en aménageant des terrasses dans le but de construire, ou encore les exploiter en jardin. Ils ont aussi, dès cette période, exploité le sous-sol avec des systèmes de caves et de carrières servant ainsi à l'extraction pour la construction de l'habitat notamment ou encore au stockage de denrées alimentaires, etc...

Pour finir, l'étude se concentre ici sur les lieux d'interventions suivant pour effectuer des sondages soit à la maison Louis XI, à l'actuel Évêché, au sein du jardin du séminaire, rue Édouard Fournier, rue de Coligny. En vue de cette étude, l'utilisation de plusieurs méthodes d'analyse a été mise en œuvre. Par ailleurs, d'autres sondages réalisés, lors de projets antérieurs, sont exploités (Annexe 2).

B. Procédés

Dans le cadre de ce projet, deux types de sondages sont pratiqués, avec pour chacun une méthode de réalisation différente et des limites à prendre en considération lors de l'étude des résultats. Cependant, d'autres sondages réalisés auparavant par d'autres équipes seront exploités, de manière à avoir un maximum d'informations sur le quartier Saint-Aignan.

1. Sondages carottés

Pour ce projet, les sondages ont été réalisés par une entreprise extérieure au SAMO nommée APPURSOL (figure 2 {SC}).

Tout d'abord, l'avantage de cette méthode est qu'elle permet une étude visuelle de ce qu'il y a en profondeur conférant une appréciation de la composition du sol et donc une compréhension totale ou partielle de ce qui a pu se passer, notamment par l'étude des différents faciès recueillis. De plus, celle-ci ne prend pas en compte la granulométrie et la nature du sol, tout est donc prélevé.

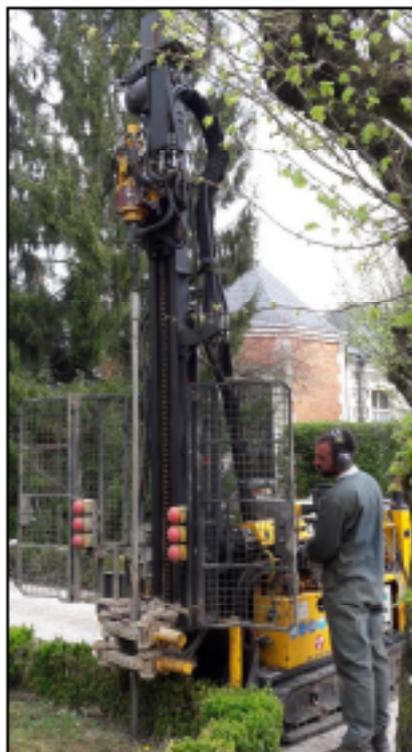


Figure 3 : Photographie du carottier à percussions avec le train de tiges permettant d'atteindre d'importantes profondeurs

Le sondage carotté (SC) est un sondage consistant à prélever la matière locale, ici le sol, en vue de l'étudier plus précisément. Par conséquent, ce type de sondage est destructif, puisqu'il prélève la matière. Dans le cas présent, le sondage a été réalisé avec un carottier à percussions (figure 3). Le procédé consiste à enfoncer un tube de PVC contenu dans une enceinte métallique pour que l'ensemble soit résistant dans le sol. L'enfoncement se fait avec les percussions créées par l'appareil. Une fois rempli, le tube est remonté, cette opération est répétée jusqu'à l'atteinte du substrat (le substrat est ici l'atteinte des premières strates géologiques et non le substrat au sens de socle comme il est défini en géosciences), amenant alors à des carottages réalisés sur plusieurs mètres. Pour la réalisation de celui-ci, les tubes de PVC utilisés ont un diamètre de 100mm, et une longueur de 900mm, ce qui permet un échantillonnage sur une zone assez large. Les tubes de PVC ont donc pour rôle de recevoir le matériel sur une longueur de 900mm. Chaque section de carotte obtenue est annotée de son numéro de sondage, de la profondeur à chacune des extrémités et donc de son orientation (tête et pied) afin de ne pas les interpréter dans un mauvais sens.

Suite à cela, les carottes obtenues sont placées dans un support pour ouverture. À l'aide d'une scie, la carotte est coupée en deux

afin d'obtenir deux demi-sections égales permettant l'observation du matériel récupéré (sédiments) (figure 4). Les demi-sections obtenues ne sont pas toutes les deux observées, une est travaillée et utilisée pour le prélèvement tandis que l'autre reste en archive. L'avantage ici est que le sédiment reste en place, c'est-à-dire que les différents faciès ne se mélangent pas et que les épaisseurs sont approximativement conservées. De manière à avoir une description rigoureuse, des carottes des fiches de descriptions détaillées sont utilisées (Annexe 3).



Figure 4 : Photographie d'une demi-section de la carotte SC3 6,3-7,2 après ouverture. Cette photographie montre bien la présence de différents faciès dans les sondages carottés.

Enfin, les sondages carottés sont réalisés à proximité de sondages pénétrométriques dans le but de réaliser une calibration de ces derniers, pour en finalité pouvoir corrélérer les changements de faciès avec des changements de résistance du sol.

2. Sondages au pénétromètre

Dans le but de quantifier le dépôt archéologique et par conséquent l'épaisseur du sol anthropique avant l'atteinte des strates géologiques, des sondages pénétrométriques (SP) sont réalisés par l'équipe (figure 2 (SP)).

Le pénétromètre utilisé est de type PANDA (Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur). L'avantage de ce type d'appareil est qu'il permet la réalisation de sondages non destructifs et peu onéreux. De plus, le fait que ce matériel soit léger et peu encombrant le rend très facilement utilisable en zone urbaine, ce qui est l'idéal dans le cas présent.

Cette méthode de sondages est ici réalisée par l'utilisation de l'appareil PANDA 2 comportant un moniteur enregistrant la résistance de pointe Q_d en MPa (Mégapascal) et la profondeur en m (Mètre), des tiges de 50cm chacune reliées à une tête de train de tige, et un marteau (figure 5).



Figure 5 : Photographie du PANDA avec la représentation des tiges, de la tête du train de tiges, du moniteur et du boîtier.

Le principe est le suivant, par battage manuel avec le marteau calibré pour l'appareil sur la tête de train de tiges, les tiges sont enfoncées dans le sol jusqu'à refus à l'enfoncement (atteinte du substrat géologique). La première tige du dispositif est munie d'une pointe de 2 cm², c'est donc à partir de cette surface que le moniteur enregistre à chaque coup la résistance de pointe Q_d en fonction de l'enfoncement de ces dernières.

Il est important de souligner que l'avantage spécifique de cet appareil est qu'il ne prend pas en compte l'énergie liée au battage manuel. En effet, le PANDA 2 a la particularité de disposer d'un capteur dans la tête du train de tiges déduisant l'énergie cinétique apportée lors du battage.

Pour finir, le moniteur enregistre la résistance de pointe Q_d par calcul de la formule dite des « hollandais » (LAURENT, 2007). En cours de sondages, ou bien à la fin, il reste possible de visualiser les résultats sous forme de pénétrogrammes (graphiques) montrant la résistance de pointe Q_d en fonction de la profondeur,

permettant ainsi de juger si l'atteinte du substrat semble avérée ou non.

Ensuite, les données enregistrées sont transférées sur ordinateur par le logiciel PANDA, permettant ainsi l'exploitation des résultats obtenus au cours des différents sondages par la réalisation des pénétrogrammes et d'un tableau dynamique croisé sur Excel. Par la suite, une mise à l'échelle des pénétrogrammes sur Adobe Illustrator est réalisée pour une comparaison plus facile, en prenant en compte leur altitude de départ lorsque ceci est possible.

En conclusion, l'intérêt de ces deux méthodes est de pouvoir par la suite déterminer la nature des différentes strates traversées avec le pénétromètre jusqu'à l'atteinte du substrat. C'est pourquoi, les sondages carottés ont été réalisés à proximité des sondages pénétrométriques puisqu'ils permettent la visualisation de ces strates. La confrontation des résultats de chacune des méthodes en est d'autant plus intéressante qu'elles peuvent probablement informer sur la nature des faciès traversés par les sondages pénétrométriques seuls. En outre, de nombreux sondages géotechniques réalisés par d'autres équipes sont utilisés.

C. Topographie

En vue de comparer au mieux les différents sondages et comprendre la morphologie du quartier, des relevés topographiques sont réalisés.



Figure 6 : Niveau optique sur trépied utilisé pour les relevés topographiques

Pour ce faire, un niveau optique sur trépied est utilisé (figure 6). Le procédé est simple, à partir de la base de données SIGOR (SIG Orléans) il faut repérer les points cotés à la norme MGF (Niveau Géographique Français) proches des lieux de sondage, afin de les utiliser comme point de référence. Les points cotés sont repérables par des clous positionnés au sol ; pour chacun, il existe un numéro de point permettant ainsi de retrouver sa fiche (Annexe 4) et donc son altitude MGF relevée. À partir des étapes précédentes, il faut placer le niveau optique à un endroit où de préférence, il est possible de viser le point coté et le lieu de sondage. Si ce n'est pas le cas, des étapes intermédiaires sont nécessaires. Après avoir placé le niveau, une personne se positionne au point avec la mire pour déterminer la hauteur de référence au point ; la mire est ensuite positionnée ailleurs pour déterminer la hauteur présente à ce point. Comme il ne s'agit pas du point de sondages, le niveau optique est déplacé, ce point est de nouveau mesuré, puis la mire est positionnée au point de sondage. Il est nécessaire de répéter cette étape jusqu'à ce que le lieu de sondage soit atteint. Suite à cela, par le biais de calculs simples, l'altitude au point de sondage est déterminée en norme MGF avec une petite incertitude liée à la méthode, mais qui reste tout de même négligeable comparée à l'altitude donnée par des logiciels dont le maillage est trop important pour visualiser le phénomène de terrasses.

Pour finir, les relevés sont faits pour la majorité des sondages ce qui permet une meilleure compréhension des sondages réalisés.

III. Résultats

Suite aux sondages réalisés, la caractérisation du dépôt archéologique est désormais possible. En effet, comme dit précédemment, la complémentarité des deux types de sondages permet une caractérisation du dépôt par calibration.

A. Sédimentaires

Les sondages carottés réalisés dans le jardin de l'évêché et derrière la maison Louis XI présentent différents faciès révélés suite à l'étude des carottes de chacun d'eux. Les carottes montrent des profondeurs sensiblement variables de 900cm, 360cm et 270cm, ce qui donne déjà une idée de la morphologie de l'endroit. Les données sont exploitées en centimètres dans le but de garder la précision des épaisseurs de faciès. Ces épaisseurs, sont mesurées par rapport au toit de la carotte et non du niveau NGF. La description de ces résultats se fait à partir de fiches comme dit précédemment (annexe 3) en prenant en compte la texture, la couleur d'après la charte Munsell (charte de pédologie reconnue internationalement permettant de retranscrire les couleurs des faciès en RVB sur Adobe Illustrator), ainsi que sa composition en éléments grossiers.

1. Description des carottes

Tout d'abord, le sondage SC1 réalisé à l'arrière de la maison Louis XI, c'est-à-dire au 7 bis rue des quatre fils Aymon (figure 2), correspond à la partie médiane du quartier Saint-Aignan. Ce sondage présente 270cm de sédiments avant une atteinte présumée du substrat géologique (figure 7). Il est observé 4 faciès distincts, avec pour commencer de la terre végétale sur 125cm, celle-ci contient du mobilier archéologique symbole d'une anthropisation du lieu à partir de 120cm environ. Ensuite, un niveau de transition, puis un niveau sableux sont présents ils présentent les similarités d'un remblai, ce qui ne paraît pas impossible car en effet, une voie de circulation semble se dessiner sous ces niveaux montrant déjà une anthropisation du lieu. De plus, le faciès montre une texture et une consolidation proche de ce genre de commodités. En partie basale la présence de sable grossier avec des graviers symbolise une érosion mécanique fluviale qui laisse supposer à un remblai réalisé à partir de matériaux proximaux. L'hypothèse d'un dépôt de crue est ici écartée au vue de la différence altimétrique avec la Loire. L'intégralité de ces unités repose sur le substrat présenté sous forme de marne calcaire.

Ensuite, le sondage SC2 est réalisé plus au Sud-Est de la parcelle où a été effectué SC1. Celui-ci montre un profil tout à fait différent (figure 7). Seulement 3 unités sont observées, avec comme le précédent sondage, en premier lieu la terre végétale sur 228cm avec une granulométrie variable, surmontant un niveau de transition plus grossier avec des charbons. La partie basale à partir de 252cm est composée du substrat géologique, soit du calcaire altéré avec de nombreuses lentilles argileuses ; il s'agit donc de marne calcaire tout comme le sondage précédent.

Pour finir, le sondage SC3 est mis en oeuvre dans le jardin de l'Évêché au 14 cloître Saint-Aignan, soit au Nord-Ouest de la parcelle précédente (figure 2). Ce sondage de 900cm (figure 7) révèle de nombreuses unités avec en partie basale le substrat de même nature que celui des sondages précédents. En partie sommitale, il y a à aussi de la terre végétale sur 165cm, entrecoupée par une unité plus claire et un petit niveau de remblai friable. Sur le reste de la carotte, il est observé une alternance d'unités avec des niveaux de remblai. Cependant de 506cm à 540cm, il est observé un marbre cabé tout comme de 720 à 785cm ; il s'agit d'une alternance de remblais avec une même unité sédimentaire se répétant à intervalle régulier qui pourrait être liée à une occupation particulière du sol nécessitant un remblayage régulier. Ensuite, à 785cm, il y a un faciès de sol rubéfié, marqueur d'un incendie proche ou la présence d'un brasier. Le substrat géologique est ici atteint à 875cm de profondeur.

En conclusion, il est observé une épaisseur de dépôt variable d'un sondage à un autre, ce qui peut être lié à une activité anthropique différente ou bien à des événements ponctuels propres à chacun des lieux.

2. Interprétation des observations

Ces sondages carottés mettent en évidence des phases d'occupation puis d'abandon de la surface par l'Homme. En effet, il est retrouvé dans ces trois carottes du mobilier archéologique tel que des ardoises, des briques, du mortier et des charbons, preuve d'une anthropisation des lieux ou tout du moins proximale. Par ailleurs, ce mobilier archéologique permet une datation relative des sondages, car pour l'ardoise par exemple, il s'agit d'un matériau utilisé pour la couverture notamment postérieurement au XV^{ème} siècle, c'est pourquoi sa présence dans la carotte indique que les niveaux supérieurs sont post XV^{ème} siècle.

De même, il est possible de réaliser ce type de datation par l'observation des briques et tuiles car au cours du temps les techniques de fabrication ont évoluées ; il y a donc une période de début d'utilisation propre à chacune. D'autre part, il est observé des faciès plus foncés que d'autres pouvant correspondre à des périodes d'abandon, car ils sont supposés plus organiques. A contrario, l'observation d'un sol plus clair est souvent accompagnée d'un remblai qui est considérée comme une phase d'occupation par l'apport de matériaux extérieurs et non liés à une activité organique.

Il est donc possible de dire que pour SC1 au-dessus de 70cm, les sédiments sont post XV^{ème} siècle. Pour SC2, c'est au-dessus de 125cm, et SC3 vers 220cm. Par conséquent, sur une période approximative de temps, la quantité de dépôt est variable ; ce phénomène peut-être dû à une différence d'utilisation de la parcelle ou bien à un événement local.

En revanche, l'observation de fragments de briques pousse à une datation bien antérieure car, en effet, dans l'enceinte du quartier Saint-Aignan, il a déjà été découvert des fragments de ce type de matériau datant du Bas-Empire (IV^{ème}, V^{ème} siècle). Cette information n'est donc pas négligeable car ces fragments se retrouvent en général en limite proche du substrat géologique, ce qui permet de déterminer la durée nécessaire à la création de la colonne de sol par l'Homme.

Enfin, les sondages présentent des profondeurs variables alors qu'ils sont relativement proches. En effet, le sondage SC3 présente 900cm de sédiments, alors que SC1 et SC2, réalisés dans une parcelle au Sud-Est de SC3, sont trois fois moins importants. Par conséquent, il peut être supposé qu'il y a une anomalie locale, car d'autres sondages réalisés au 14 cloître Saint-Aignan (Annexe 2) présentent des profondeurs nettement similaires, sauf dans le cas où le sondage a été réalisé au-dessus de la voute de la cave de l'évêché, qui dans ce cas arrête le sondage prématurément. Plusieurs hypothèses sont possibles pour expliquer cette différence, notamment la réalisation d'une carrière de calcaire à ciel ouvert (open-pit) ou en descenderie. Ceci peut aussi être lié à un phénomène naturel tel que les dolines liées aux circulations d'eau souterraines, que les autochtones auraient comblés avec du matériel local ; cependant, ceci reste incertain.

La description de ces sondages apporte un point-de-vue différent permettant probablement de relever à l'aide des pénétrogrammes des résistances caractéristiques des faciès les plus retrouvés.

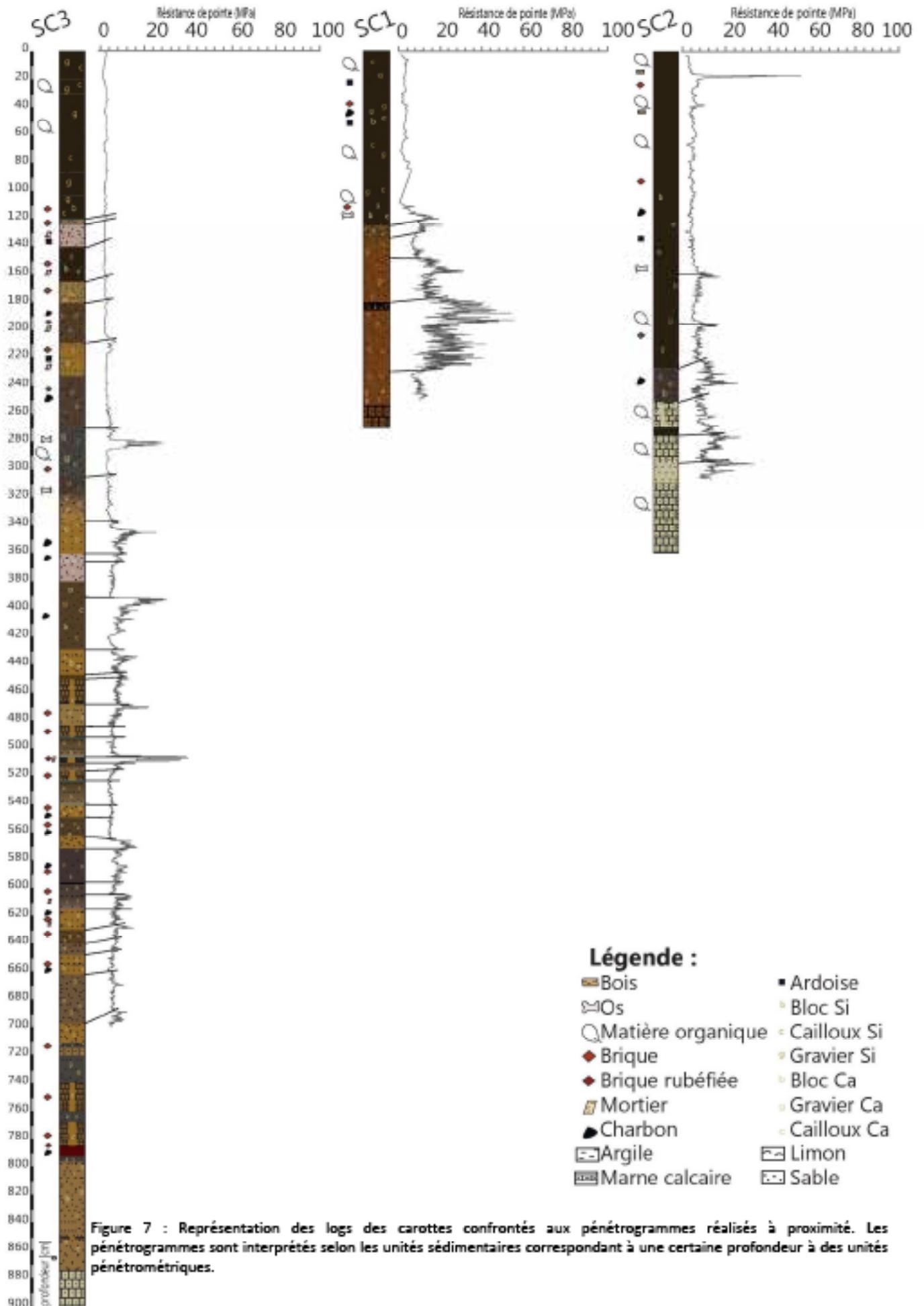


Figure 7 : Représentation des logs des carottes confrontés aux pénétrogrammes réalisés à proximité. Les pénétrogrammes sont interprétés selon les unités sédimentaires correspondant à une certaine profondeur à des unités pénétrométriques.

B. Pénétrométriques

De nombreux sondages pénétrométriques ont été réalisés sur plusieurs parcelles du quartier Saint-Aignan (figure 2), aussi bien sur les terrasses que dans les caves, dans le but de caractériser le dépôt archéologique là où des appareils, tel que le carottier à rotoperçusion, ne peuvent pas aller. Comme dit précédemment, les résultats sont représentés sous forme de pénétrogrammes mis à l'échelle topographique pour ceux dont le relevé a pu être effectué afin de visualiser approximativement la morphologie de la zone d'étude.

1. Données réalisées

La majorité des données exploitées ont été réalisées lors de ce stage.

Tout d'abord, il est nécessaire de commencer par les sondages pénétrométriques pour lesquels il y a une connaissance des unités sédimentaires en profondeur, de manière à avoir une référence de description. Dans un premier temps, les pénétrogrammes SP 5, 6 et 7 font partis des sondages réalisés à proximité d'un sondage carotté; il est donc aisé de recouper les UP (Unités Pénétrométriques) avec les US (Unités Sédimentaires), et donc d'identifier les types de sols présents. Ces pénétrogrammes avant interprétation, sont présentés en annexe 5. En figure 7, les mêmes résultats sont présentés mais interprétés, il est constaté que certaines US n'ont pas de correspondance avec le signal du pénétrogramme, il est de même avec des UP qui n'ont pas d'US associées, ce qui peut être lié à des unités ayant les mêmes propriétés mécaniques, ou bien à des artefacts rencontrés ayant une signature particulière. Par exemple, pour le sondage SP5, six US et six UP sont remarquables. Cependant, un décalage du toit du faciès est observé, ce qui est sûrement dû à une variation d'épaisseur dans les sondages carottés, car n'étant pas complètement rempli et bien rebouché l'espace libre a pu étirer les faciès.

Ensuite, comme précédemment, les sondages SP 1, 2, 3 et 4 sont étudiés. Réalisés sur la fouille archéologique à côté de l'église Saint-Everte, plus au Nord du quartier Saint-Aignan (annexe 6), ces sondages ont eux aussi la possibilité d'être utilisés comme références car ils peuvent être confrontés aux unités sédimentaires, puisque le sol était visible en coupe. Cette étude permet un apport de données supplémentaires pour la détermination des valeurs de résistance Qd moyenne pour les différents types de sol. Les UP déterminées sur les différents sondages pénétrométriques sont visibles en figure 8.

La correspondance des UP et des US est importante car elle donne la possibilité de déterminer des valeurs de résistance de pointe (Qd) moyenne pour chaque type de sol, permettant ainsi l'interprétation des pénétrogrammes réalisés à l'aveugle, c'est-à-dire pour lesquels aucun profil sédimentaire n'est réalisé. Pour ce faire, dans un tableau dynamique croisé regroupant les sondages SP 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7, il est affecté aux valeurs de Qd en fonction de la profondeur les types de sols correspondants, déterminés dans les carottes ayant une relation avec les UP. C'est à partir de cela que les valeurs suivantes sont déterminées : les valeurs moyennes de Qd, de la profondeur et de l'altitude, l'écart-type du Qd, le mini et le maxi des valeurs de Qd (annexe 7). À partir des données calculées dans le tableau présenté en annexe 7, il est possible de calculer la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation pour chaque unité ainsi que son min et son max, les résultats obtenus dans la figure 10 montrent des propriétés mécaniques différentes pour chaque type de sédiments ce qui permettra par la suite une analyse fine des pénétrogrammes. Les valeurs caractéristiques qui en ressortent sont notamment celles de la terre végétale avec une moyenne de Qd d'environ 5,11 MPa, des remblais avec une moyenne de 7,78 MPa, l'argile sableuse et des marnes calcaires avec des valeurs respectives de 6,61 MPa et 11,73 MPa. Cependant, il est aussi remarquable que les niveaux tels que les remblais et les niveaux anthropiques peuvent être regroupés, car le remblai est par définition anthropique. Grâce à cela, il est désormais possible de déterminer la nature des UP délimitées comme montré sur la figure 9

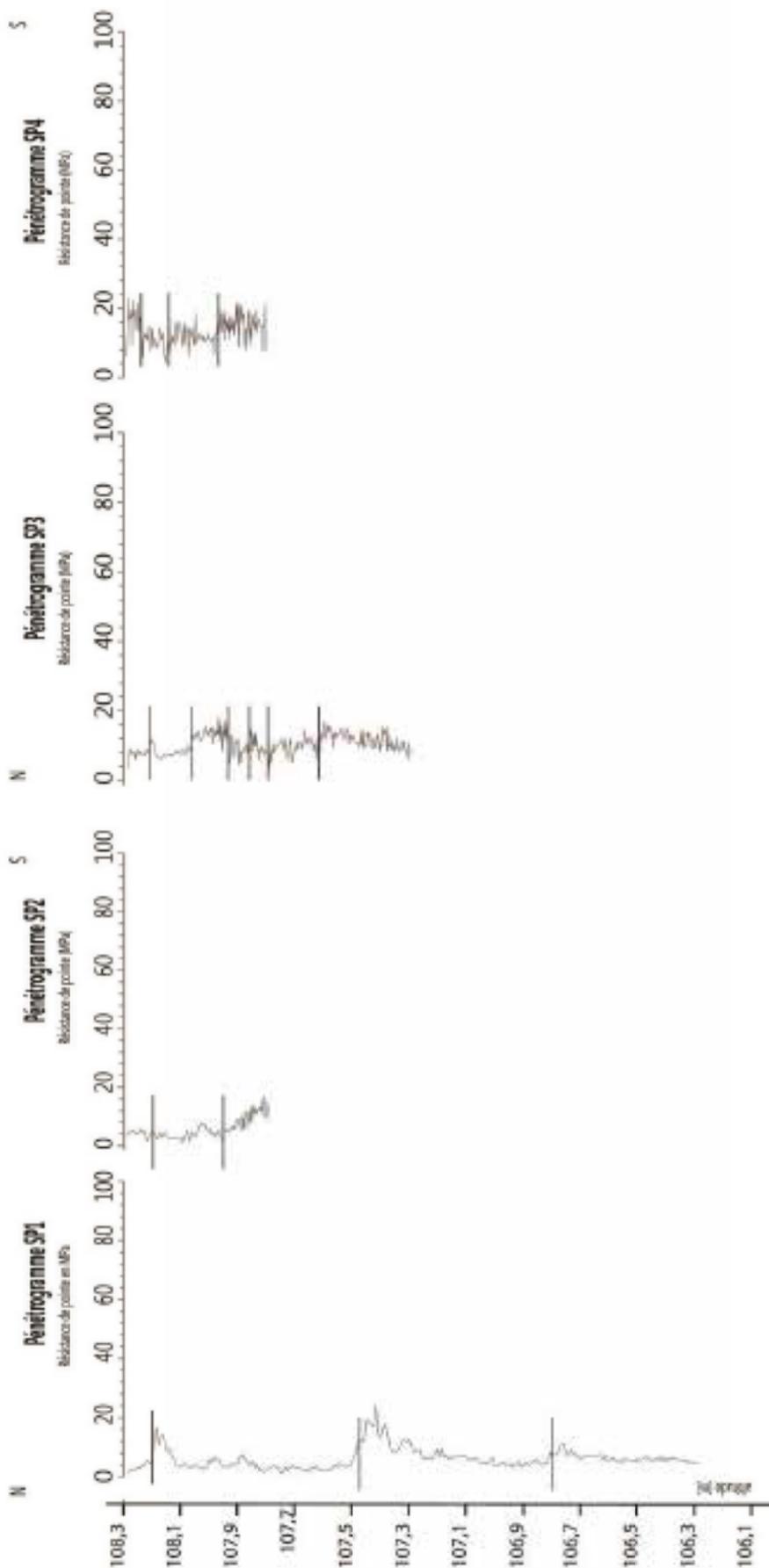


Figure 8: Pénétragrammes SP 1, 2, 3 et 4 interprétés, ils ont été réalisés majoritairement dans des niveaux géologiques à proximité de l'église Saint-Euverte à Orléans, zone qui se situe en dehors du quartier d'étude.

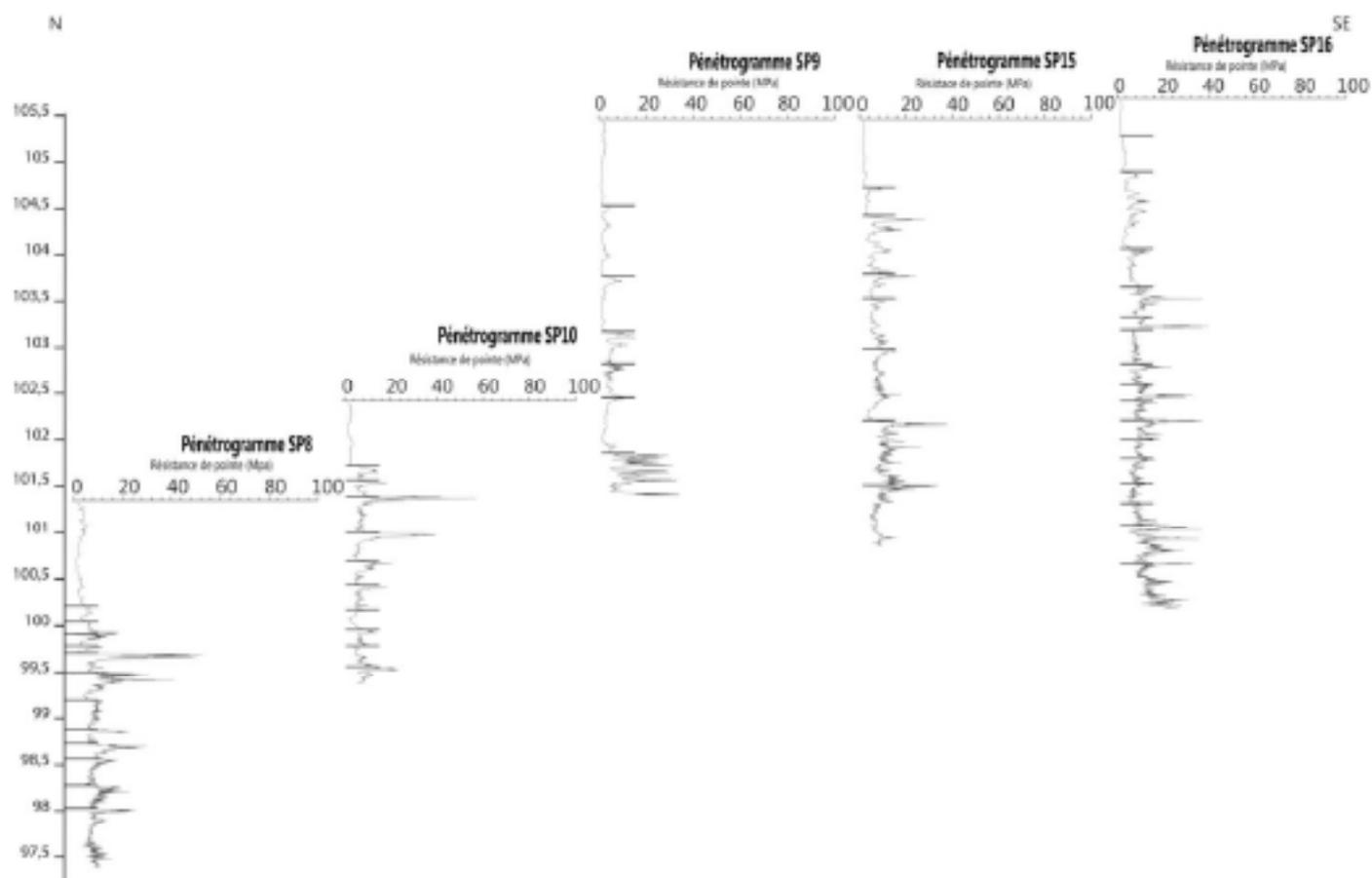


Figure 9 : Pénétrogrammes interprétés des sondages : SP 8, 9 et 10 réalisés au 4 rue Coligny sur des terrasses ainsi que les SP 15 et 16 réalisé au séminaire interdiocésain à Orléans dans le quartier Saint-Aignan

	Moyenne Qd (MPa)	Écartype Qd (MPa)	CV Qd		Moyenne Qd (MPa)	Écartype Qd (MPa)	CV Qd		Moyenne Qd (MPa)	Écartype Qd (MPa)	CV Qd
Terre végétale	5,94	4,62	0,78	Sable grossier	11,51	2,23	0,19	Marne calcaire	10,90	1,69	0,16
	7,18	5,42	0,75		13,58	3,84	0,28		12,57	4,50	0,36
	2,21	0,53	0,24								
Min	2,21	0,53	0,24		11,51	2,23	0,19		10,90	1,69	0,16
Max	7,18	5,42	0,78		13,58	3,84	0,28		12,57	4,50	0,36
Moyenne	5,11	3,52	0,59		12,55	3,03	0,24		11,73	3,10	0,26
Niveau anthropique	4,58	3,08	0,67	Sable très grossier	17,37	6,82	0,39	Transition	8,37	2,05	0,25
	10,11	2,97	0,29		21,63	9,08	0,42		11,44	4,72	0,41
Min	4,58	2,97	0,29		17,37	6,82	0,39		8,37	2,05	0,25
Max	10,11	3,08	0,67		21,63	9,08	0,42		11,44	4,72	0,41
Moyenne	7,35	3,03	0,48		19,50	7,95	0,41		9,91	3,39	0,33
remblai	8,26	4,48	0,54	Argile sableuse	6,17	1,43	0,23	Voie de circulation	32,32	9,23	0,29
	7,92	4,64	0,59		6,99	3,79	0,54		9,62	0,44	0,05
remblai consolidé	9,16	6,13	0,67		7,28	3,53	0,49	Min	9,62	0,44	0,05
Remblai friable	5,77	1,96	0,34		6,02	1,45	0,24	Max	32,32	9,23	0,29
Min	5,77	1,96	0,34		6,02	1,43	0,23	Moyenne	20,97	4,83	0,17
Max	9,16	6,13	0,67		7,28	3,79	0,54				
Moyenne	7,78	4,30	0,53		6,61	2,55	0,38				

Figure 10 : Résultats du tableau de traitement croisé permettant de déterminer la nature des unités pénétrométriques en fonction de leur moyenne de Qd.

2. Interprétation des données PANDA

À l'aide des résultats obtenus avec la figure 10, les valeurs de QdI moyennes sont désormais disponibles, permettant la détermination de la nature des UP choisies en fonction de leur résistance. Pour chaque sondage, les UP sont délimitées sur les figures 7, 9, 11 et en annexe 8 par des traits tracés sur les pénétrogrammes. Ces délimitations montrent des changements de propriétés mécaniques qui sont désormais identifiables.

Pour ce faire, les différentes UP sont placées dans un tableau croisé dynamique (annexe 9) permettant de calculer leurs épaisseurs moyennes, leurs QdI moyen, min et max. Ensuite, par comparaison des valeurs de QdI moyen avec les données récoltées au II.B.1 (figure 10), la nature des UP pour chaque sondage est déterminée. Par la suite, les sondages détaillés seront ceux réalisés sur les terrasses ; seulement un réalisé en cavité sera présenté ; ils sont toutes fois observables en données brutes dans l'annexe 8 car il ne s'agit pas du sujet traité ici.

Dans un premier temps, les sondages utilisés comme référence sont ceux réalisés au 14 cloître Saint-Aignan et au 7 bis rue des 4 fils Aymon (figure 7). La description de ces derniers va être très courte, car elle est relativement détaillée dans le tableau présent en annexe 7. De plus, la figure 7 montre les pénétrogrammes à côté des logs, ce qui en fait une interprétation déjà très complète. Il est donc remarqué que le sondage SP7 ne couvre pas l'intégralité de la colonne sédimentaire par manque de temps. Il n'y a donc pas d'altitude supposée pour l'atteinte du substrat sans l'étude de SC3. Pour les sondages SP5 et 6, l'atteinte se fait respectivement à 2,28m et à 2,40m. La variation est donc faible pour SP5 et 6 ; réalisés à seulement 7m l'un de l'autre, cela est compréhensible. Ces résultats montrent une faible anthropisation du lieu montrée par la faible épaisseur de dépôt, il est donc supposé que ce lieu a toujours eu une fonction de jardin.

Dans un second temps, l'étude des sondages pénétrométriques réalisée à l'aveugle est menée.

Tout d'abord, concernant les sondages SP 8, 9 et 10 (figure 9) effectués sur les terrasses (terrain sur 3 niveaux) au 4 rue de Coligny (figure 2), SP8 est le sondage réalisé sur la terrasse d'altitude la plus faible, SP9 sur celle étant le plus en altitude et SP 10 celle ayant un niveau légèrement supérieur à SP8. Il est tout d'abord constaté en partie sommitale sur ces trois sondages de faibles valeurs de QdI avec une moyenne variable de 2 MPa à 4 MPa environ, qu'il s'agit donc de terre végétale sur 1,41m pour SP8, 2,364m pour SP9 et 0,70m pour SP10. L'unité suivante ne semble pas être observée sur SP10 ; il s'agit d'un niveau anthropique d'épaisseur variable allant de 0,22m pour SP8 à 1,29m pour SP9. La quantité de dépôt archéologique est donc ici variable d'une terrasse à l'autre. Le niveau du substrat géologique considéré dès l'atteinte supposée des sables se fait vers 3,08m pour SP8, soit 98,678m NGF, vers 2,65m pour SP9, soit 98,818m NGF, et pour finir le naturel semble être visible dès 1,70 sur SP10 soit 102,984m NGF. La hauteur des niveaux géologiques est variable sur ces terrasses ; cependant, la différence entre les terrasses ayant une altitude initiale relativement différente, l'atteinte des premières unités géologiques est proche ; l'Homme a donc eu un impact non négligeable sur ce lieu.

Ensuite, le sondage SP14 (figure 11), réalisé au 8 rue Édouard Fournier sur une terrasse ayant pour altitude de départ 103,16m NGF. De nombreuses unités sont observées, notamment de la terre végétale, des niveaux anthropiques, puis des niveaux de sable très grossier, argilo-sableux, et de nouveau des niveaux anthropiques avant une atteinte à 90,763m NGF du substrat géologique. Il s'agit là aussi d'un lieu où l'impact anthropique a été notable car avec 12,4m de dépôt archéologique sur 12,46m l'Homme a modelé l'environnement. De plus, lors de la réalisation du sondage, le sol semblait relativement humide en profondeur, ce qui peut être lié à une fosse créée par les autochtones, ou bien par des phénomènes naturels tels que de la karstification. Cependant la présence proximale de deux caves et de signaux de types remblais laissent penser que ceci serait plutôt anthropique.

Pour finir, les sondages SP 15 et 16 (figure 9) réalisés au séminaire interdiocésain, 1 cloître Saint-Aignan à Orléans dans la partie Sud-Ouest de la zone d'étude. Il est important de notifier que ce lieu se situe en bord des quais de Loire. Cependant, il est montré une différence topographique de 9m entre le quai et la terrasse ; l'atteinte du substrat est donc importante pour comprendre la morphologie du lieu. Ces deux sondages, bien que débutant à une altitude légèrement différente, présentent de nombreuses similarités de faciès, avec notamment plusieurs niveaux anthropiques avant l'atteinte du substrat géologique qui se fait approximativement à la même hauteur soit 101,577m NGF pour SP15 et 101,558m NGF pour SP16. La différence de 10m entre le substrat géologique observé Quai Fort Allouaine et le lieu de ces sondages peut être dans un premier temps liée à l'érosion mécanique par le paléo-cheminement de la Loire, puis à l'Homme, lorsque l'enceinte du cloître fut érigée au Haut-Moyen Age.

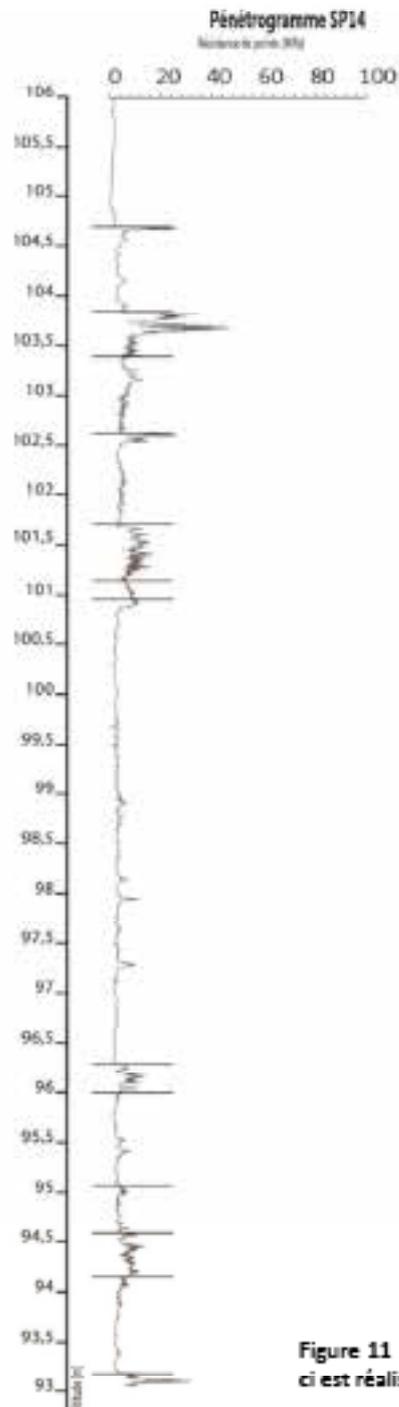


Figure 11 : Pénétrogramme interprété, celui-ci est réalisé au 8 rue Édouard Fournier

3. Cavités

Trois de nos sondages ont été réalisés dans des cavités afin de caractériser le dépôt archéologique dans celles-ci ; n'étant pas ici le sujet, les pénétrogrammes interprétés sont présent en annexe 3.

L'un des résultats est tout de même présenté afin de montrer qu'il y a un dépôt nettement inférieur dans ce type de lieux, notamment lié à son encaissement et à l'activité humaine réduite (entre position de denrée, commerce,...), sauf dans le cas de carrière, où l'extraction du calcaire a généré quelques dépôts.

L'exemple va se porter sur le sondage SP11, réalisé dans la carrière du 4 rue Coligny à Orléans (figure 2). Ce sondage présente deux types d'unités : tout d'abord un niveau dit anthropique, plutôt en terre battue (argile compactée) compactée sous l'effet des activités humaines, puis à 0,17m un signal de calcaire plutôt massif est obtenu avec des Qd proche de 30MPa, ce qui est non négligeable.

En plus des données déjà traitées, d'autres sont utilisées afin de mettre en avant le dépôt archéologique dans le quartier Saint-Aignan.

C. Autres données

L'utilisation de données de sondages géotechniques complémentaires (Annexe 1) est utilisée dans le but de comprendre d'avantage la morphologie du quartier Saint-Aignan et ainsi avoir un maximum d'information pour la réalisation des transects.

Les données du 18 quai Fort Alleaume, réalisées par Amélie LAURENT en 2015 sont notamment exploitées. En ce lieu, il a été effectué des sondages carottés et pénétrométriques n'indiquant pas les mêmes profondeurs. En effet, le sondage pénétrométrique P1 est arrêté après 0,7m pour refus à l'enfoncement montré par des valeurs de 50MPa pouvant être lié à des maçonneries. (LAURENT, 2015).

Les résultats présentés (Figure 12) montrent de nombreux faciès anthropiques datés de l'Antiquité (LAURENT, 2015) avant l'atteinte du substrat géologique, ce qui montre une forte activité humaine sur le quai de Loire.

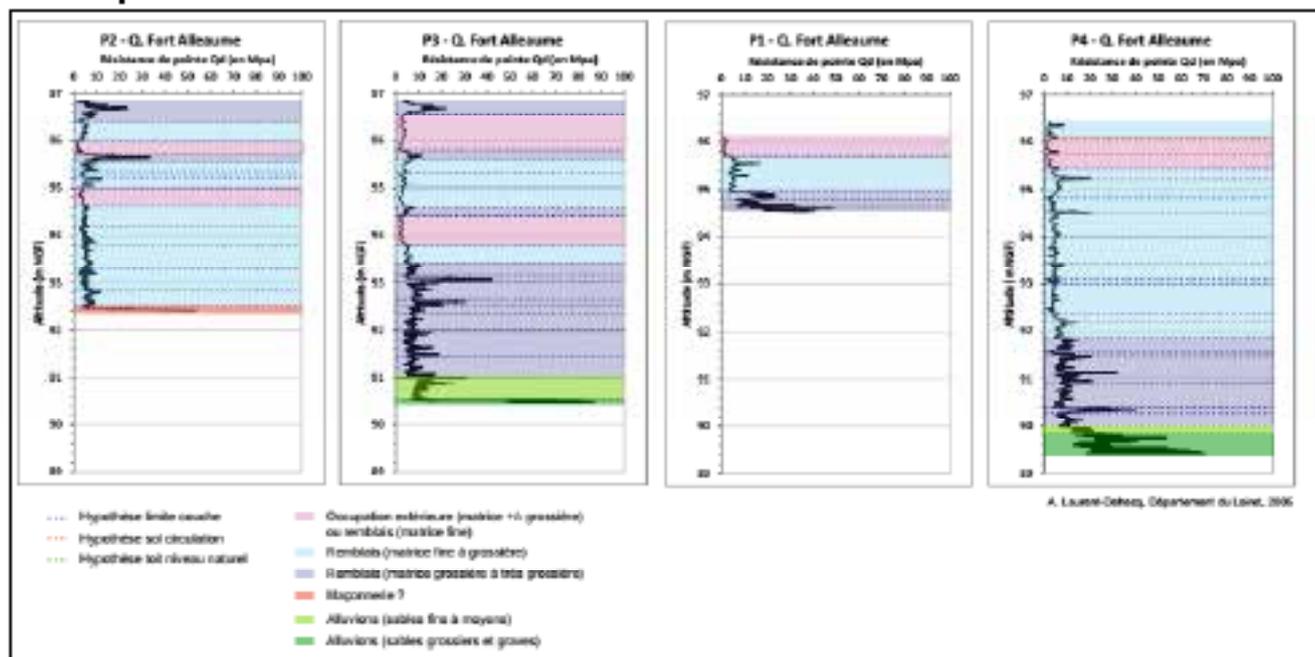


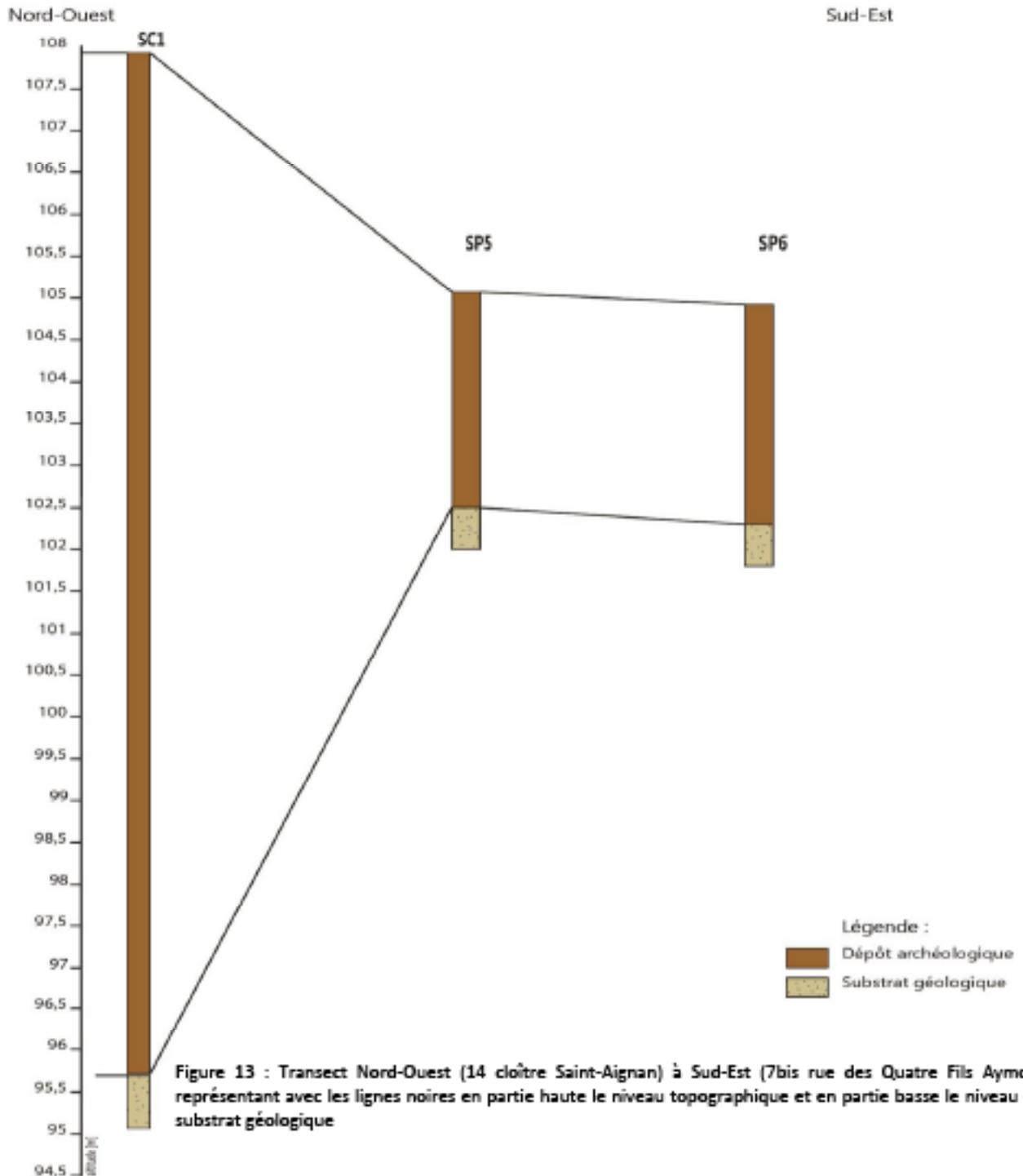
Figure 12 : Résultats des sondages pénétrométriques du 18 quai Fort Alleaume (LAURENT, 2015).

IV. Discussion

Les sondages réalisés au sein du quartier Saint-Aignan et leur interprétation ont permis de mettre en évidence une variation topographique qui n'est pas seulement naturelle, mais aussi liée à l'Homme. Pour comprendre plus simplement la morphologie de ce quartier, deux transects sont réalisés.

A. Transect Nord-Ouest – Sud-Est

Ce transect a pour point de départ le 14 Cloître Saint-Aignan, (lieu de réalisation des sondages SP7 et SC3) et se termine au 7 bis rue des 4 Fils Aymon (lieu de réalisation des sondages SP5, 6 et SC1, 2).



Cette coupe montre une différence du niveau du substrat géologique qui peut être tout aussi bien anthropique que naturelle. Comme dit dans la partie III.A.2, plusieurs hypothèses sont envisageables pour la partie Nord-Ouest, où ont été réalisés les sondages SE3 et SP7 ; le phénomène « d'effondrement » par rapport à la partie Sud-Est peut être lié à un phénomène de doline ou bien à l'effondrement d'une cavité. Cependant, les sondages géotechniques réalisés par d'autres équipes montrent sur cette parcelle cette même anomalie. C'est pourquoi les hypothèses retenues ici sont une activité de carrière remblayée ou bien une doline. Ensuite, en terme de dépôt archéologique, il est ici montré que celui-ci est variable avec une tendance à augmenter vers le Sud-Est, il s'agit peut-être d'une morphologie de terrasses qui commence à se dessiner.

Pour compléter ces informations et comprendre d'avantage la zone d'étude un second transect est réalisé en Nord-Sud plus à l'Est du premier (figure 1)

B. Transect Nord-Sud

Ce transect débute au Nord, rue de Bourgogne et s'étend vers le Sud en passant par les sondages SP8, 9, 10, et 14 ; SP12 et 13 ne sont pas pris en compte ici car dans la thématique des paléoterrasses du quartier, ces sondages réalisés en cave donnent une image faussée de l'illustration du substrat géologique. Le résultat obtenu est présenté figure 14.

Sur cette zone, les terrasses se dessinent surtout dans la partie Sud, soit à proximité de la Loire ; ces terrasses peuvent donc être d'origines fluviales. Cependant le maximum d'altitude du substrat et son minimum soulignent une différence de plus de 10 mètres. Par ailleurs, il a été déterminé qu'à l'Antiquité le lit de la Loire se trouvait plus au Nord, soit au niveau de l'actuel quai Fort Alloume, ce qui explique le dénivelé présent à cet endroit. En ce qui concerne les autres terrasses étant au départ du coteau, il se peut qu'elles résultent d'aménagements anthropiques surtout que celles-ci se trouvent en un seul et même lieu.

Ensuite, en ce qui concerne le dépôt archéologique, il reste approximativement constant, avec tout de même une légère augmentation vers le Sud, si le premier résultat n'est pas pris en compte au vue du fait qu'il s'agisse d'une anomalie locale. Ce qui montre une activité humaine constante dans cette partie du quartier, c'est-à-dire avec peu de phases de démolition ou remblai, ce qui apporte peu de matériel. Cette partie de la ville est habitée depuis le IV^{ème} siècle, c'est pourquoi les activités humaines étaient particulièrement présentes sur cette zone.

En conclusion, les deux transects montrent un dépôt archéologique similaire d'environ 5 mètres, avec certaines périodes d'occupation et d'autres d'abandon, ce qui montre une activité humaine ayant une production de sol moyenne raisonnable au vue de la période d'occupation du quartier. Ensuite, en ce qui concerne les paléoterrasses, certaines semblent se dessiner à proximité de la Loire. C'est pourquoi à quelques mètres du fleuve il est considéré qu'elles soient d'origine fluviales, puis anthropique avec l'aménagement des remparts, alors que celles présentant plus au Nord seraient plutôt anthropiques afin d'aménager le début du coteau ou le quartier en fonction de la construction des enceintes au cours du temps.

C. Critiques

Les résultats obtenus par la corrélation de la sédimentologie et du pénétromètre semblent cohérents. Toutefois, le nombre de sondages réalisés est insuffisant pour permettre une compréhension fine des facteurs créant ces terrasses. Par ailleurs, ces sondages ont permis de remarquer un dépôt archéologique approximativement constant dans les lieux sondés, bien que les sondages septentrionaux et méridionaux montrent une quantité de matière importante. Il serait donc intéressant de réaliser d'avantage de sondages carottés ; cependant, le milieu urbanisé complique la mise en place d'un tel procédé.

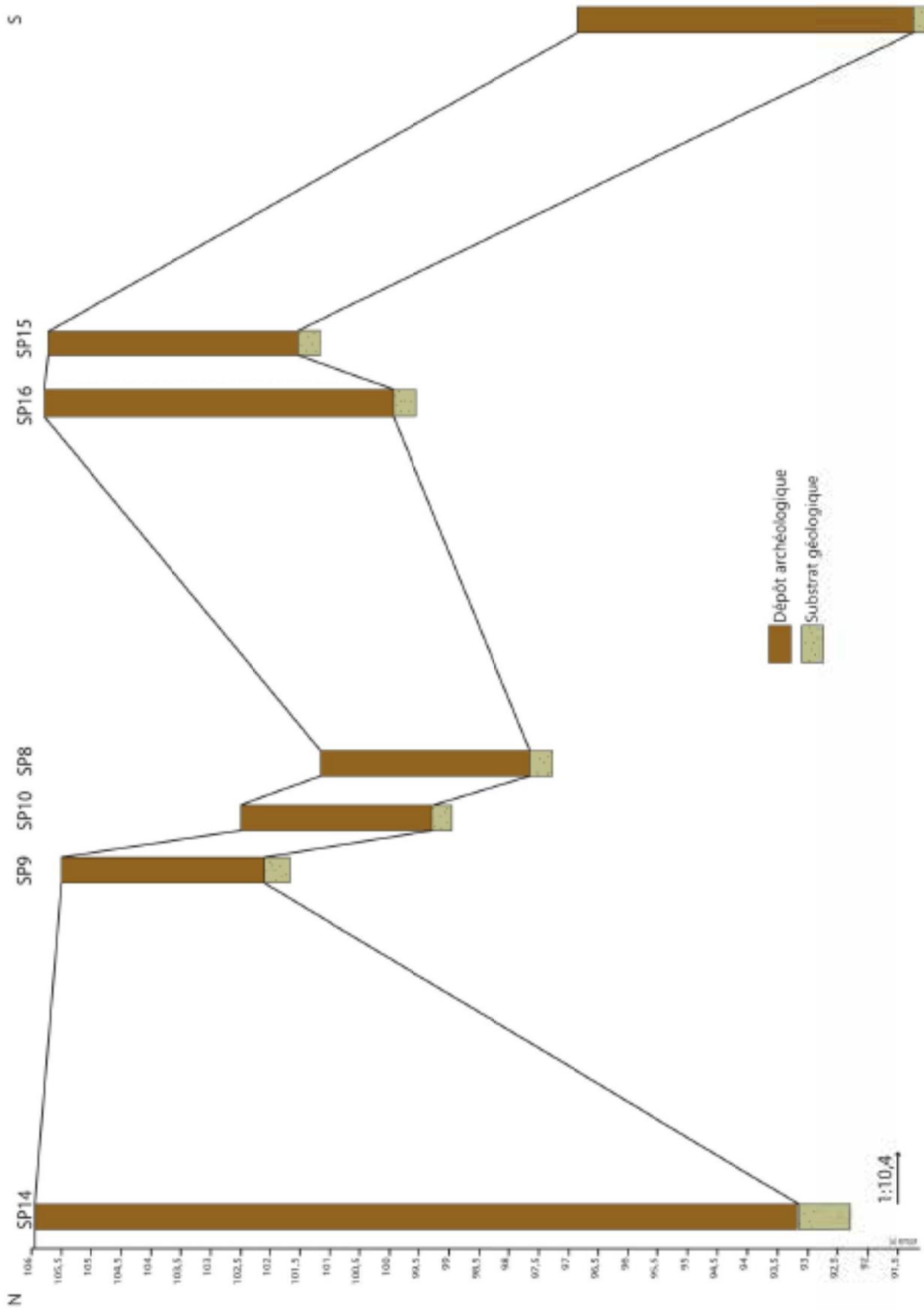


Figure 14 : Transect Nord-Sud, débutant un peu avant la rue de Bourgogne jusqu'au quai Fort Alleaume, montrant une géométrie de terrasses

~ 25 ~

V. Conclusion

Le but principal de ce stage est la caractérisation du dépôt archéologique sur les paléoterrasses au sein du quartier Saint-Aignan à Orléans. Pour ce faire, les sondages carottés et pénétrométriques réalisés l'un à côté de l'autre ont permis une calibration des données du PANDA avec les unités sédimentaires couramment retrouvées. Ce qui a permis la détermination d'une résistance de pointe Q_d moyenne de 11,73MPa pour le substrat géologique qui est pour le plus souvent des marnes calcaires. De ce fait, l'intégralité des pénétrogrammes ont pu être exploités soulignant ainsi un phénomène de terrasses avec quelques anomalies.

Les terrasses les plus marquées sont celles se trouvant à proximité de la Loire avec une origine fluviale puis anthropique, de plus des anomalies sont constatées à l'approche de la rue de Bourgogne. En effet, de nombreux sondages présentent des épaisseurs avant l'atteinte du substrat bien plus importantes au Nord du secteur d'étude, une anomalie topographique est peut-être présente liée à un ancien fossé de défense, une karstification locale, ou bien un aménagement local. Ce type de phénomènes est aussi présent au niveau du séminaire interdiocésain ; cependant, le mur correspondant approximativement à l'ancienne enceinte du cloître ce qui laisse supposer à un aménagement anthropique en un lieu ayant déjà une prédisposition naturelle puisqu'une terrasse naturelle semble se dessiner à cet endroit.

Le dépôt archéologique a pu être identifié en partie avec les pénétrogrammes, la calibration de ces derniers avec les sondages carottés ont permis la détermination de valeurs de résistance de pointe Q_d moyennes pour les remblais et d'autres niveaux anthropiques. Avec les valeurs obtenues, les dépôts archéologiques ont pu être identifiés ainsi que leur épaisseur qui manque l'importance de l'activité humaine. Il a été remarqué que sur la partie sociale du quartier Saint-Aignan le dépôt est environ de 5m alors qu'il est plus important aux extrémités ce qui est peut-être lié à des phénomènes naturels, il n'est cependant pas possible de l'affirmer car d'avantage de sondages serait nécessaire.

Afin de caractériser le dépôt archéologique, l'apport de la géologie fut non négligeable. En effet, ces connaissances ont permis de différencier les niveaux en place de ceux rapportés par l'homme modifiant ainsi les épaisseurs de dépôts affectées à la part anthropique. De même pour le début de la détermination des paléoterrasses.

Par ailleurs, le manque de temps ne permet de comprendre la morphologie complète de la zone d'étude, il serait intéressant de réaliser un quadrillage de sondage au PANDA sur des zones telles que le séminaire et le jardin de l'évêché où le dépôt semble aberrant. Ce quadrillage accompagné de quelques sondages carottés permettrait d'identifier d'avantage la structure. Ensuite, seule une petite partie du quartier a été couverte par les sondages laissant beaucoup de zones d'ombres, en réaliser d'avantage sur des transects Est-Ouest et Nord Sud permettrait de visualiser en trois dimensions la morphologie des paléoterrasses et ainsi comprendre la part du naturel et de l'anthropique. Malheureusement, de nombreuses questions restent en suspens.

Références bibliographiques et sitographiques :

A :

Amélie LAURENT. Évaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain. Histoire. Université François Rabelais - Tours, 2007. Français. <tel-00214256v2>

Amélie LAURENT. Rapport de prospection géotechnique, Mars 2015. Prospection pour diagnostic réalisé au 18 quai Fort Alleaume

Archeologie.ortleams-metropole.fr/r/340/sicavor/ : site d'Orléans métropole présentant le projet SICAVOR.

C :

Clément ALIX (dir.) Caroline BARRAY, Julien COURTOIS, Mathieu FERNANDEZ, Michel PHILIPPE. Rapport de prospection thématique pluriannuelle. SICAVOR 2015

G :

Geoportail : site de l'IGN permettant de retrouver les coordonnées des sondages en système de coordonnées Lambert 93.

M :

<http://munsel-to-rgb.blogspot.fr/2012/01/munsel-soil-color-space-is-commonly.html>;

site permettant de retranscrire les couleurs de la charte Munsel en RVB.

Annexe 1 : Cartes d'occupation d'Orléans à différentes époques

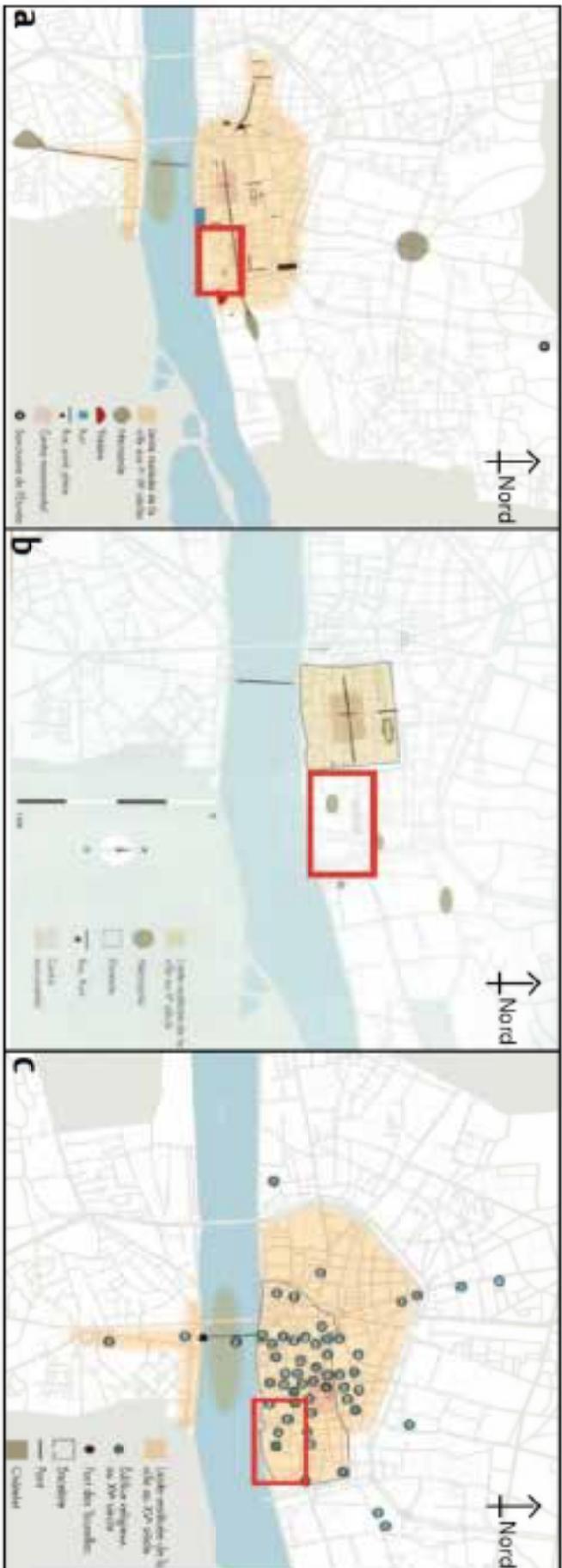


Figure 15: Cartographie de la ville d'Orléans à plusieurs époques avec encadré en rouge le quartier Saint-Aignan.

- A. Représentation de la ville au Haut-Empire Romain I^{er}, II^{ème} siècle de notre ère, la zone d'étude est à cette époque au sein de la ville et est très vivante de par sa proximité avec le théâtre.
 - B. Partie de la ville contenant le quartier étudié qui au Bas Empire IV^{ème}, V^{ème} siècle est séparé de la ville par une enceinte, il a en son cœur une nécropole correspondant actuellement au séminaire interdiocésain.
 - C. Occupation de la ville d'Orléans à la fin du moyen-âge XV^{ème} siècle, la zone d'étude est à cette époque de nouveaux dans l'enceinte de la ville avec de nombreux édifices religieux.
- Figures issues du rapport SICAVOR 2015

Annexe 2 : Carte SIG des sondages géotechniques réalisés par des structures externes dans le quartier Saint-Aignan



Figure 16 : Carte SIG des sondages géotechniques réalisés par des personnes externes. En bleu, sont représentés les sondages disposant d'un indice de confiance de 0, ils sont donc peu fiables mais permettent tout même de se faire une idée. En rouge, sont illustrés les sondages ayant un indice de confiance compris entre 1 et 2, ils sont donc exploitables.

Annexe 3 : Fiche de description détaillée des carottes

1- Descriptions détaillée et log

Carottage : SC3 360-250mm Descripteur(s) : *Mollesland?*
Porche Duvion date : 11 Oct 2017

depth [cm]	profondeurs	texture	trans	couleur	Humi	EG		n° photo
						%	nature taille	
U1	de 0 à 5	S-a	-	10YR6/3	-	30	Si-Ca g	matériel friable
U2	de à					2	Ca C	aspect remblai
U2	de 5 à 6	S-a	-	7.5YR3/2	-	3	Ca g	voie de circulation bien taillée
U3	de 6 à 20	idem		à U1 avec		3	Ca b	
U4	de 20 à 69	S-A	-	10YR 3/2	-	20	Ca-Si g	} assez bien consolidé
U6	de à					3	Ca-Si C	
U7	de à					5	Ca b	
U8	de à					1	charbons	
U5	de 69 à 87	A(l)	-	"	-	60	ca b	} aspect de remblai grossier
U10	de à					10	ca g	
U11	de à					5	Ca-Si C	
U12	de 87 à 90	A	-	10YR3/6	-			
U13	de à							
U14	de à							
U15	de à							
U16	de à							
U17	de à							
U18	de à							
U19	de à							
U20	de à							
U21	de à							
U22	de à							
U23	de à							
U24	de à							
U25	de à							
U26	de à							
U27	de à							

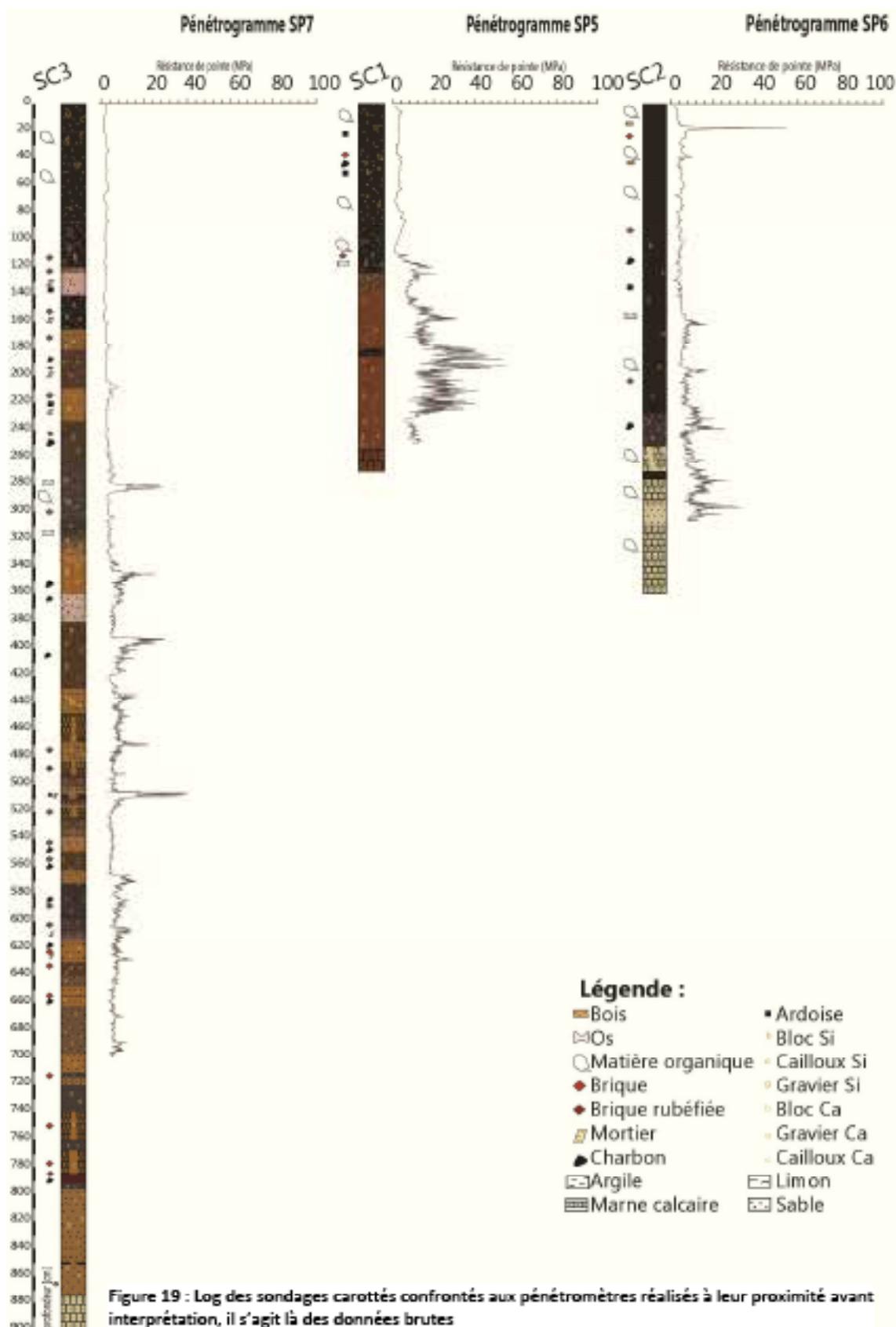
Figure 17 : Fiche de description des carottes prenant en compte, l'épaisseur des unités observées, l'humidité de celle-ci ainsi que leur teneur en eau et éléments grossier de tout type.

Annexe 4 : exemple d'un fiche d'un point de référence NGF dans la base du SIGOR (SAMO)

CANEVAS DE RÉFÉRENCE			Commune	
S.I.G.O.R. - Ville d'Orléans			ORLÉANS	
			FICHE SIGNALÉTIQUE DES POINTS	
Point No :	3480			
Fiche No :	1443			
Matricule :	234	8104	3680	
Nature :	Pilon			
Référence cadastrale	Section :	BM		
	N° de Parcelle :	DP		
Adresse :	No Voie :	Angle rue Coligny		
	Nom Rue :	Place Saint Aignan		
	Commune :	ORLÉANS		
Coordonnées Lambert II				
X ^m	568 486,753 m			
Y ^m	322 298,688 m			
Altitude IGN69				
Z ^m	105,98 m			
OPÉRATION TERRAIN				
DATE	METHOD	MATERIALISATION	OPÉRATEUR	
16-mars-2005	Détermination XYZ par GPS	Pilon	FAUQUEMBERGUE, LEMAIRE & ASSOCIÉS	
Croquis de repérage (sans échelle)				

Figure 18 : Fiche d'un point NGF de la base de données du SIGOR, utilisé comme référentiel pour établir la topographie

Annexe 5 : Sondages carottés et pénétrométriques avant interprétation réalisés au jardin de l'évêché et à l'arrière de la maison Louis XI



Annexe 6 : Carte SIG des sondages réalisés à proximité de l'église Saint-Euverte à Orléans



Figure 20 : Cartographie SIG d'une petite partie de la ville d'Orléans permettant la localisation des sondages pénétrométriques SP 1, 2, 3 et 4 par rapport à la zone d'étude encadrée en rouge

Annexe 7 : Tableau dynamique croisé des valeurs calculés sur les sondages SP 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7

NUM_ SP	US	Moyenne Qd	Écartype Qd	Min Qd	Max Qd	Moyenne Abi	Min Abi	Max Abi	Moyenne de Proximité (m)
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(m)	(m)	(m)	
5	Terre végétale	5,942427184	4,624036917	0,34	20,96	104,4149303	103,902	105,126	0,730009709
6		7,179510086	5,416359523	1,16	54,88	103,621562	102,726	104,966	1,36843804
7	Niveau anthropique	2,213636364	0,528389882	1,03	3,44	106,9767614	106,116	107,875	0,903238636
1		4,583495146	3,083974459	1,01	16,58	107,7360097	107,293	108,292	0,563990291
3	Remblai	10,11440789	2,967687105	3,39	18,16	107,9586776	107,694	108,294	0,341322368
1		8,256176471	4,477595872	3,14	24,26	107,1118382	106,897	107,291	1,188161765
7	Remblai consolidé	7,916625259	4,641244434	2,2	39,82	103,0592795	100,868	105,786	4,820720497
7		9,161226994	6,134380212	1,68	29,91	103,7577546	102,207	106,104	4,122245399
7	Sable grossier	5,76702381	1,957534759	1,47	10,89	104,3828829	103,972	106,641	3,497107143
3		11,50864407	2,22687815	5,79	16,89	107,4832458	107,297	107,69	0,816754237
4	Sable très grossier	13,58148352	3,838241427	4,33	23,09	108,0283681	107,798	108,296	0,271631868
5		17,37306748	6,817700648	6,79	40,73	103,5388773	103,349	103,748	1,606122699
5	Voie de circulation	21,62588785	9,083660174	6,11	55,27	103,0599112	102,765	103,282	2,085088785
5		32,31586207	9,225651465	17,51	53,69	103,3156552	103,285	103,346	1,829344828
7	Transition	9,623333333	0,442743969	9,02	10,07	104,224	104,22	104,228	3,656
5		8,369285714	2,053742105	5,79	12,98	103,8288929	103,753	103,899	1,316107143
6	Argile sableuse	11,44118644	4,724697133	4,07	25,37	102,6587966	102,591	102,724	2,33120339
1		6,167733333	1,429156929	4,08	11,03	106,5960667	106,291	106,89	1,703933333
2	Marne calcaire	6,992258065	3,792653093	0,82	16,74	107,9811075	107,775	108,294	0,318892473
7		7,278893443	3,532591002	2,48	28,26	102,6942336	100,92	105,377	5,185766393
7	Marne calcaire	6,020285714	1,450258077	2,8	11,45	102,8777429	102,816	102,949	5,002257143
5		10,89588235	1,68965036	7,91	13,95	102,7252941	102,689	102,761	2,419705882
6		12,56638393	4,504095245	5,57	33,48	102,2524464	101,983	102,588	2,737553571

Figure 21 : Tableau dynamique permettant d'analyser la détermination de la nature des unités pour les programmes réalisés à France 34

Annexe 8 : Pénétrogrammes SP 11, 12, et 13 réalisés dans des cavités du quartier Saint-Aignan

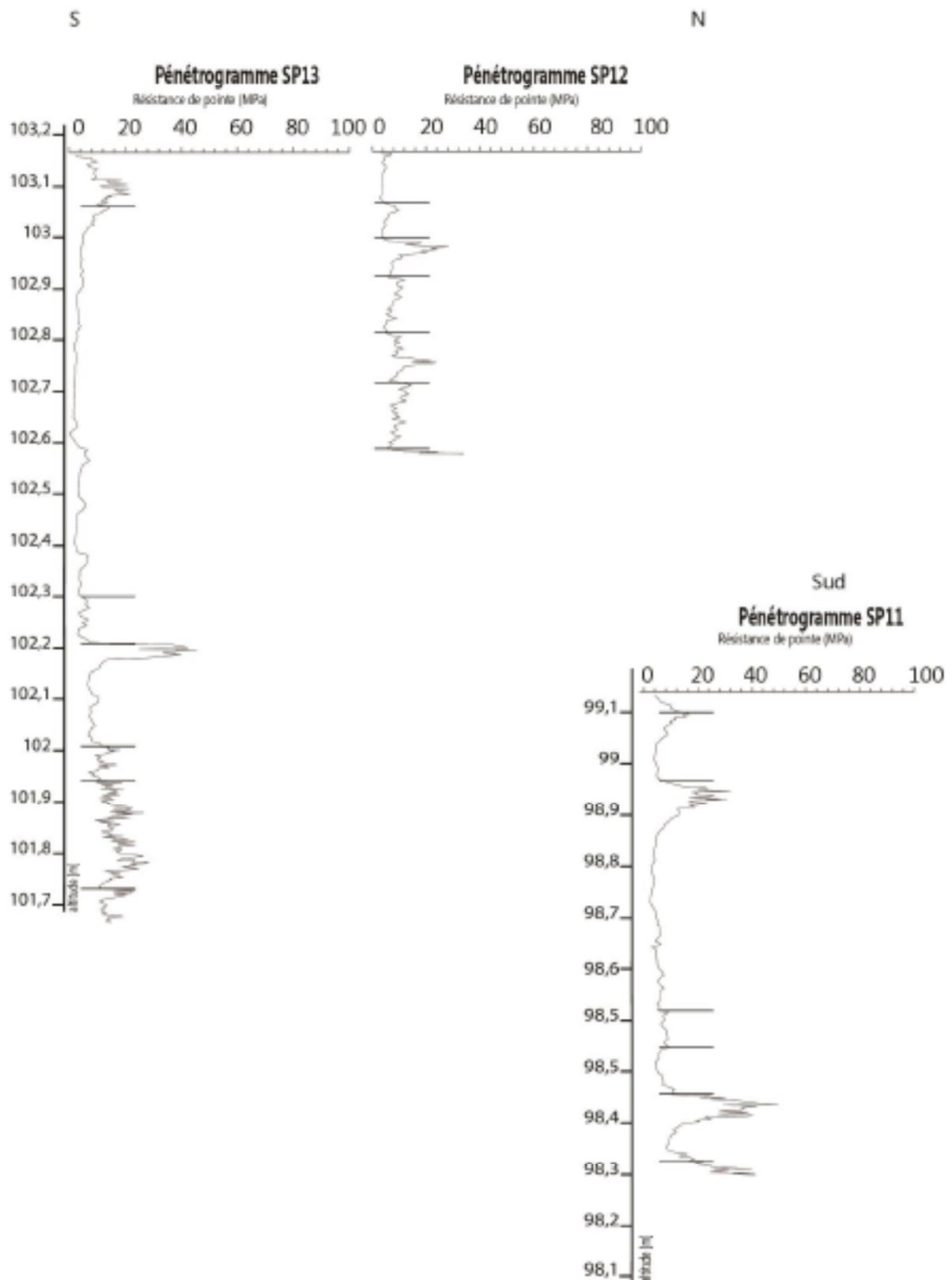


Figure 22 : Pénétrogrammes SP11 réalisés dans la carrière du 4 rue Coligny et SP12 et 13 sont eux réalisés dans la cave du 8 rue Édouard Fournier.

Annexe 9 : Tableau dynamique croisé représentant l'interprétation des UP en fonction de leur moyenne de Qd

NUM. SR US	Moyenne de Qd (MPa)	Ecartype Qd (MPa)	Min de Gd (MPa)	Max de Gd (MPa)	Min de z	Max de z	épaisseur	
6	ts	4,10	1,98	1,25	10,27	99,918	101,33	1,413
	anthro	8,47	4,37	0,62	18,63	99,687	99,978	0,223
	sable grossier	15,88	10,73	3,79	52,6	98,162	99,677	0,515
	Transition	3,38	2,95	5,54	22,54	98,673	99,76	0,461
	Marnes calcaire	11,44	5,23	4,66	30,11	98,229	98,678	0,443
9	Marnes calcaire	10,08	3,72	3,65	25,51	97,344	98,226	0,882
	ts	2,23	0,82	0,86	4,58	101,51	102,52	1,003
	ts	3,58	2,16	0,91	9,7	100,72	101,43	0,768
	ts	3,08	3,05	1,43	12,43	100,13	100,72	0,585
	argile sableuse	7,21	2,84	3,41	15,97	99,75	100,12	0,373
10	anthro	5,08	1,41	1,97	8,65	99,453	99,747	0,294
	anthro	4,37	2,16	1,49	11,08	98,822	99,447	0,625
	Calcaire	16,51	7,25	4,95	34,11	98,353	98,838	0,465
	ts	3,78	2,07	1,51	10,64	104,7	105,41	0,704
	Remblai consolidé	9,48	3,35	4	18,39	104,41	104,7	0,288
11	sable grossier	12,02	5,85	4,22	57,72	104,01	104,41	0,335
	sable grossier	12,05	9,75	3,77	39,38	103,7	104,01	0,308
	anthro	7,46	3,25	1,92	20,66	102,99	103,7	0,708
	Marnes calcaire	9,04	3,80	3,72	22,59	102,42	102,98	0,563
	anthro	8,74	2,74	3,93	11,66	99,104	99,133	0,629
12	anthro	9,59	4,73	3,73	22,62	98,557	99,101	0,144
	anthro	9,50	7,00	2,31	31,66	98,358	98,955	0,597
	Calcaire	24,31	11,67	6,35	49,65	98,231	98,356	0,123
	Calcaire	30,76	6,84	18,71	41,11	98,206	98,228	0,022
	anthro	4,49	1,12	2,85	7,02	102,99	103,76	0,169
13	anthro	7,39	4,55	3,45	18,58	102,88	102,98	0,12
	Marnes calcaire	14,36	6,87	6,42	28,21	102,75	102,86	0,105
	Remblai?	8,20	2,07	4,56	12,24	102,49	102,75	0,255
	Calcaire	10,86	3,70	6,02	23,76	102,18	102,49	0,303
	Calcaire	25,75	6,44	7,4	33,73	102,16	102,7	0,005
14	anthro	12,58	4,46	2,37	21,53	103,05	103,5	0,1
	anthro	4,66	2,67	0,76	11,2	102,38	103,05	0,675
	anthro	5,47	2,40	3,06	14,58	102,2	102,37	0,161
	Calcaire	16,41	12,38	6,59	45,59	102	102,2	0,204
	Calcaire	11,02	2,60	6,94	16,01	101,53	102	0,064
15	Calcaire	17,21	4,05	9,19	28,34	101,71	101,93	0,222
	Calcaire	13,30	1,94	11,02	18,11	101,66	101,71	0,047
	ts	1,73	0,47	0,37	3,04	101,94	103,5	1,242
	argile sableuse	6,67	5,17	2,05	25,7	101,07	101,51	0,84
	sable très grossier	16,39	10,33	4,54	47,5	100,48	101,06	0,589
16	argile sableuse	6,76	1,87	3,44	13,3	99,303	100,47	0,566
	argile sableuse	6,65	4,63	2,42	26,63	98,961	99,9	0,313
	sable grossier	10,34	2,52	4,39	16,69	98,485	98,978	0,493
	remblai	8,03	1,23	5,95	10,77	98,302	98,478	0,178
	anthro	3,74	1,78	0,49	12,03	93,735	98,298	4,563
17	remblai	7,93	2,65	2,59	14,28	93,604	93,732	0,128
	anthro	4,02	1,86	1,28	12,35	92,575	93,802	1,027
	anthro	4,44	1,24	2,5	7,65	92,735	92,572	0,437
	Transition	7,78	1,92	3,35	13,9	91,648	92,132	0,484
	anthro	4,18	2,06	1,78	14,52	90,784	91,646	0,882
18	Marnes calcaire	13,27	6,65	6,05	31,62	89,697	90,763	0,105
	ts	1,83	0,68	0,96	4,63	104,11	104,82	0,713
	ts	4,81	2,46	2,2	10,43	103,79	104,11	0,319
	anthro	9,02	4,73	2,78	28,02	103,16	103,78	0,621
	anthro	8,97	4,91	4,08	24,35	102,89	103,16	0,269
19	anthro	8,04	2,37	3,14	17,68	101,58	102,69	1,305
	sable très grossier	14,82	6,03	7,22	37,74	101,31	101,58	0,268
	Marnes calcaire	10,60	4,61	2,73	34,07	100,24	101,31	1,065
	ts	1,55	0,36	1,13	2,62	105,24	105,68	0,478
	ts	3,34	1,11	1,72	7,48	104,88	105,23	0,35
20	argile sableuse	6,77	2,78	2,21	11,6	104,05	104,67	0,622
	anthro	7,15	1,98	4,47	14,32	103,84	104,04	0,399
	Remblai consolidé	10,38	5,69	5,64	39,65	102,82	103,64	0,821
	Remblai consolidé	10,72	3,05	5,38	23,62	102,49	102,81	0,322
	sable grossier	12,83	6,78	6,2	36,7	102,21	102,49	0,285
21	sable grossier	12,36	2,93	7,93	22,11	102,04	102,2	0,167
	Remblai consolidé	10,16	2,41	6,84	18,43	101,83	102,04	0,208
	Remblai consolidé	8,89	2,39	5,76	15,69	101,56	101,83	0,265
	Transition	9,00	2,66	1,43	19,04	101,09	101,58	0,471
	Calcaire	16,27	6,78	5	36,62	100,66	101,09	0,425
22	Calcaire	15,11	4,70	7,83	31,04	100,21	100,66	0,452

Résumé caractérisation du dépôt archéologique sur les paléoterrasses du quartier Saint-Aignan à Orléans

Aurélië DIACRE

Avril 2017

Mots clés : pénétrométrie, dépôt archéologique, paléoterrasses, calibration

Différentes méthodes de sondages complémentaires sont mises en œuvre dans le quartier Saint-Aignan dans le but de caractériser le dépôt archéologique sur les paléoterrasses anthropiques et fluviales du quartier Saint-Aignan à Orléans, et plus particulièrement sur deux transects. Ces méthodes sont le sondage carotté et pénétrométrique avec l'utilisation du PANDA, l'une étant destructive et l'autre non. L'apport des sondages carottés sur la visualisation des sédiments en profondeur est indispensable à la compréhension des unités pénétrométriques lorsque le sondage au PANDA est réalisé à l'aveugle. En effet, lorsque le sondage carotté est effectué à proximité des sondages pénétrométriques, il permet de corréler les valeurs de résistance de pointe Qd obtenues sur les pénétrogrammes avec des unités sédimentaires. Par la suite, des moyennes de résistance par type d'unité sont réalisées, afin d'exploiter les sondages réalisés à l'aveugle. Ces études, vont ainsi permettre la détermination de l'épaisseur du dépôt archéologique ainsi que la réalisation de la coupe des transects mettant en évidence la morphologie du terrain, permettant l'identification des paléoterrasses.

Outils utilisés : pénétromètre PANDA, Adobe Illustrator, Excel, Qgis.

Encadrants :

Amélie LAURENT, SAMO, 13 bis rue de la Tour Neuve, 45000 Orléans : amelie.laurent@loiret.fr

Clément ALIX, SAMO, 13 bis rue de la Tour Neuve, 45000 Orléans : clement.alix@orleans-metropole.fr

**MÉMOIRE DE MAËLYS CADEL, CARACTÉRISATION DE L'ÉPAISSEUR
DU DÉPÔT ARCHÉOLOGIQUE À L'ÉCHELLE DU QUARTIER SAINT-AI-
GNAN (ORLÉANS), APPLICATION AUX CAVITÉS SOUTERRAINES**



UNIVERSITE D'ORLEANS
Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre

Licence Terre et Environnement

3^e année

2016-2017

Rapport de stage en entreprise

Caractérisation de l'épaisseur du dépôt anthropique à l'échelle du quartier de Saint-Aignan (Orléans) ; application aux cavités souterraines

par Maëlys CADEL

sous la direction de : Amélie LAURENT, Clément ALIX, Anaëlle Simonneau



Service Archéologique de la Mairie d'Orléans

13 bis Rue de la Tour Neuve 45000 Orléans

Table des matières

I} Introduction	2
I. Matériel et Méthodes	5
A. Site d'étude	5
1. Contexte géographique et géologique du site	5
2. Contexte historique de la zone d'étude	7
B. Les sondages géotechniques	8
C. Les sondages pénétrométriques	9
D. Les sondages carottés	11
II. Résultats	12
A. Présentation des résultats géotechniques	12
B. Résultats des sondages pénétrométriques réalisés dans les cavités souterraines	13
C. Présentation des pénétrogrammes étalonnés à l'aide des carottes de sol	15
III. Interprétation	18
A. Présentation du référentiel utilisé pour l'interprétation des pénétrogrammes	18
B. Présentation des coupes réalisées	20
IV. Conclusions et perspectives	24
V. Remerciements	24
VI. Références bibliographiques	25

Résumé

Dans le cadre d'un projet de recherche, il a été réalisé de nombreux sondages pénétrométriques, carottés et géotechniques dans le but de caractériser l'épaisseur du dépôt anthropique à l'échelle du quartier Saint Aignan. Ces sondages ont été réalisés à l'aide de différents outils comme le pénétromètre PANDA. Les résultats obtenus sous forme de pénétrogrammes et de logs stratigraphiques ont permis de montrer la nature complexe et l'épaisseur du dépôt archéologique aux points de sondages donnés. L'interprétation de ces résultats depuis un référentiel a permis la réalisation de plusieurs coupes N-S du sol anthropique et géologique permettant de visualiser en direct les variations de l'épaisseur du dépôt archéologique. Il a été démontré que ce dépôt archéologique à l'échelle du quartier Saint-Aignan présente des variations latérales d'épaisseur et de nature ce qui a permis de mettre en valeur un dépôt urbain complexe caractérisé d'anomalies ponctuelles.

I) Introduction

Dans le cadre du projet de recherche SICAVOR, cherchant à reconstituer l'histoire archéologique de la ville d'Orléans, une collaboration entre des étudiants en géologie et des archéologues du service archéologique de la mairie d'Orléans (SAMO) a été mise en œuvre.

Le Service archéologique de la mairie d'Orléans, récemment devenu Pôle archéologique de l'Agglomération d'Orléans est une institution qui intervient dans 3 domaines principaux :

- La réalisation de diagnostics et de fouilles archéologiques
- La réalisation d'une carte archéologique de la ville d'Orléans permettant de reconstituer son potentiel archéologique
- Une action d'archéologie préventive dans la conservation des données archéologiques avant une potentielle destruction lors d'un projet de chantier.

Le SAMO est dirigé par Monsieur Sébastien Jesset. Sous sa directive travaillent 4 archéologues spécialisés dans 4 domaines différents, Julien Courtois, Emilie Roux, Pascale Dupont et Clément Aïx. Temporairement, d'autres archéologues ou autres spécialistes peuvent être recrutés pour travailler en collaboration avec eux sur un projet spécifique. Dans le cadre de cette collaboration, Amélie Laurent, responsable d'opérations et spécialiste de la période médiévale est venue travailler en tandem avec les archéologues du SAMO. C'est elle qui est le responsable référent de cette collaboration. Elle travaille au Service archéologique du département du Loiret, au sein du pôle d'archéologie préventive, dans le but de faire avancer l'évaluation du potentiel archéologique en milieu urbain.

Le projet SICAVOR est un projet de recherche de 3 ans financé par la région Centre Val de Loire et regroupant plusieurs partenaires (Polytechnique, OSUC, BRGM, DRAC, agglomération d'Orléans, etc.) L'objectif de ce projet est d'étudier l'histoire de la ville d'Orléans au travers de l'analyse de ses cavités (caves, carrières et réseaux d'égouts souterrains).

Cette collaboration d'un mois a eu pour but de tenter de caractériser l'épaisseur du dépôt archéologique du quartier de Saint Aignan. Le dépôt archéologique est défini comme étant l'entité comprise entre le toit du terrain naturel c'est-à-dire du sol actuel et les premières strates géologiques. Pour réaliser ce projet il a été mis en place une série de mesures physiques effectuées à l'aide d'un outil appelé pénétromètre PANDA. Le pénétromètre nous permet d'obtenir une mesure de la résistance du sol en MPa en fonction de la profondeur en m. Les résultats sont donnés sur un graphique appelé pénétrogramme, qui représente en abscisse la résistance et en ordonnée la profondeur. Par la suite il est possible d'interpréter le pénétrogramme obtenu pour tenter de déterminer la nature des différentes couches de sol, de remblais ou bien de sédiments qui se trouvent sous nos pieds. Le sol mis en place par les activités humaines n'a pas la même résistance que les strates géologiques comme les couches de calcaire par exemple. Il nous est donc au minimum possible de tenter de différencier la « zone » de sol anthropique de la « zone » naturelle et c'est ici le but des sondages qui ont été réalisés. En premier lieu ont été réalisés des sondages pénétramétriques dans plusieurs cavités souterraines du quartier de saint Aignan ainsi que dans plusieurs jardins et terrasses. A cela s'ajoute 3 sondages carottés qui ont été réalisés dans certains jardins où ont également été réalisés des sondages pénétramétriques de sortes à pouvoir comparer les données obtenues par les deux méthodes. Cela permet également de pouvoir ajuster les données pénétramétriques à ce qui peut être observé dans les carottes de sol. La suite des opérations a été consacrée à l'ouverture et à la description des carottes ainsi qu'au dépouillage des pénétrogrammes. Puis, il a été possible de confronter les données et de les interpréter. Cela a permis de réaliser des logs stratigraphiques des zones sondées. Ces zones étant dispersées sur un même transect il a été possible de recouper les résultats pour enfin parvenir à retracer l'allure des strates géologiques sous

le terrain naturel ce qui, en connaissant la topographie de la région, a permis de caractériser l'épaisseur du dépôt anthropique.

Ce projet s'appliquant aux cavités souterraines, il a été planifié la visite de plusieurs caves et anciennes carrières au cours de ce mois. Ces visites ont eu pour but de voir quelles informations l'étude des cavités souterraines pouvait nous apporter quant à la détermination de l'épaisseur du dépôt archéologique et notamment sur le positionnement de la base du dépôt.

Les cavités souterraines peuvent être classées en deux grandes catégories, les caves dont la fonction principale est le stockage de denrées et de matériel, et les anciennes carrières dont la fonction constituait l'extraction de matériaux de construction. Dans le quartier de Saint-Aignan et même à l'échelle de la région, les carrières recensées sont des carrières de calcaire de Beauce. Dans les cavités qui ont été visitées, ce calcaire est relativement altéré en surface. 2 cavités du quartier Saint-Aignan ont été étudiées dans le cadre de ce projet. La première est située 8 rue Edouard Fournier et constitue une cavité de stockage. Elle ne s'étend que sur un seul niveau souterrain et n'a donc pas été creusée très profondément. La deuxième est située 4 rue Coligny et constitue une ancienne carrière. Elle s'étend sur 3 niveaux souterrains et est constituée de plusieurs couloirs non vraiment logiquement agencés. Sur les murs de certaines cavités il est parfois possible de visualiser le passage du sol anthropique au terrain géologique. L'étude de la cavité nous permet alors de pouvoir replacer clairement la base du dépôt archéologique sur un transect. Une de ces interfaces entre sol urbain et strates géologiques a été observée au cours de ce stage dans une cavité souterraines située en dehors du quartier Saint-Aignan. Il s'agissait d'une ancienne carrière.

Ancienne carrière de calcaire de Beauce située sous le rectorat d'Orléans



Photographie 1 : Cavité visitée le 7 avril 2017. Cette cavité constituait une ancienne carrière de calcaire de Beauce. Elle est étagée sur 3 niveaux. Cette cavité a été passée au scanner 3D. Il s'agit d'une méthode d'analyse très récente qui vise à reconstruire la cavité en 3 dimensions de sorte à récupérer le plus d'informations possibles (espace, galerie, voûte, soutènement, trave, arches, etc.) sans avoir besoin de visiter la cavité à nouveau.

I Matériel et Méthodes

A Site d'étude

1. Contexte géographique et géologique du site

Le site étudié correspond au quartier Saint-Aignan de la ville d'Orléans. Il est présenté sur la figure 1 ci-dessous. Ce quartier borde la Loire, dans la partie sud de la Ville. Il recouvre les paléotérrasses qui s'étendaient le long du fleuve (thème sur lequel a travaillé Aurélie Diacre au cours de son stage de licence). L'ensemble du quartier n'a pas été sondé, cependant plusieurs sondages ont été réalisés le long d'un transect Nord-Sud dans la partie ouest du quartier et le long d'un transect NNW-SSE dans la partie centrale. Ces sondages ont été faits de sorte à pouvoir, par la suite, réaliser deux coupes du terrain archéologique et géologique.

La ville d'Orléans est située dans un bassin sédimentaire. L'essentiel du matériel géologique du sous-sol constitue le calcaire de Beauce. Dans la région, le calcaire est très altéré, karstifié. Dans certains endroits, les creux formés par la dissolution du matériel calcaïque (dolines), permettent de former des sortes de « fosses » naturelles. Le terrain naturel, dans cette région, n'est donc pas constant. Par ailleurs, la carte géologique d'Orléans au cinquante millème montre la présence d'une lentille d'alluvions récentes qui s'étend sur une grande partie de la zone Sud d'Orléans, et donc sur le quartier Saint-Aignan. Il n'est pas indiqué l'épaisseur de cette lentille d'alluvions, cependant cela a pu permettre d'apporter de possibles explications quant à la présence de diverses anomalies qui ont été rencontrées lors des sondages.

Les 3 sondages carottés ont été réalisés le long de la rue des 4 fils Aymon, dans la partie Sud du quartier. Les sondages pénétrométriques, eux, ont été réalisés rue 4 fils Aymon, rue Coligny, rue Edouard Fournier, rue Saint-Euverte et au Cloître Saint-Aignan.

2. Contexte historique de la zone d'étude

D'après les fouilles archéologiques qui ont été réalisées, les premières occupations humaines de la ville d'Orléans remontent au Paléolithique inférieur, il y a environ 12 000. La ville a depuis connue de nombreuses phases d'expansions, de guerre puis de prospérité. Le quartier étudié porte le nom d'un Saint ayant été désigné comme protecteur de la ville lors du siège de 451. Les différents bâtiments recensés sur ce site d'étude et notamment les cavités souterraines peuvent avoir été construits à toutes sortes d'époques depuis l'antiquité. Sur l'ensemble de la ville sont recensées des cavités qui datent de l'époque gallo-romaine, du moyen-âge ou de l'époque moderne par exemple. Elles ont eu différentes fonctionnalités au cours du temps.

Plan des bâtisses au sol et des cavités du quartier Saint-Aignan



Figure 2 : Cadastre du quartier Saint Aignan (45000 Orléans) exporté depuis le logiciel QGIS. L'échelle y figure en bas à droite. Sur ce cadastre figure en bleu et orange la position des cavités souterraines explorées au cours du projet SICAVOR ainsi que celles qui doivent être étudiées. Toutes ne sont pas recensées, notamment la cavité rue Coligny qui a été étudiée au cours de ce projet.

Comme dit précédemment deux cavités souterraines ont été étudiées et sondées au pénétromètre PANDA lors de ce projet. Elles sont situées dans la partie ouest du quartier, le long d'un transect N-NW-SSE. La cavité située le plus au Nord, à rue Edouard Fournier a été construite en deux temps. La première construction date de la fin du 15^{ème} siècle (début de l'époque moderne). Elle a été agrandie dans un second temps vers le Sud au 19^{ème} siècle, sans doute pour suivre l'agrandissement de la maison qui se trouve au-dessus. Cette cavité souterraine a une fonction de cave de stockage. La base de la cave se situe à 3,40 mètres en dessous du sol actuel de la maison qui se trouve à une altitude de 105,15 mètres (côte NGF). Il existe 3 caves sur ce site précis cependant une seule a été visitée.

Derrière la maison se situe un jardin en terrasses qui a également été sondé à l'aide du pénétromètre PANDA.

La deuxième cavité, située plus au sud sur le transect, rue Coligny, constitue une ancienne carrière de calcaire de Beauce qui a été exploitée à des fins de construction. Cette carrière est sensiblement datée du 12^{ème} siècle. Aux alentours du 13^{ème} et 14^{ème} siècle cette carrière a été transformée en cave de stockage. En général toutes les carrières sur Orléans sont situées à une profondeur entre 10 et 12 m sous le sol actuel. Cependant, cette carrière-ci a été creusée moins profondément. Elle se situe entre 9 et 10 m sous le terrain actuel. Elle est étagée sur 3 niveaux, la carrière se situant dans le niveau inférieur.

B. Les sondages géotechniques

De nombreux sondages géotechniques ont également été réalisés au préalable sur le quartier Saint-Aignan. Leur répartition est présentée en figure 3. Les sondages géotechniques permettent également d'imager la nature du sol et du sous sol qui se trouvent sous nos pieds. Ces sondages ont donc été étudiés de sorte à voir s'ils pouvaient également être exploitables pour tenter d'imager l'épaisseur du dépôt archéologique au niveau du quartier et notamment pour voir s'ils pouvaient apporter des informations au niveau de zones où les sondages pénétrométriques n'ont pas été possibles. Certains sondages présentent des résultats qui peuvent être utilisés avec une incertitude relativement faible. Ces sondages sont caractérisés par un indice de confiance élevé. Cet indice de confiance dépend de la façon dont le sondage a été réalisé, de la raison pour laquelle il a été arrêté, de la précision de la mesure lors de l'acquisition, etc. Les sondages qui présentent un indice de confiance élevé peuvent donc être exploités avec une assez bonne certitude. Ceux qui ont été réalisés sur le quartier Saint-Aignan sont classés en 3 catégories selon leur indice de confiance. Cet indice varie de 0 à 2. Les sondages qui sont caractérisés par un indice de confiance 0 sont inexploitablement ou doivent être exploités avec une grande précaution. Ceux qui sont caractérisés par un indice de 1 peuvent être exploités mais il reste une incertitude sur la donnée qui ne doit pas être négligée. Ceux dont l'indice de confiance est de 2 peuvent être exploités avec une assez bonne certitude.

Répartition des sondages géotechniques réalisés sur le quartier Saint-Aignan



Figure 3 : cadastre du quartier Saint-Aignan sur lequel figurent, sous forme de points, une partie des sondages géotechniques qui ont été réalisés dans cette zone. Les points verts correspondent aux sondages dont les résultats présentent un indice de confiance de 2. Les points orange correspondent aux sondages pour lesquels l'indice de confiance est de 1. Les points rouges présentent un indice de confiance de 0.

Le transect NNW-SSE dans la partie centrale du quartier a alors pu être complété et ajusté à l'aide des données géotechniques. Il est présenté en figure 14 Un autre transect N-S a également pu être réalisé à l'aide des données géotechniques. Il est présenté en figure 13.

C. Les sondages pénétrométriques

Les sondages pénétrométriques constituent une méthode d'analyse du sol non destructive. Leur mise en application est simple et rapide et ils permettent d'obtenir des résultats assez bien exploitables. Le principe du pénétromètre PANDA est d'enfoncer une tige en métal dans le sol à l'aide d'une masse et de mesurer la résistance du sol pour un enfoncement de la tige de 2 cm. Le pénétromètre nous donne directement l'enfoncement en mm ainsi que la résistance du sol en MPa. L'appareil de mesure calcule aussi directement l'énergie cinétique engendrée par le coup de masse sur le dispositif, et le résultat qui s'affiche est calculé en fonction de cette énergie cinétique. Ainsi, peu importe la personne qui s'affaire à enfoncer la tige dans sol, les données de résistance obtenues seront toujours les mêmes. Les résultats sont donnés sur un graphique appelé pénétrogramme, qui représente en abscisse la résistance du sol et en ordonnée la profondeur en m. Sur la photographie 2 on peut observer une utilisation du pénétromètre PANDA dans le jardin du séminaire Cloître Saint-Aignan.

Au total 16 sondages pénétrométriques ont été réalisés au cours de ce stage, 12 de ces 16 sondages ont été réalisés sur l'ensemble du quartier Saint-Aignan. Ils portent chacun une dénomination allant de SP1 à SP16 (pour sondage pénétrométrique n). Trois de ces sondages ont été réalisés dans des cavités souterraines. Sur la figure 4 est représentée la répartition des différents sondages.

Photographie montrant une utilisation du pénétromètre FANDA



Photographie 2 : application du pénétromètre FANDA au séminaire Clôtre Saint-Aignan. Le sondage en cours de réalisation sur cette photographie correspond à SP15.

Répartition des sondages géométrométriques et corréliés sur le quartier

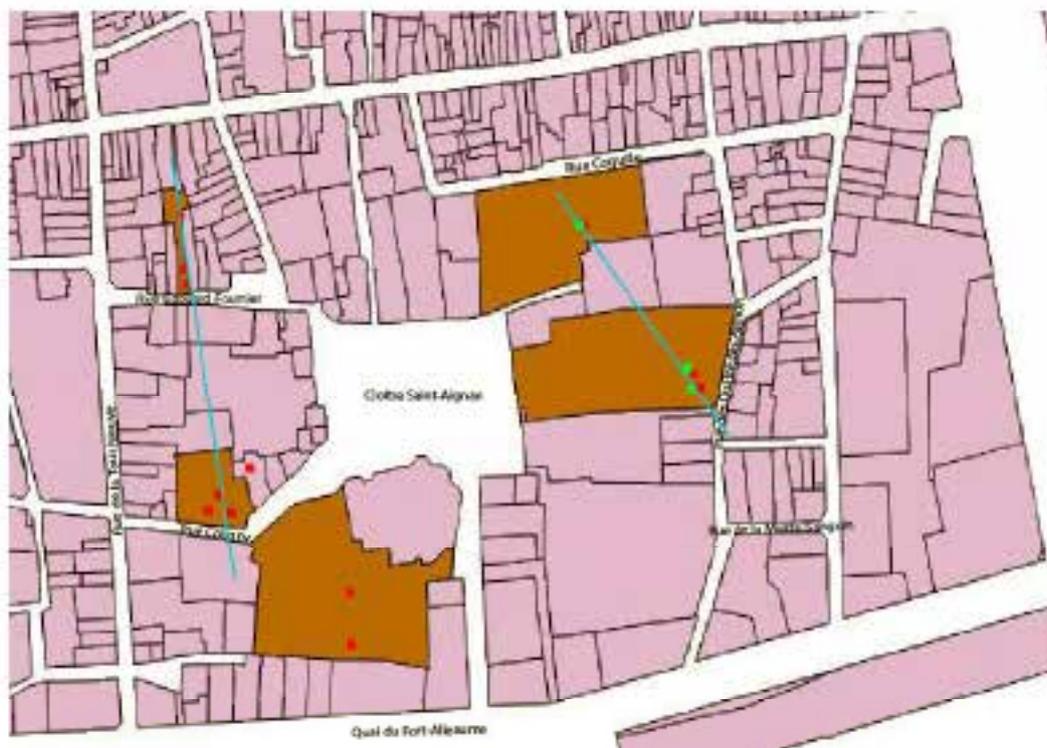


Figure 4 : Cadastre du quartier Saint-Aignan sur lequel figure la répartition des différents sondages géométrométriques qui ont été réalisés (points rouges) ainsi que la répartition des sondages corréliés (points verts). Le contour orange correspond à l'emprise au sol des zones qui ont été sondées au cours de ce projet. Les traits blancs indiquent correspondent aux 2 coupes qui ont été effectuées par la suite à l'aide de tous les résultats obtenus.

D. Les sondages carottés

La deuxième méthode qui a été mise en oeuvre pour caractériser la nature et l'épaisseur du dépôt archéologique correspond au sondage carotté. Lors d'un sondage carotté un tube en plastique est enfoncé dans le sol à l'aide d'un carottier, puis il est remonté à la surface du sol en conservant la portion de matière organique ou minérale qui s'est inséré dans le tube lors de son enfoncement. Lors de cette prospection, 3 sondages carottés ont été réalisés. Deux dans le jardin de la maison Louis XI rue des 4 fils Aymon, dénomés SC1 et SC2 et un dans le jardin de l'évêché situé au 7 bis rue des 4 fils Aymon, dénomé SC3. Pour ces sondages carottés il a été nécessaire d'utiliser plusieurs sections de tubes pour chacune des carottes réalisées. Les sections en question mesurent 90 cm de long et font 10 cm de diamètre.

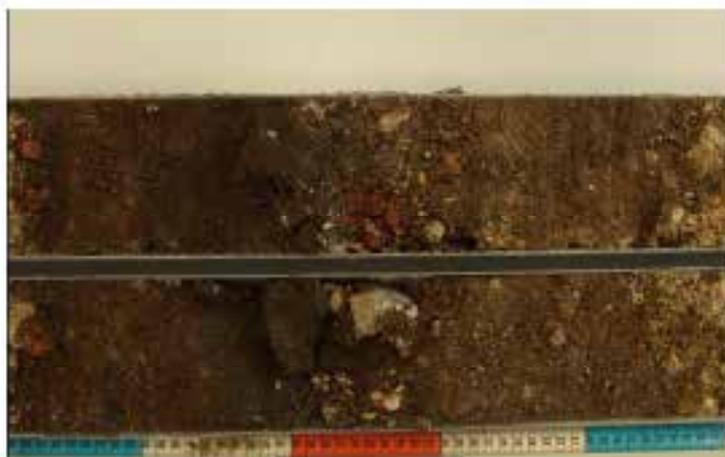
Chacune des sections de carottes récupérée a ensuite été transportée jusqu'aux laboratoires de l'Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre (composante de l'Université d'Orléans en collaboration avec l'ISTO) où elles ont été ouvertes et décrites.

Les différentes sections des 3 carottes ont été décrites à l'aide d'une fiche pré-établie permettant une lecture simple des carottes par tout le monde. De nombreux points ont été observés et recensés permettant de caractériser chacune des sections : la texture ; la couleur ; la proportion, la taille et la nature des éléments grossiers ; la présence d'éléments de nature anthropique tels des fragments de briques ou de charbons ; la présence d'éléments organiques ; la consolidation et l'humidité. Une section de carotte ouverte et prête à être décrite peut être observée sur la photographie 3 ci-dessous.

Après avoir été finement décrites, chacune des carottes a été reconstituée sur le logiciel de traitement d'images Adobe Illustrator. Ainsi, un log stratigraphique de chacun des 3 terrains sondés a pu être reconstitué. Les carottes de sol nous permettent d'observer directement le matériel et de visualiser chacune des couches anthropiques. On obtient donc également, en un point donné, l'épaisseur presque exacte (à quelques centimètres près) du dépôt archéologique. Sur Adobe Illustrator on peut donc reconstituer cette épaisseur de dépôt en reconstituant les logs stratigraphiques.

Par ailleurs, l'avantage de cette méthode est que l'en connaissant l'altitude du point de carottage et avec le relevé de l'épaisseur du dépôt archéologique il est directement possible de connaître, en ce point, le niveau des premières strates géologiques. Les sondages carottés constituent une bonne méthode de reconstruction de l'allure et de la nature du sol et du sous-sol. Cependant ils nécessitent un certain budget et constituent, bien que légèrement, une méthode destructrice. Enfin, comme dit précédemment, l'épaisseur des différentes couches obtenue est faussée et présente une incertitude de l'ordre du cm. En effet les 10 premiers cm de chaque section constituent souvent du matériel qui n'est pas en place ou qui a été pollué par un autre type de matériel lorsque le tube a été enfoncé dans le sol. A l'intérieur du tube le matériel est parfois plus tassé qu'il ne devrait.

Prise de vue d'une des sections de la carotte SCS



Photographie 3 : Photographie d'une section de la carotte SCS réalisée dans le jardin de l'évêché rue des 4-ils Ayrault. Sur la photographie peuvent être observées 3 niveaux plus grossiers et plus clairs que les autres. Ils ont été interprétés comme des potentiels niveaux de remblai anthropique. Cette hypothèse est appuyée par la présence de morceaux de briques. Les autres horizons sont plus sombres et correspondent simplement à du matériel sablo-argileux. Il s'agit probablement d'une phase d'abandon de la zone.

II. Résultats

Après que les sondages aient été réalisés au cours de la première semaine du projet, toutes les données ont été récupérées et dépouillées (carottes, pénétrogrammes, données géotechnique) pour voir quels résultats il en sortait.

A. Présentation des résultats géotechniques

N° de sondage	Altitude du Sol actuel (NGF)	Altitude du TN (NGF)	Indice de confiance	Épaisseur du dépôt (m)
514	97,9	93,8	0	4,1
515	97,95	91,95	0	6
516	99	91,5	0	7,5
520	96,64	90,14	0	6,5
521	96,64	85,14	0	7,5
251	106,3	104,6	0	1,7
253	106,3	101,7	0	4,6
265	106,3	102,5	0	3,8
255	106,3	104,7	0	1,6
264	106,3	105,3	0	3
1136	107,16	101,16	2	6
1134	107,12	105	1	2,1
1133	107,13	96,38	1	8,8
1129	107,38	105,38	1	2
1127	107,13	100,68	1	6,5
1056	99,6	96,1	2	3,5
1057	99,55	94	2	5,5
1068	100,15	97,15	2	3
1137	105,68		0	
1138	105,68		0	

Figure 5 : Tableau regroupant l'ensemble des données géotechniques qui ont été récupérées dans le cadre de données SICAVOR. Tous les sondages présentés ici correspondent aux sondages présentés sur la carte en figure 3. Il peut être constaté que les données géotechniques nous donnent directement l'épaisseur du dépôt archéologique en mètres aux points de sondages donnés. Cependant il est visible sur ce tableau, comme sur la figure 3, que de nombreux sondages présentent un indice de confiance de 0. L'épaisseur du dépôt donnée ici n'est donc peut-être pas représentative de la véritable épaisseur.

B. Résultats des sondages pénétrométriques réalisés dans les cavités souterraines.

Tous les pénétrogrammes obtenus à l'aide de l'exploitation des données pénétrométriques ne peuvent pas être présentés dans les résultats. Il a donc été choisi de présenter deux des trois pénétrogrammes réalisés à partir des données récupérées dans les cavités souterraines. Les autres pénétrogrammes sont présentés en annexe.

Comme décrit auparavant, les pénétrogrammes présentent en abscisse la résistance du sol à l'enfoncement de la pointe et en ordonnée la profondeur en mètres. Pour lire correctement un pénétrogramme il faut tenter de distinguer les sections qui semblent présenter un comportement différent au vu de la résistance du sol. Il est également important de faire attention aux pics de résistance qui peuvent témoigner de la présence d'une couche fine de remblai ou bien d'une voie de circulation par exemple. Le pic pourra sembler local, il s'agira pourtant d'un élément de nature anthropique à ne pas loupier. Cependant, un pic ponctuel peut également témoigner du passage d'un caillou, d'une brique ou de quelque chose qui n'est pas représentatif du milieu traversé. Cette fois le pic local correspond à une anomalie. Pour s'assurer d'un dépouillage le plus correct possible il est possible d'utiliser un référentiel établi à l'aide de la réalisation d'un tableau dynamique croisé. La présentation du référentiel est faite par la suite. Le pénétrogramme SP12 présenté en figure 7 a été finement dépouillé à l'aide de ce référentiel de sorte à pouvoir construire la coupe N-S au plus proche de la réalité.

Pénétrogramme SP11

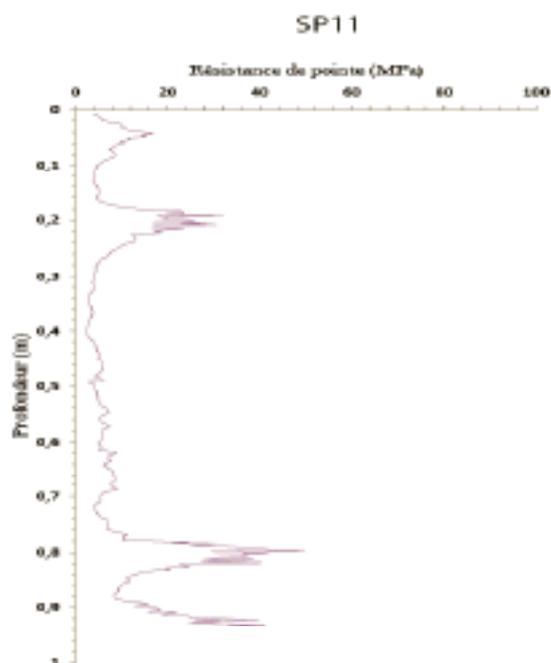


Figure 6 : Pénétrogramme obtenu depuis le sondage SP11 réalisé dans l'ancienne caveière située 4 Rue Coligny. Un maître de sondage a veillé pour atteindre le substrat naturel soit le calcaire de Blois. Sur ce pénétrogramme il est possible d'observer plusieurs pics. Le premier pourrait correspondre à une couche de terre battue et le deuxième semble bien correspondre à une couche de remblai anthropique.

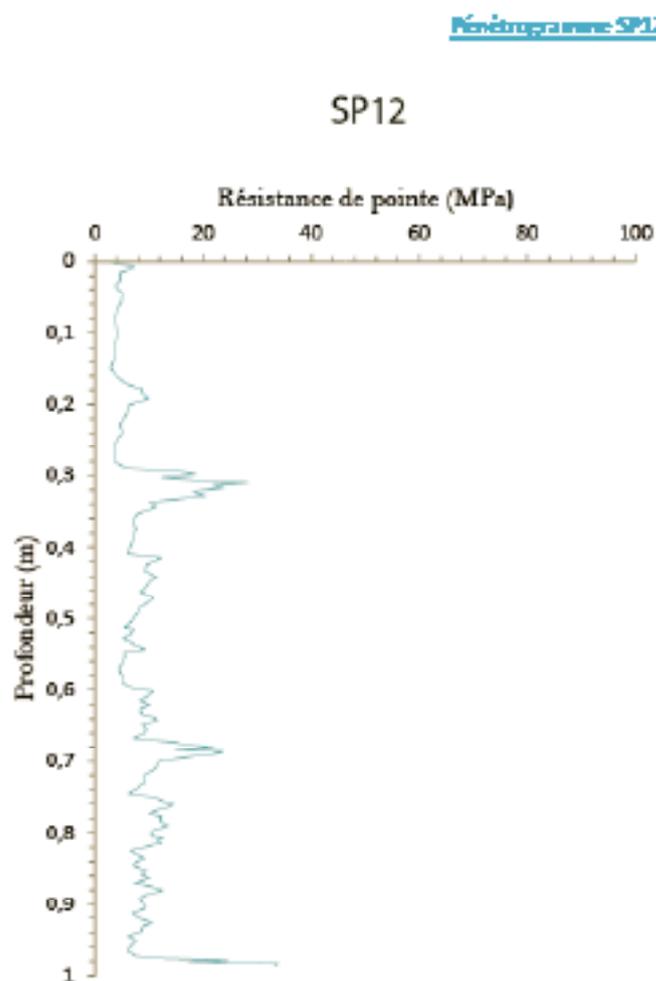


Figure 7 : Pénétragramme obtenu à partir du sondage SP12. Il s'agit d'un des deux sondages réalisés au sein de la cavité de stockage située à Rue Edouard Fournier. Le substrat naturel a été atteint à partir d'environ 0,75 m de profondeur. Le déplacement a été réalisé à l'aide du rétroscopier présenté par la suite.

C. Présentation des pénétrogrammes étalonnés à l'aide des carottes de sol

L'analyse des trois carottes de sol a permis de calibrer les trois pénétrogrammes correspondants. La description des carottes est présentée sur les trois logs reconstitués ci-dessous. La légende des différentes carottes de sol est lisible en figure 11.

Pénétrogramme SP5 étalonné à l'aide des données de la carotte SC1

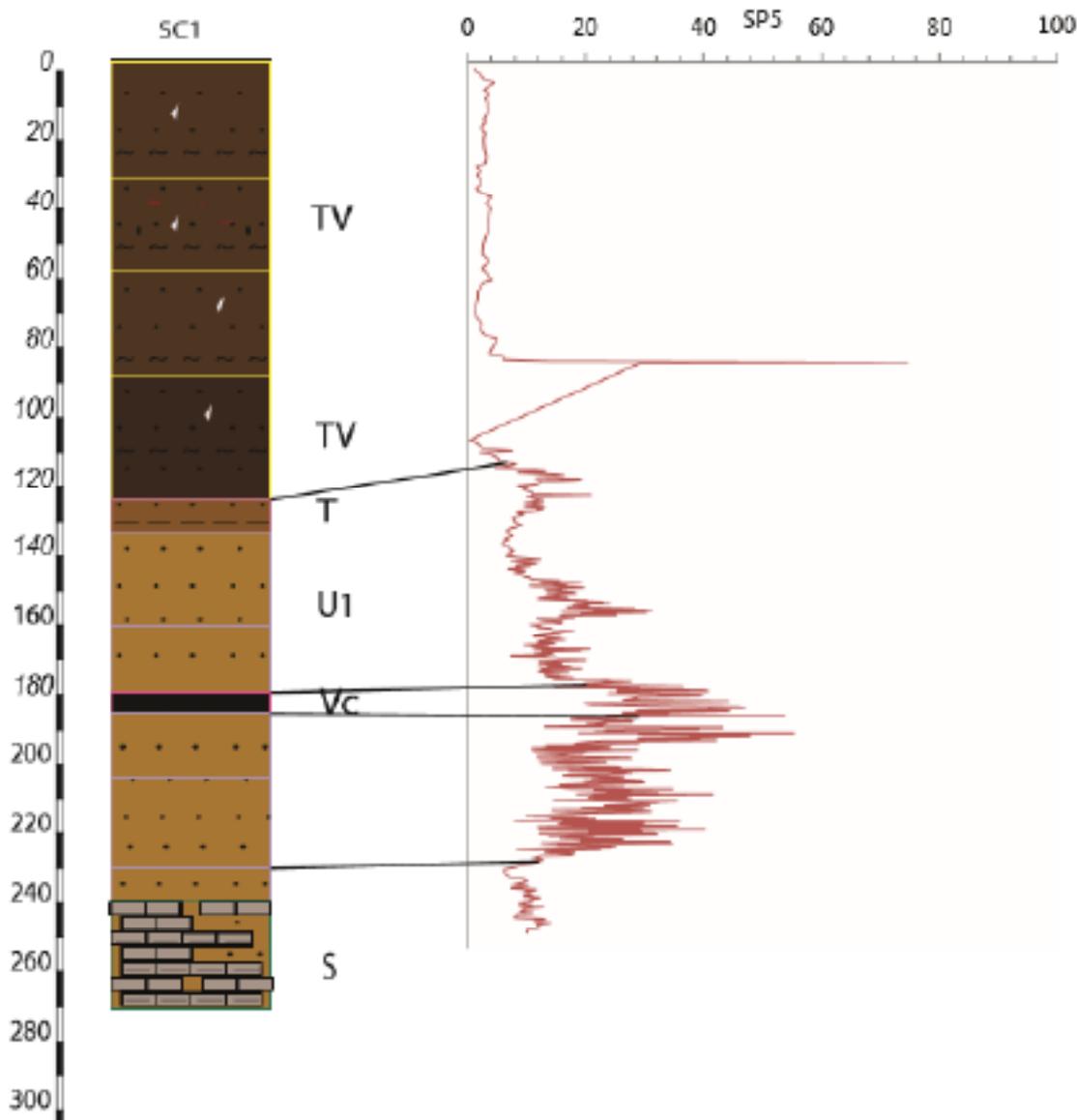


Figure 11 : Présentation de la carotte SC1 reconstituée sur Adobe Illustrator et du pénétrogramme SP5 obtenu à l'aide des sondages réalisés derrière le rez-de-chaussée Louis XII Rue des 4 fils Aymon. L'échelle verticale est également respectée en ce qui concerne le pénétrogramme. Il n'y a pas d'échelle horizontale. Les traits pleins noirs relient des sections de la carotte et du pénétrogramme qui semblent se correspondre. Par exemple le trait plein inférieur constitue une interprétation possible du toit du terrain géologique. C'est l'interprétation qu'il a été choisi de garder. L'horizon Vc de la carotte SC1 a été interprété comme étant une voie de circulation.

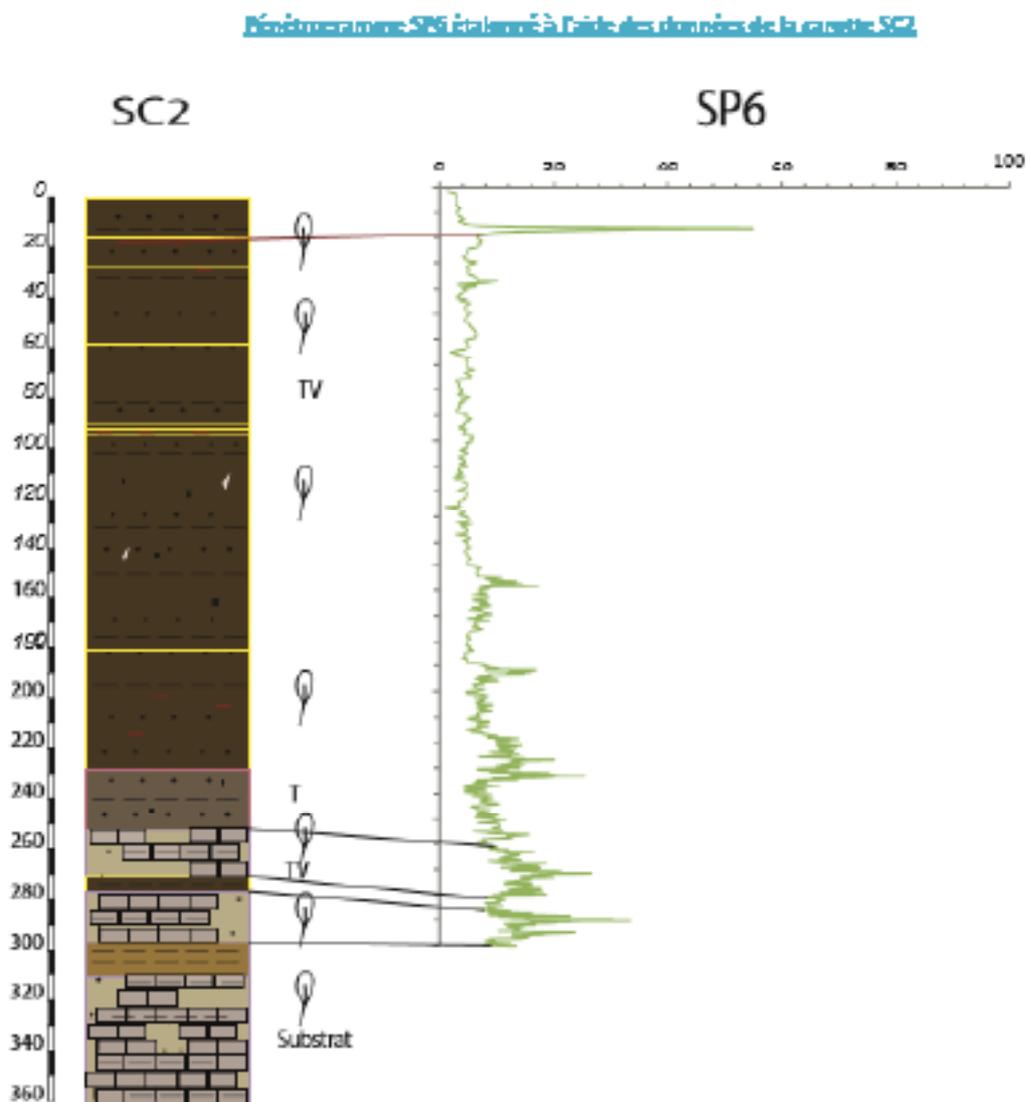


Figure 9 : Présentation de la cavette SC2 reconstituée sur Adobe Illustrator et du pénétrogramme SP6 correspondant. Les sondages pénétrométriques et corotés ont été réalisés dans la cavité de stockage située 8 Rue Edmond Fournier. Le trait plein supérieur met en valeur un pic très intense sur le pénétrogramme qui semble correspondre à une anomalie due à la présence de briques dans le sol. Les valeurs de résistance plus intenses en bas du pénétrogramme ont été interprétées comme correspondant à des horizons de culture maraichères abîmés.

Pénétragramme SPT étalonné à l'aide des données de la carotte SC3

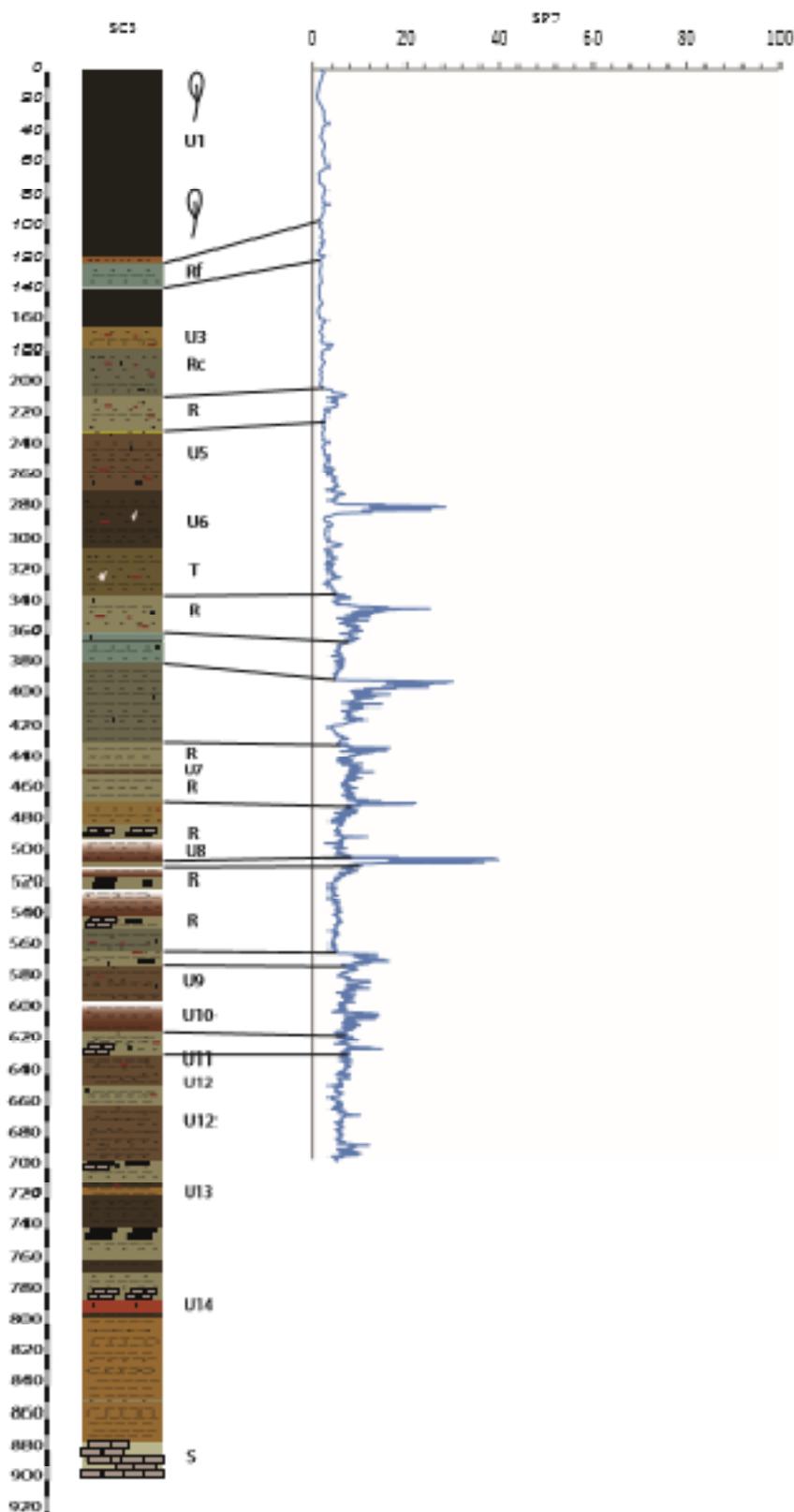


Figure 28 : Présentation de la carotte SC3 reconstruite sur Atlas Illustrator et du pénétragramme SPT correspondant. Sur cette figure il est possible de voir les variations de résistance des horizons correspondant à des remblais anthropiques. Il est même possible de distinguer différents types de remblais. Le sondage pénétrométrique n'a pas permis d'atteindre le substrat naturel. Le substrat (calcaire) n'a été atteint qu'avec le sondage carotté.

Légende

Un : Unité stratigraphique		Elément de végétation
R : Remblai		Os
Rf : Remblai friable		Charbons
Rc : Remblai consolidé		Briques
T : Transition		Limons
Tv: Terre végétale		Sables
S : Substrat		Argiles
		Calcaire

Figure 11 : Légende des différentes crevettes de sol reconstituées sur le logiciel Adobe Illustrator.

III. Interprétation

A. Présentation du référentiel utilisé pour l'interprétation des pénétrographes

Tableau dynamique créé des données pénetrographiques

NUM_SP	US	Type	Moyenne de Résistance de pointe (MPa)	Écartype de Résistance de pointe (MPa)
1	(vide)	(vide)	6,081707317	3,52079218
2	SP2_U1	Sol argileux	6,992258065	3,792653093
3	(vide)	(vide)	10,72374074	2,757469265
4	SP4_U1	Sol argileux	13,58148352	3,838241427
5	SP5_U1	TV	17,01904332	10,1245705
	SP5_U2	Sol	8,900625	1,906090465
	SP5_U3	Sol	19,4274359	8,584431441
	SP5_U4	Vc	32,52821429	9,319048868
	SP5_U5	calcaire_marneux	10,84333333	1,705311962
6	SP6_U1	TV	8,095233161	5,930087468
	SP6_U2		10,07493671	4,776890469

Figure 12 : Le référentiel permettant l'interprétation des pénétrographes est un tableau dynamique créé réalisé sur le logiciel Excel. Il regroupe et croise toutes les données récupérées lors des sondages.

Le référentiel a été construit de sorte à regrouper les unités présentant globalement les mêmes résistances de pointe et se rassemblant autour d'une même moyenne. Le but est de voir si à l'aide des valeurs de moyenne et d'écart-type de la résistance, il est possible de caractériser les différentes unités de remblai, de sol et de substrat et surtout de les distinguer. Cette méthode a donc été utilisée ici pour au minimum tenter de différencier l'horizon de calcaire ou du moins le toit du terrain géologique du terrain anthropique.

Dans un tableau Excel ont été reportées les données de résistance de pointe, de profondeur et d'altitude, quand elles étaient renseignées, concernant chacun des sondages pénétrométriques. Ensuite une partie des sondages pénétrométriques a été étalonnée à l'aide des données obtenues lors des sondages et lors de la description des carottes de sol. Chaque unité stratigraphique dont on connaissait la position (en m NGF) a été renseignée sur les pénétrogrammes correspondants. Par exemple, la carotte SC2 nous montre qu'au point de sondage, la terre végétale s'étend jusqu'à 2,30 m sous le sol actuel. Sur le pénétrogramme correspondant (SP6) il donc été indiqué que depuis le niveau de la surface et jusqu'à 2,30 m de profondeur, les valeurs de résistances obtenues correspondent à des valeurs de résistance de terre végétale.

De la sorte, un certain nombre d'unités stratigraphiques a été renseigné et il a de plus été indiqué le type ou la nature de l'unité en question. Les différents types d'unités stratigraphiques ont été rassemblés en 5 catégories : terre végétale, remblai, sol, sol argileux, calcaire ou calcaire mameux.

Enfin, le tableau dynamique croisé a été construit en plaçant en étiquette de ligne le numéro du sondage, les différentes unités stratigraphiques ainsi que leur type. Puis il a été calculé la moyenne de résistance du sol pour chaque sondage, pour chaque Unité stratigraphique et pour chaque type d'unités. L'écart-type a également été calculé pour chacun de ces découpages.

Lors de la réalisation de ce tableau l'objectif fut de savoir s'il était possible de caractériser les l'apparition des strates géologiques au sein des sondages non étalonnés à l'aide des moyennes et des écart-types de résistance des strates géologiques des sondages renseignés et étalonnés. L'objectif fut même de savoir s'il était possible de caractériser toutes les Unités stratigraphiques de nature différente ou du moins distinguer entre elles différentes unités anthropiques. Cependant pour cela il aurait fallu distinguer toutes les unités or les unités stratigraphiques appartenant à un même type ont été rassemblées sous un même nom.

C'est pourquoi ici le tableau a été dépouillé manuellement. Il a été possible de retrouver l'apparition du toit des premières strates géologiques au sein de chaque sondage par une analyse fine des valeurs de moyenne et d'écart-type en fonction de la profondeur. Si l'on analyse bien les valeurs obtenues il est possible de remarquer que le calcaire présente une moyenne de résistance de pointe assez élevée et un écart-type faible, entre 1,5 et 2,5. Les remblais anthropiques, eux, présentent systématiquement un écart-type assez élevé (aux alentours de 4,5) du fait de leur nature hétérogène. Par ailleurs, à l'instar du calcaire, un sol naturel argileux présente une moyenne légèrement plus faible que celle du calcaire mais un écart-type relativement faible également.

A l'aide de ces analyses il a enfin été possible de réaliser les coupes du quartier Saint-Aignan passant par les différents sondages en pouvant replacer sur chaque pénétrogramme l'apparition du toit du terrain géologique déduite de l'étude du référentiel.

B. Présentation des coupes réalisées

Coupe Nord-Sud du quartier Saint-Aignan réalisée depuis les sondages géotechniques :

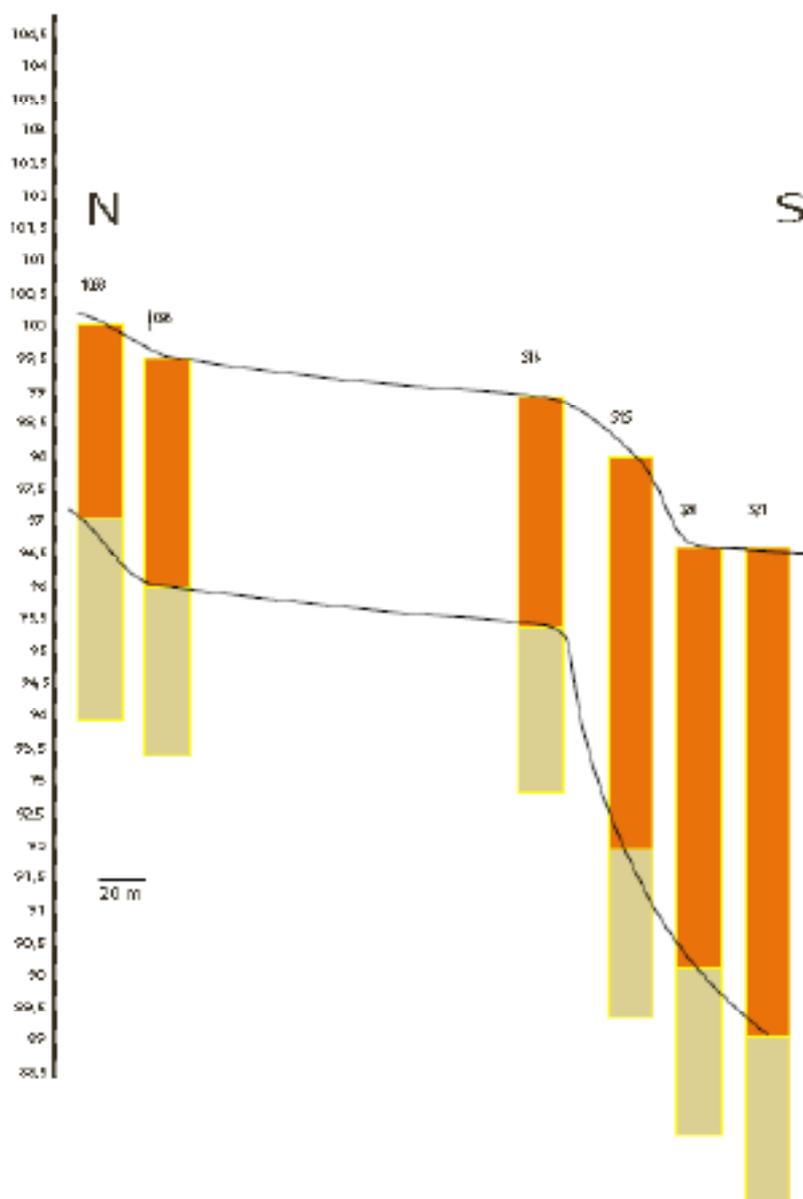


Figure 13 : Coupe Nord-Sud du quartier réalisée à partir des données récupérées des sondages géotechniques. Le trait plein supérieur correspond au niveau du terrain naturel. Le trait plein inférieur correspond à l'allure du terrain géologique. Sur l'échelle verticale figure les cotes NGF.

Cette coupe permet de visualiser et de caractériser assez finement l'épaisseur et l'allure du dépôt archéologique du Nord au Sud dans la partie Ouest du quartier. Il est possible de constater que l'épaisseur du dépôt varie et qu'elle augmente plus on se rapproche du Sud. Cependant il est important de noter que l'allure du dépôt archéologique semble suivre l'allure du terrain naturel. Ainsi il serait possible d'émettre l'hypothèse que les hommes ont aménagé et remblayé le sol au cours de l'histoire en fonction du terrain naturel.

Coupe N-S du dépôt archéologique de la partie ouest du quartier Saint-Nicolas

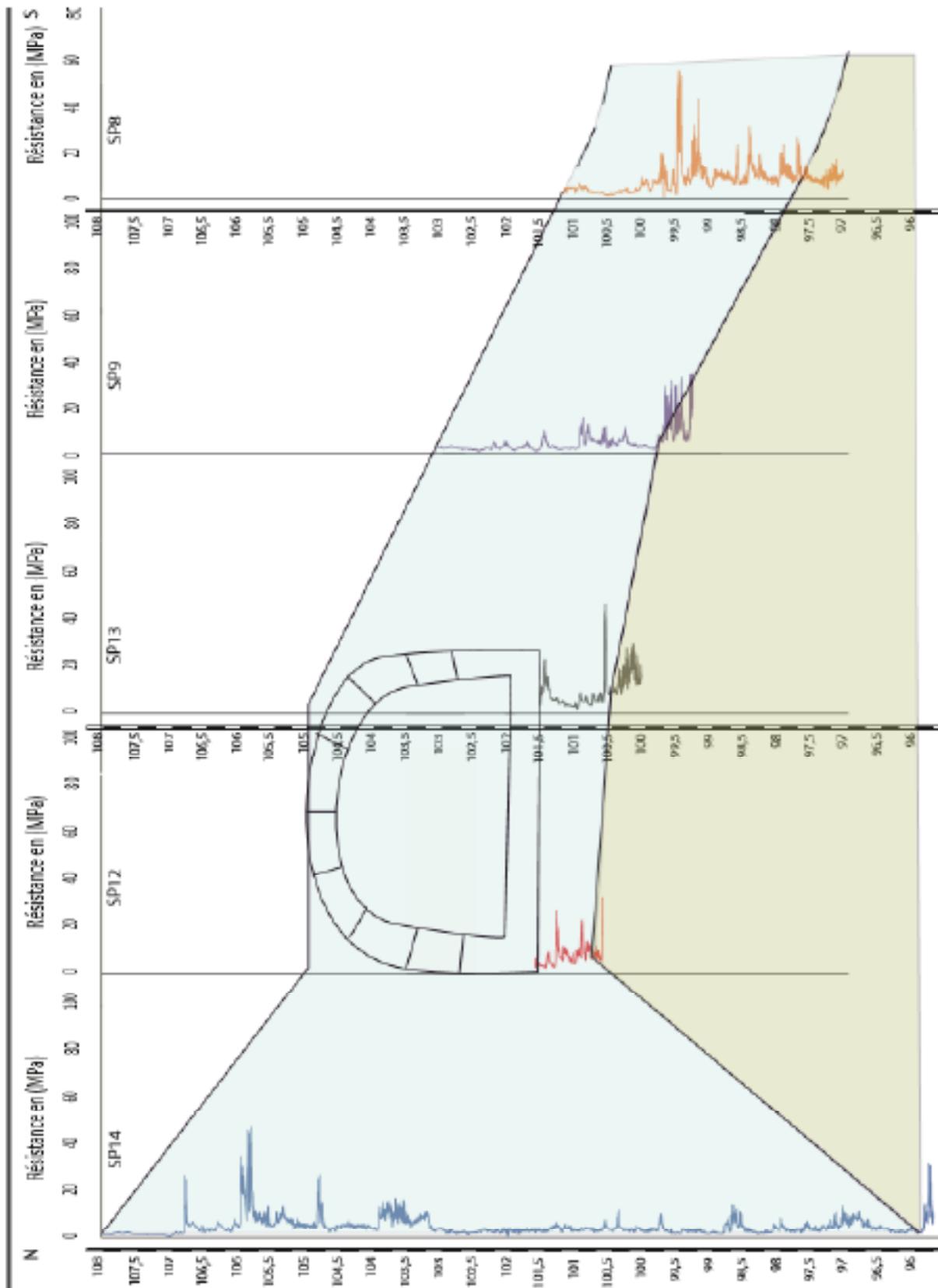


Figure 34 : Cette coupe a été réalisée à l'aide des données de 5 sondages pénétrométriques. En bleu est représenté le dépôt archéologique. En orange clair est représenté le terrain géologique. L'échelle verticale est la même pour tous les sondages. Cependant les sondages ne sont pas placés horizontalement à l'échelle les uns des autres.

Les différents pénétrogrammes ont pu être replacés sur la coupe grâce à un relevé topographique des zones sondées. Les altitudes en NGF des différents points ont pu être relevées grâce à l'utilisation d'une mire. Une photographie de cet appareil est présentée en annexe.

Il peut être constaté que l'épaisseur du dépôt au niveau du sondage SP14 ne semble pas être représentative du milieu. Il est possible que le sondage corresponde à une anomalie ponctuelle. Il se peut également que la nature karstique du milieu implique la présence d'un « fossé naturel » au niveau de cette zone ou d'une doline qui aurait été remplie par du matériel anthropique au cours de toute l'occupation humaine de la ville.

Si l'on exclue le sondage SP14, le dépôt archéologique semble bien suivre l'allure du terrain géologique. Cette fois l'épaisseur du dépôt diminue vers le sud mais elle varie beaucoup moins latéralement que ce qu'il était possible de voir sur la coupe géotechnique. Il est important de noter que les deux coupes ont la même échelle verticale. Elles peuvent donc être comparées sans problème.

On note que les sondages en cavités souterraines ont permis ici d'apporter des informations sur l'apparition du calcaire. Ils permettent de préciser les connaissances que l'on a sur l'épaisseur du dépôt archéologique. Ici il est également possible de voir que le toit du calcaire ne se situe pas directement au niveau du sol de la cave. On constate la présence d'environ un mètre de matériel anthropique pouvant correspondre à du remblai ou à de la terre battue.

Coupe N1W-SSE du dépôt archéologique de la partie centrale du quartier Saint-Aignan

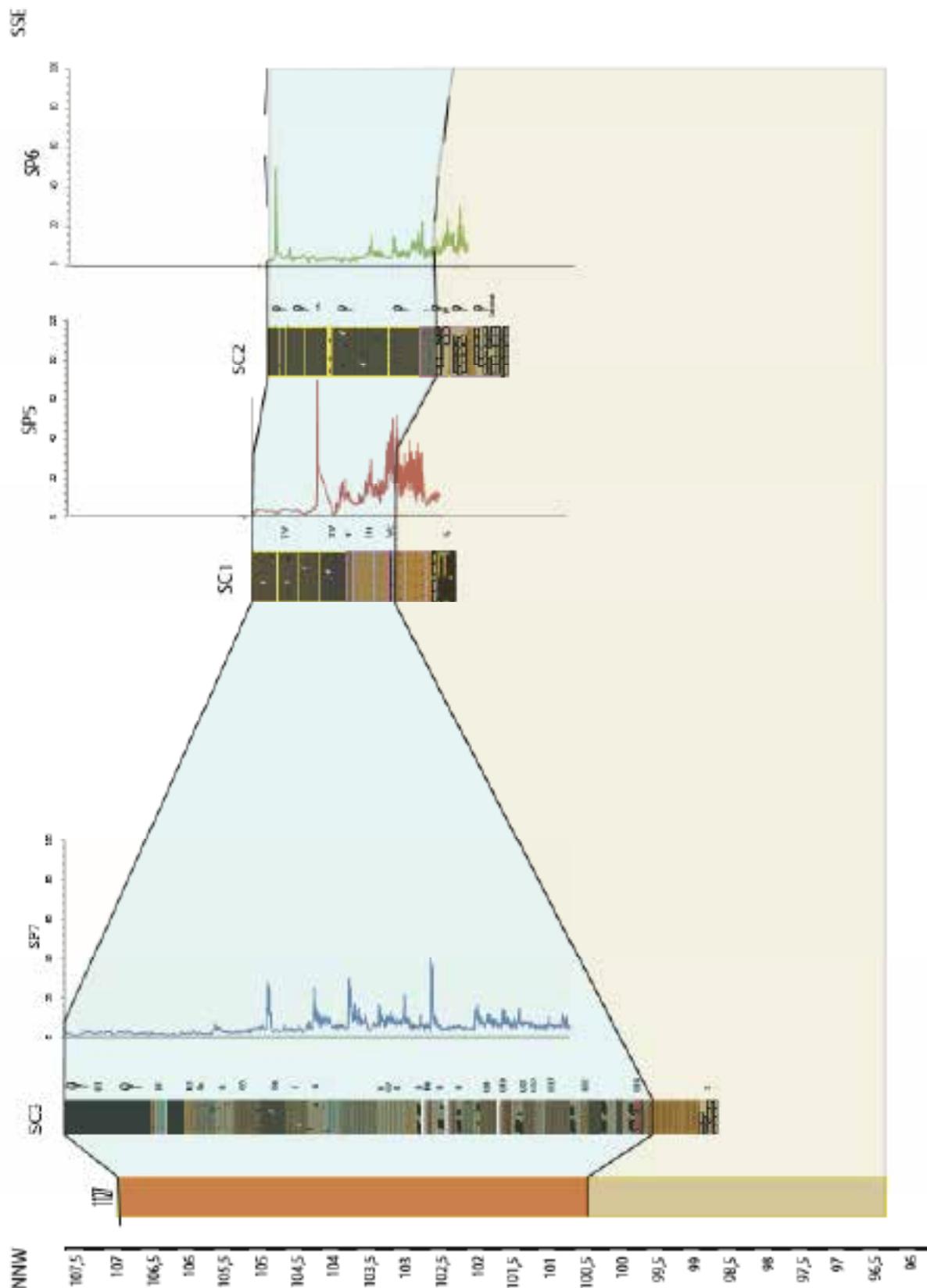


Figure 15 : Sur cette coupe figure en bleu clair le dépôt archéologique et en orange clair le terrain géologique. La distance entre les différents sondages n'est pas respectée.

Cette coupe montre que l'épaisseur du dépôt archéologique varie latéralement. Au niveau du sondage SF7 le dépôt archéologique ne semble pas suivre l'allure du terrain géologique. Il semble que l'on soit en présence d'une anomalie ou bien d'une ancienne fosse remplie par du matériel anthropique. Le toit du dépôt s'abaisse lorsque l'on va vers le Sud. Il peut être constaté ici que la variation d'épaisseur ne suit pas la même logique que ce qui est montré par la coupe géotechnique.

IV. Conclusions et perspectives

L'épaisseur du dépôt archéologique à l'échelle du quartier Saint-Aignan n'est pas constante et varie latéralement. Elle varie également du Nord vers le Sud. Plusieurs endroits montrent une épaisseur de dépôt archéologique bien plus élevée que ce à quoi on pouvait s'attendre. Les différents sondages qui ont été réalisés montrent que la nature géologique instable du milieu semble avoir un impact non négligeable sur l'épaisseur du dépôt. Les sondages carottés et pénétrométriques ont également permis de mettre en valeur le fait que la nature du dépôt varie également en fonction de la zone étudiée. Le quartier Saint-Aignan est donc caractérisé par un dépôt archéologique relativement hétérogène. Cette hétérogénéité témoigne de la nature géologique complexe du milieu mais aussi très probablement de la nature complexe de l'histoire anthropique de la zone étudiée. Cependant seules des hypothèses sont formulées ici quant à la nature de cette variation d'épaisseur et de composition. Ces différents sondages ont certes permis de caractériser en partie la nature anthropique du milieu mais ont également permis de soulever de nombreuses questions notamment sur les zones présentant une anomalie ponctuelle. Les sondages pénétrométriques et carottés constituent une bonne méthode d'investigation du sol et du sous-sol, cependant pour une bonne analyse du milieu il faudrait qu'ils soient démultipliés sur ce site d'étude. Par ailleurs l'étude des cavités souterraines a permis de compléter les connaissances que l'on a sur l'épaisseur du dépôt archéologique et notamment en profondeur. En revanche il n'a été visité que peu de cavités au cours de ce projet et il serait également judicieux de multiplier les points de sondages en cavités souterraines et notamment dans des cavités de différentes natures de sorte à pouvoir envisager s'il est possible d'établir un lien entre épaisseur du dépôt en profondeur au sein de la cavité et nature et fonctionnement de celle-ci.

Enfin, il est important de remarquer que cette collaboration a permis de mettre en valeurs les apports de la géologie à l'archéologie et inversement. Ces deux domaines sont intrinsèquement liés et il a été remarqué que les méthodes d'analyse du sol utilisées en archéologie peuvent compléter les résultats obtenus par les méthodes géologique et vice-versa. Ce projet a permis de souligner le fait que l'étude des interactions Homme-milieu nécessite les connaissances que l'on a dans chacun de ces deux domaines d'étude.

V. Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier Amélie Laurent pour son encadrement durant ce projet ainsi que pour sa patience et pour toutes les connaissances qu'elle nous a apportées. Je tiens également à remercier Clément Aïo, Daniel Morleghem et toutes les personnes du SAMO pour leur accueil et pour le temps qu'ils nous ont accordé. Pour finir j'aimerais remercier Anaëlle Simoneau pour toute l'aide qu'elle nous a apporté et pour ses conseils lors de la réalisation de ce rapport.

VL Références bibliographiques

Articles scientifiques :

- Mesurer la ville par l'évaluation et la caractérisation du sol urbain, l'exemple de Tours, Laurent et Fondrillon, 2010.
- Utilisation du pénétromètre dynamique de type PANDA en milieu urbain pour l'évaluation et la caractérisation du dépôt archéologique, Galinié et al, 2003.

Sites internet et bases de données :

- Géoportail
- Google Earth/Google Maps
- Base de données SIG du projet SICAVOR
- Site internet du Pôle d'archéologie d'Orléans Métropole : <http://archeologie-orleans-metropole.fr/>

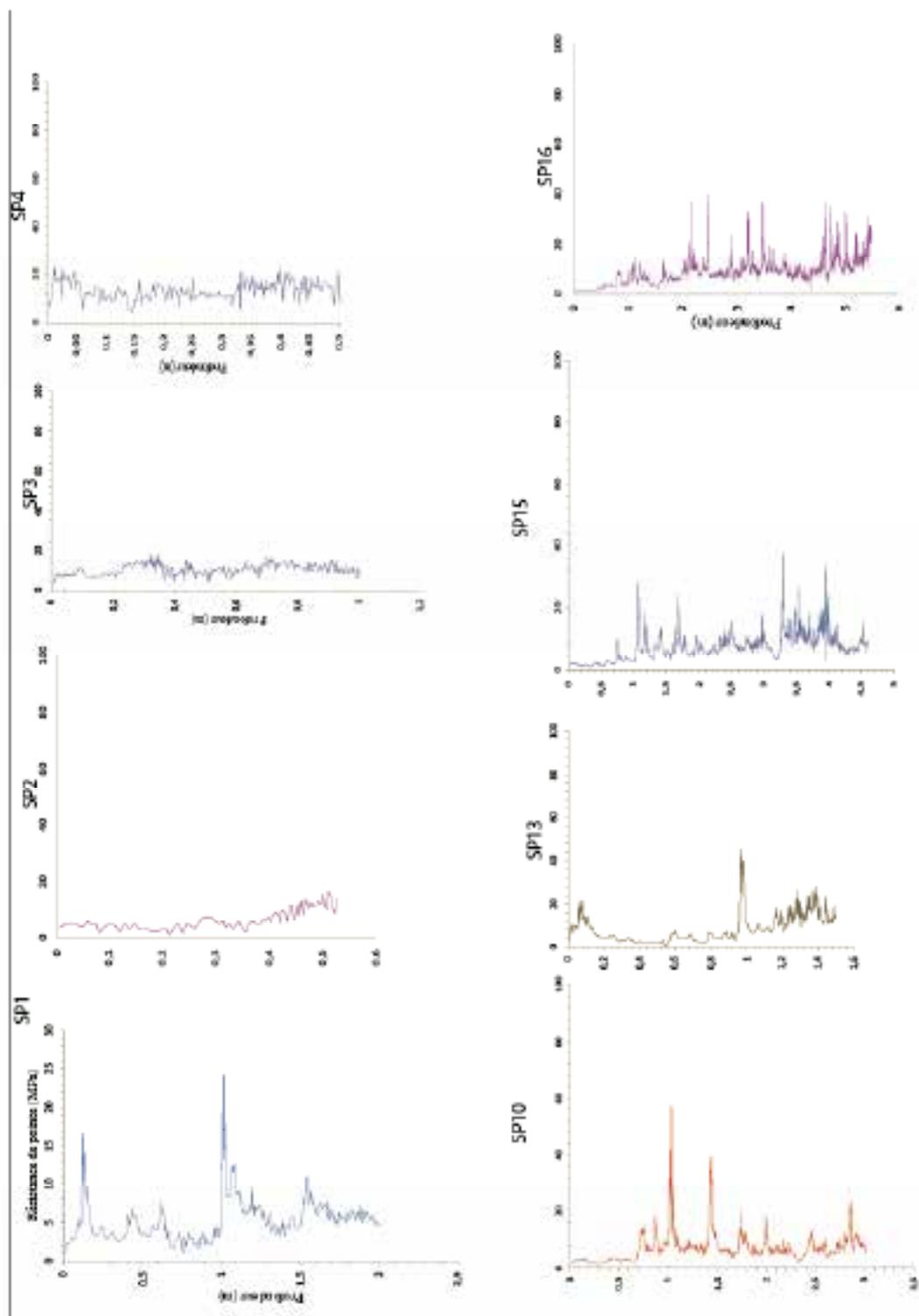
Cartes :

- Carte géologique d'Orléans au 1 : 50 000

Table des illustrations :

Figure 1 : Cadastre du quartier Saint-Aignan sur lequel figure la voirie.....	6
Figure 2 : Cadastre du quartier Saint-Aignan sur lequel figure l'emprise des cavités souterraines.....	7
Figure 3 : cadastre du quartier Saint-Aignan sur lequel figurent une partie des sondages géotechniques.....	9
Figure 4 : Cadastre du quartier Saint-Aignan sur lequel figure la répartition des sondages pénétrométriques et carottés.....	10
Figure 5 : Tableau regroupant l'ensemble des données géotechniques qui ont été récupérées dans la base de données SICAVOR.....	12
Figure 6 : Pénétrogramme obtenu depuis le sondage SP11.....	13
Figure 7 : Pénétrogramme SP12 obtenu à partir du sondage SP12.....	14
Figure 8 : Présentation de la carotte SC1 reconstituée et du pénétrogramme SP5.....	15
Figure 9 : Présentation de la carotte SC2 reconstituée et du pénétrogramme SP6.....	16
Figure 10 : Présentation de la carotte SC3 reconstituée et du pénétrogramme SP7.....	17
Figure 11 : Légende des différentes carottes de sol reconstituées sur le logiciel Adobe Illustrator.....	18
Figure 12 : Référentiel permettant l'interprétation des pénétrogrammes.....	18
Figure 13 : Coupe Nord-Sud du quartier réalisée à partir des données récupérées des sondages géotechniques.....	20
Figure 14 : Coupe N-S du dépôt archéologique dans la partie ouest du quartier.....	21
Figure 15 : Coupe NNW-SSE du dépôt archéologique de la partie centrale du quartier.....	23

Annexe 1



Présentation des différents pénétrogrammes qui n'ont pas été décrits plus en avant dans ce rapport. Les différents pénétrogrammes ici ne sont pas à l'échelle ils ont simplement été apposés de sorte à pouvoir observer leur allure et voir quelles informations ils peuvent apporter.

Annexe 2



Photographie de la mine qui a été utilisée pour faire les relevés de la topographie

RAPPORT DE DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE DE LA CAVE SICAVOR 140, RUE DE LA POTERNE (APPUISOL)



Agence d'Orléans
254 rue des Sablons de Sary
45770 SARAN
Tel : 09 66 96 21 32
contact.45@appuiisol.fr

Agence de Nevers :
47016, rue Henri Bouquillard – BP 9
58022 NEVERS cedex
Tel : 09 66 96 21 32 -
contact.58@appuiisol.fr

APPUISOL
Ingénierie géotechnique

Siège social :
6, rue Jean Macé
03190 VALLON EN SULLY
Tel : 04 70 06 21 32
contact.03@appuiisol.fr

ORLEANS (45)

Rue de la Poterne

Diagnostic de caves

Client : VILLE D'ORLÉANS

RAPPORT

Diagnostic géotechnique - type G5



Dossier N° 1916-01-17					
Intitulé	Date	Élaboré par	Vérifié par	Validation/consolidation	Nbr de pages
1	31-05-2017	E. CURTY	P. MENULT	Document initial	36

AVERTISSEMENT

La présente prestation a été conduite dans le cadre d'une des missions normalisées rattachées à la norme NF P 04-500 (cf. extraits en annexe 1) et pour l'ouvrage spécifique décrit.

Toute modification du projet (masse, structure, assymétrie, etc.) ou toute modification du contexte du site (remblaiement, remaniement, etc.) ou de l'environnement (constructions, talus, etc.) peut remettre en cause les présentes conclusions.

Ce document représente un tout indissociable. Aucun élément ou aucune partie ne peut être extrait.

La prise en compte des éléments de ce rapport implique l'acceptation des Conditions Générales d'Intervention des prestations d'Ingénierie Géotechniques présentées en annexe 1 du présent rapport.

Ce présent document reste la propriété exclusive du client dès le paiement de la mission. La diffusion de ce document relève alors de son libre choix sous réserve du respect des conditions générales et des limites de l'étude.

SOMMAIRE

◆ PRÉSENTATION DU SITE ET DU CONTEXTE	4
1. Désignation de l'opération – Intervenants	4
2. Données générales sur le site	4
◆ PRÉSENTATION DE LA MISSION ET DES OBJECTIFS	9
3. Ingénierie	9
4. Investigations réalisées dans le cadre de la reconnaissance	9
5. Calage altimétrique des points de sondages	10
◆ ANALYSES DES RESULTATS DE LA RECONNAISSANCE	11
6. Enquête géologique et aléas référencés	11
7. Résultats des sondages en terrasse	12
8. Résultats des sondages en cave - niveau 2	13
9. Hydrogéologie	13
10. Examen des caves	14
◆ DIAGNOSTIC GEOTECHNIQUE	17
11. Etat des lieux des ouvrages	17
12. Aménagement de la terrasse	18
13. Conclusion – Suite à donner	18

ANNEXE 1

Extrait de la norme NF P 84-500

Conditions Générales d'Intervention des prestations d'Ingénierie Géotechniques
SYNTEC-INGENIERIE (avril 2013)

ANNEXE 2

Plans d'implantation des sondages (2)

Plans topographiques (3)

Sondages et essais (5)

PRÉSENTATION DU SITE ET DU CONTEXTE

1. Désignation de l'opération – Intervenants

Dans le cadre de l'aménagement d'une terrasse sur caves voûtées rue de la Poterne, à ORLÉANS (45), la ville d'Orléans a confié à APPUISOL une mission de diagnostic géotechnique de type G5 selon la norme NFP 94-500.

Le présent rapport fait suite au devis 1916-01-17 du 27 Janvier 2017, et à la commande du 1^{er} Février, par la ville d'Orléans.

2. Données générales sur le site

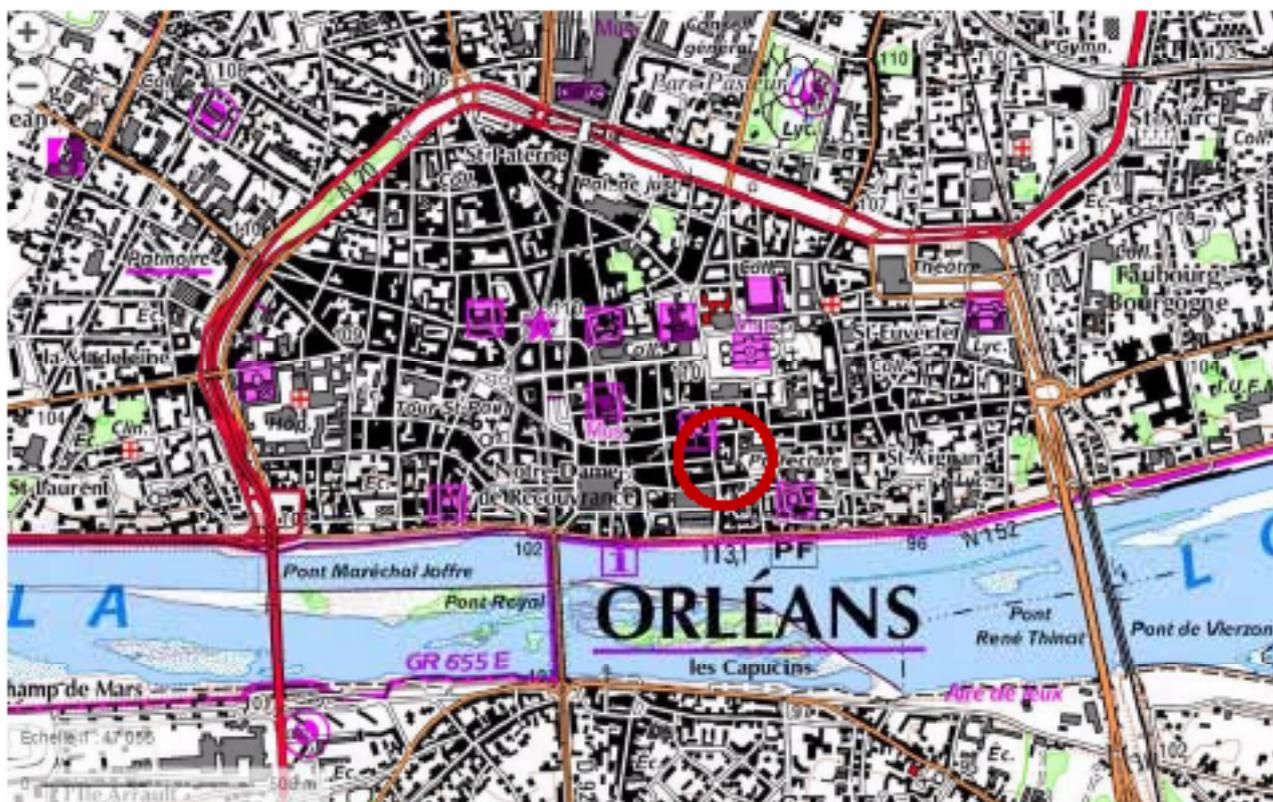
2.1. Contexte environnemental, morphologique et topographique

Les caves sont situées sous une terrasse à l'angle de la rue de la Poterne avec la venelle St Germain (parcelle cadastrée N°297), dans la partie Sud du Centre historique d'Orléans.

L'accès aux caves se fait directement depuis la terrasse, par un escalier fermé par une trappe.

La morphologie du secteur correspond à un versant fortement remblayé et occupé par le centre historique d'Orléans.

Le secteur présente une légère pente vers le sud, en direction de la vallée alluviale de la Loire. L'altitude normalisée du site s'établit proche de +106 NGF.





2.2. Contexte géologique prévisionnel et principaux aléas

D'après notre bonne connaissance du secteur, et après enquête et visite du site, la coupe géologique prévisionnelle comporte les termes suivants :

- Sols remaniés et remblais, épais,
- Vestiges de construction (maçonneries, caves, etc.),
- Colluvions de pente, et éboulis,
- Marnes à passées calcaires, +/- altérées,
- Marnes et calcaires compacts au-delà.

De plus, les principaux aléas suivants sont à prendre en compte :

- Aléa sismique très faible : zone 1,
- Très forte hétérogénéités mécaniques et lithologique des sols superficiels et semi-profonds,
- Risques cavités élevés : anciennes caves profondes, éventuellement creusées dans le toit du Beauce.

2.3. Documents transmis et présentation des ouvrages

Plans transmis : Plans topographique de la terrasse et des deux caves.

Terrasse :

Il s'agit d'une terrasse pavée d'environ 12 m x 7 m, bordée au Nord par la venelle St Germain, à l'Ouest par la rue de la Poterne, à l'Est par un jardin et au Sud par un immeuble de logements R+3.



Vue depuis la rue de la Poterne



Trappe d'accès aux caves



Vue de la terrasse vers l'Est



Vue de la terrasse vers l'Ouest

Cave - niveau 1 :

Elle présente les principales caractéristiques suivantes :

- cave voûtée avec ogives,
- dimensions : environ 11 m x 7 m,
- hauteur sous voûte : 4.4 m,
- profondeur : environ 5.5 m sous terrasse, soit +101 NGF,
- conduits vers soupiraux sur les murs Nord et Ouest.



Vue vers l'Ouest



Vue vers l'Est

Cave - niveau 2 :

Elle présente les principales caractéristiques suivantes :

- cave voûtée,
- dimensions : environ 11 m x 6 m,
- hauteur sous voûte : 2.15 m,
- profondeur : environ 9.5 m sous terrasse, soit +87 NGF,
- conduit vers niveau supérieur sur le mur Ouest.



Vue vers l'Ouest



Vue vers l'Est

Le sol de la cave - niveau 2 présente un léger affaissement, d'environ 1.0 m x 1.5 m d'emprise et d'environ 0.3 m de profondeur.

Il pourrait correspondre à d'anciennes fouilles archéologiques ou à un forais lié à des cavités profondes naturelles ou anthropiques.



Affaissement du sol de la cave - niveau 2



Détail de l'affaissement

PRÉSENTATION DE LA MISSION ET DES OBJECTIFS

3. Ingénierie

3.1. Cadre normatif de la mission

Il s'agit d'une mission de diagnostic géotechnique sur ouvrage présentant des désordres (G5), selon la norme NF P 04-500, de novembre 2013. Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon strictement limitative, à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle. Ce diagnostic géotechnique précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.

Elle consiste à, selon la norme en vigueur :

- Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'étude de l'état général de l'ouvrage existant.

3.2. Détail de la prestation d'ingénierie

Dans le cadre particulier de cette mission, la prestation d'ingénierie a comporté :

- Une enquête géologique,
- Une enquête sur les aléas référencés sur le secteur (sismicité, retrait gonflement, cavités, inondations, instabilité de terrains...),
- Un examen des caves, avec relevé des éventuels désordres,
- Le suivi des prestations de sondages,
- Le dépouillement et l'interprétation des mesures géotechniques réalisées in-situ,
- L'établissement d'un état des lieux des ouvrages avec recommandations sur les aménagements possibles de la terrasse.

4. Investigations réalisées dans le cadre de la reconnaissance

Le diagnostic géotechnique s'est appuyé sur les investigations suivantes, compte tenu de l'accès délicat à la terrasse et aux caves

- 1 examen des caves avec relevé des éventuels désordres,
- 2 excavations manuelles (E1 et E2) au niveau de la terrasse pour le relevé de sa structure et la visualisation des terrains de recouvrement des caves,
- 2 sondages au pénétromètre dynamique manuel - M : 10 kg, H : 0.5 m, pointe : 30 mm, soit 10 cm² (PDL3 et PDL4), dans la cave niveau 2, dont un dans la zone de l'affaissement de sol,
- 1 sondage à la tarière manuelle Tm3, jumelé au pénétromètre PDL3.

Les résultats des sondages sont joints en annexe 2, avec les plans d'implantation des sondages.

5. Calage altimétrique des points de sondages

L'altitude de la tête des sondages a été rattachée approximativement au système NGF à partir des plans topographiques fournis.

ANALYSES DES RESULTATS DE LA RECONNAISSANCE

6. Enquête géologique et aléas référencés

Une enquête sur plusieurs sites « internet » spécialisés a été menée préalablement à la reconnaissance :

<http://infoblene.brgm.fr> – Géologie :

X : remblais : remblais anciens argilo-sableux

g3 : Calcaires de Beauce : Marnes et calcaires

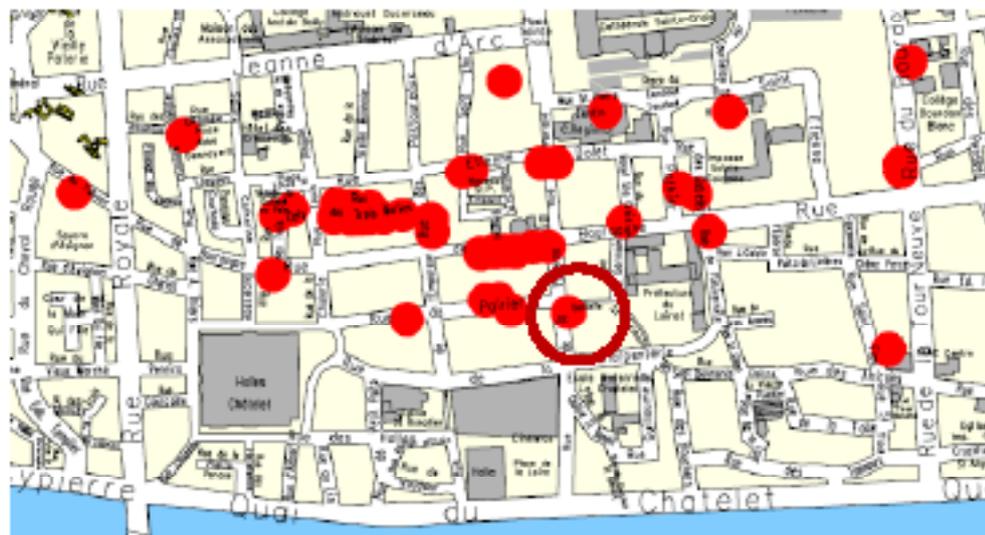
<http://www.amies.fr> – Aléa retrait gonflement a priori nul

<http://www.muscumaine.orin.net> – Zone 1 de sismicité très faible

Années de catastrophe naturelle :

Type de catastrophe	Début la	Fin la	Année du	Sur la JO du
Inondations et coulées de boue	28/05/1985	29/05/1985	02/10/1985	18/10/1985
Mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse	01/05/1989	31/12/1990	04/12/1991	27/12/1991
Mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse	01/01/1991	31/12/1991	16/10/1992	17/10/1992
Mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse	01/01/1992	31/12/1992	08/09/1993	19/09/1993
Mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols	01/01/1993	30/09/1998	10/11/1998	11/12/1998
Inondations, coulées de boue et mouvements de terrain	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Inondations et coulées de boue	07/12/2003	09/12/2003	10/12/2003	20/12/2003
Mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols	01/01/2006	31/03/2006	31/03/2006	04/04/2006
Mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols	01/04/2011	30/09/2011	11/07/2012	17/07/2012
Mouvements de terrain	14/07/2011	19/08/2011	28/11/2011	01/12/2011
Inondations et coulées de boue	28/05/2016	05/08/2016	08/09/2016	09/09/2016

<http://www.devisures.com/fr/ressources/caves-souterraines> : aléa fort – très nombreuses cavités signalées :



Remarque sur les caves

De nombreuses caves, voire galeries souterraines, parfois très anciennes (14^{ème} siècle) sont signalées dans ce secteur et ont été observées à proximité.

Le premier niveau de cave est généralement maçonné et aligné sous le bâti actuel.

Un second niveau de cave est parfois observé sous le premier niveau de cave. Il peut être obstrué, voire partiellement comblé ou effondré. Il n'est pas toujours aligné sur l'actuel bâti. Ces caves ne sont pas systématiquement maçonnées.

Enfin, plus rarement, des galeries souterraines peuvent se développer à partir du second niveau de caves. L'accès s'effectue par des escaliers généralement maçonnés qui débouchent dans des réseaux assez étroits de galeries avec une distribution aléatoire. Ces galeries sont aujourd'hui fréquemment comblées, effondrées, obstruées ou bien oubliées et non référencées.

7. Résultats des sondages en terrasse

Deux excavations manuelles (E1 et E2), poursuivie au marteau perforateur en E1, ont été réalisées pour relever la structure de la terrasse et visualiser les terrains de recouvrement des caves.

La fouille E1, réalisée dans l'axe de la terrasse, met en évidence :

- Des pavés en bois de 15 à 16 cm d'épaisseur,
- Un lit de sable de 6 à 7 cm d'épaisseur,
- Une étanchéité bitumineuse de 0.5 cm d'épaisseur,
- Une dalle en béton maigre de 13 à 14 cm d'épaisseur,
- Un polyane,
- Des blocs de pierre et/ou une maçonnerie de pierre sur 68 cm minimum (soit à partir de 0.38 m de profondeur et jusqu'à 1.02 m minimum de profondeur).

La fouille E2, réalisée en bordure Nord de la terrasse, met en évidence :

- Des pavés en bois de 15 à 16 cm d'épaisseur,
- Un lit de sable de 6 à 7 cm d'épaisseur,
- Une étanchéité bitumineuse de 0.5 cm d'épaisseur,
- Une dalle en béton maigre de 10 cm d'épaisseur,
- Un polyane,
- Des blocs de pierre à matrice mameuse et cimentation de 10 à 13 cm d'épaisseur,
- Des sables grisâtres avec blocs de pierre et débris de brique de 35 cm d'épaisseur,
- Des sables noirâtres sur 33 cm d'épaisseur,
- Une maçonnerie de pierre (à partir de 1.10 m de profondeur).

8. Résultats des sondages en cave - niveau 2

Les sondages PDL3 / Tm3 réalisés au niveau de l'affaissement mettent en évidence la succession suivante, de haut en bas :

- Des remblais marno-calcaires à débris charbonneux en tête, jusqu'à 1.4 m de profondeur,
- Des remblais marno-calcaires mélangés à des argiles sableuses noirâtres, jusqu'à 1.7 m de profondeur,
- Des marno-calcaires en blocs, jusqu'à l'arrêt du sondage Tm3 à 1.8 m de profondeur.

Les résistances dynamiques sont très faibles dans les remblais :

$$1 \text{ MPa} < R_{d1} < 2 \text{ MPa}$$

La compacité est en hausse à partir de 1.7 m de profondeur, dans les sols *a priori* en place :

$$1 \text{ à } 3 \text{ MPa} < R_{d2} < 9 / 24 \text{ MPa}$$

L'essai PDL4 réalisé en « zone saine » met en évidence des sols probablement remblayés à compacité modérée jusqu'à 0.5 m de profondeur puis faible jusqu'à 1.2 m :

$$2 \text{ à } 3 \text{ MPa} < R_{d3} < 10 \text{ à } 17 \text{ MPa}$$

Au-delà, les résistances dynamiques sont modérées à élevées :

$$5 \text{ à } 8 \text{ MPa} < R_{d4} < 27 \text{ à } 28 \text{ MPa}$$

9. Hydrogéologie

L'ouvrage s'inscrit dans une configuration de versant fortement remblayé en pente vers la Loire.

Aucune arrivée d'eau n'a été relevée au droit des excavations manuelles réalisées en terrasse et arrêtées à 1.0 / 1.2 m de profondeur.

Un niveau d'eau a été relevé dans le sondage PDL4 réalisé dans la cave - niveau 2, côté rue (à l'Ouest), à 0.85 m de profondeur.

S'agissant d'observations ponctuelles non stabilisées, des arrivées d'eau peuvent encore se produire sur plusieurs heures à plusieurs jours, en fonction de la perméabilité des matériaux et des conditions climatiques.

Des rétentions d'eau sont possibles dans les remblais.

Dans ce secteur, la nappe au sens strict est située, vers 15 m de profondeur sous TA extérieur, soit au-delà de 5 m de profondeur sous le fond de la cave - niveau 2.

Le contexte hydrogéologique est susceptible de varier en fonction des saisons et de la pluviométrie, avec notamment de possibles rétentions d'eau, alimentées par les précipitations ou d'éventuels réseaux fuyants en contexte urbain.

En période de crue, une remontée de la nappe de plusieurs mètres est certaine.

De plus, des défauts d'étanchéité des réseaux ou des dysfonctionnements de collecte des eaux de surface peuvent conduire à des suintements d'eau dans les caves. Des processus de cristallisation sont notés en voûte de cave – niveau 2.

10. Examen des caves

10.1. Cave - niveau 1

L'accès se fait par un escalier de 24 marches.

Il s'agit d'une cave maçonnée et voûtée avec ogives.

Les voûtes sont enduites.

Les murs sont constitués de moellons de pierre (10 à 20 cm) jointoyés.

Les joints sont moins marqués sur le mur Est et sur le mur Sud côté Est.

Quelques moellons sont même manquants sur le mur Sud côté Est.

La cave ne présente pas de désordres apparents, hormis une fissure sub-verticale sur le mur Est.



Voûte enduite



Détail voûte



Conduit vers soupirail – Mur Nord



Mur en moellons de pierre jointoyés

Ancien accès au niveau supérieur obturé – Angle Sud-Est



Joints moins marqués et quelques moellons manquants – Mur Sud côté Est



Fissure sub-véridicale – Mur Est

10.2. Cave - niveau 2

L'accès se fait par un escalier de 19 marches depuis la cave – niveau 1.

Il s'agit d'une cave maçonnée et voûtée.

Les murs et la voûte sont enduits.

Hormis l'affaissement au sol, la cave ne présente pas de désordres apparents.

Des traces d'humidité sont visibles sur le pilier Sud-Ouest et au sol côté Ouest, et sur la voûte.



Détail voûte



Conduit vers niveau supérieur



Pilier Sud-Ouest avec trace d'humidité

DIAGNOSTIC GEOTECHNIQUE

11. Etat des lieux des ouvrages

Les investigations au niveau de la terrasse ont mis en évidence, en tête :

- Des pavés en bois de 15 à 16 cm d'épaisseur,
- Un lit de sable de 6 à 7 cm,
- Une étanchéité bitumineuse de 0.5 cm,
- Une dalle en béton maigre de 10 à 14 cm,

En profondeur, la structure diverge avec :

- Dans l'axe de la terrasse (et axe de la cave), en E1: des blocs de pierre et/ou une maçonnerie de pierre de 68 cm minimum (soit à partir de 0.38 m de profondeur et jusqu'à 1.02 m de profondeur minimum),
- En bordure de terrasse, en E2 : des blocs de pierre à matrice mameuse et cimentation de 10 à 13 cm, des sables à blocs et débris de brique de 68 cm, et une maçonnerie de pierre à partir de 1.10 m de profondeur.

En considérant que les blocs de pierre et/ou maçonnerie de pierre correspondent aux maçonneries des voûtes de la cave – niveau 1, la partie supérieure de la cave (extrados) serait donc située à 0.38 m de profondeur sous TA (environ +108.2 NGF) dans l'axe de la cave, et à 1.10 m de profondeur sous TA (environ +105.5 NGF) en bordure de cave.

D'après les plans topographiques fournis, l'intrados de la voûte est situé approximativement à la cote +105.4 NGF, ce qui conduit à considérer une épaisseur de voûte de l'ordre de 0.7 à 0.8 m dans l'axe de la cave.

L'examen des caves met en évidence un bon état général, avec peu ou pas de désordres apparents.

Dans la cave - niveau 1, des joints entre moellons dégradés et quelques moellons manquants sont notés sur les murs Est et Sud (coté Est). Une fissure sub-v verticale a également été relevée sur le mur Est.

Dans la cave – niveau 2, des traces d'humidité ont été relevées sur le pilier Sud-Ouest et au sol côté Ouest. Elles peuvent résulter d'infiltration d'eau au niveau du conduit sur le mur Ouest à la faveur de fortes pluies ou de fuite de réseaux.

Les investigations réalisées au niveau de l'affaissement localisé du sol de la cave – niveau 2, mettent en évidence des remblais à dominante mame-calcaire très peu compacts jusqu'à 1.7 m sous fond de cave, puis des mame-calcaires en blocs à compacité faible à modérée jusqu'à l'anél du sondage PDBL3 à 3.5 m de profondeur.

Dans ce secteur d'Orléans des effondrements sont assez fréquents en relation avec des caves profondes, voire des carrières souterraines. Des affaissements de sols liés à des consolidations extrêmes de remblais historiques ont également été observés.

Dans le cas présent, une origine superficielle, avec remaniement des sols, soit dans le cadre d'aménagement passés, soit à l'occasion de fouilles anciennes, apparaît la plus réaliste.

Une origine semi-profonde par affaissements de voûtes de caves profondes ou de ciel de carrières, ou bien une origine plus profonde avec soutirage de remblais ou de sols peu cohérents par des vides karstiques, apparaît moins probable, en regard de l'affaissement et du résultat du sondage au pénétromètre.

12. Aménagement de la terrasse

12.1. Travaux préalables

Préalablement aux aménagements de la terrasse, il conviendra de réaliser les travaux suivants :

- Vérification du conduit situé au niveau du mur Ouest des caves, avec neutralisation des arrivées d'eau pouvant se produire à son niveau,
- Recherche et contrôle de l'étanchéité des éventuels réseaux d'eau situés dans le secteur,
- Rebouchage de l'affaissement de sol en cave – niveau 2,
- Récupération efficace des eaux de ruissellement,
- Reprise de l'étanchéité de la terrasse, notamment au droit des deux sondages effectués,
- Surveillance périodique des deux caves.

12.2. Recommandations sur l'aménagement de la terrasse

D'après les informations communiquées, l'aménagement de la terrasse pourrait comprendre, entre autres, la mise en place de jardinières (un à plusieurs m³ de terre par jardinière), la mise en place d'une citerne pour récupération des eaux de pluie et l'ouverture au public de la terrasse lors de manifestations culturelles.

Bien que les caves apparaissent saines, il conviendra de limiter les surcharges apportées au sol de la terrasse.

Dans tous les cas, il est recommandé de soumettre le projet d'aménagement à un BET structure spécialisé en monuments historiques et en maçonneries, afin d'adapter les aménagements de la terrasse (positionnement des équipements, ...) et de définir les éventuels travaux de confortation des caves en fonction des choix du Maître d'Ouvrage. Il sera pris en compte une voûte en maçonnerie de 0.7 m à 0.8 m d'épaisseur.

13. Conclusion – Suite à donner

Au sens de la norme NF P 04-500 qui définit le contenu et l'enchaînement des missions géotechniques, il a été réalisé une mission de type G5 – diagnostic géotechnique.

Cette mission s'appuie sur des données recueillies in-situ soit directement à partir d'observations et d'enquêtes, soit indirectement par forages.

Selon la norme NF P 94-500, et selon l'évolution du projet, d'autres missions complémentaires pourront éventuellement s'avérer nécessaires (cf. annexe 1).

Dans ce sens, APPUISOL peut assister les différents intervenants pour toutes prestations géotechniques complémentaires.

Le contrôle externe : Patrice IMBAULT	Le chargé d'affaire : Emmanuel CURTY
--	---

ORLÉANS (45)

Rue de la Paterne

Diagnostic de caves

Client : VILLE D'ORLÉANS

Annexe 1 :

Extrait de la norme NF P 94-500

Conditions Générales d'Intervention des prestations d'Ingénierie Géotechniques

SYNTEC-INGENIERIE (avril 2013)

Extrait de la norme NF P 94-500 – novembre 2013 – tableau 2 : classification des missions types d'ingénierie géotechnique

L'achèvement des missions d'ingénierie géotechnique (étapes 1 à 3) doit suivre les étapes de conception et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géotechniques. Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit faire réaliser successivement chacune de ces missions par une ingénierie géotechnique. Chaque mission s'appuie sur des données géotechniques adaptées issues d'investigations géotechniques appropriées.

ÉTAPE 1 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉALABLE (S1)

Cette mission a pour objet de définir les quantités, natures et conditions d'exploitation des ouvrages géotechniques qui entrent dans le cadre de la mission d'étude géotechnique de conception (étape 2). Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire.

Elle comprend deux phases :

Phase Étude de Site (S2)

Elle est réalisée en amont d'une étude préliminaire, d'exploration ou d'APP pour une première identification des risques géotechniques d'un site.

- Faire une enquête documentaire sur le contexte géotechnique du site et l'existence d'ouvrages avec visite du site et des alentours.
- Déterminer et définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport structuré pour le site étudié en matière géologique préliminaire, les principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs.

Phase Définition Géométrique des Ouvrages (S3)

Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'exploration ou d'APP pour établir les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle s'appuie géométriquement sur des données géotechniques adaptées.

- Déterminer et définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport de synthèse des données géotechniques à ce stade d'étude (descriptive approche de la ZRS, horizons porteurs potentiels, ainsi que certains principes généraux de construction constructives (naturelles, mécaniques, ouvrages créés, soutènements de sols).

ÉTAPE 2 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE DE CONCEPTION (S2)

Cette mission permet l'établissement du projet des ouvrages géotechniques et traduit les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec le maître d'ouvrage ou l'ingénieur à cette donnée. Elle comprend deux phases :

Phase Avant-projet (S3)

Elle est réalisée au stade de l'avant-projet de la maîtrise d'ouvrage et s'appuie géométriquement sur des données géotechniques adaptées.

- Déterminer et définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport structuré des investigations géotechniques à ce stade de l'avant-projet, les principes de construction constructives (géométriques, soutènements, poses et lots, fondations, analyses des déformations et vitesses, aménagements de sols, dispositions générales vis-à-vis des risques et des environnements), une étude géométrique par type d'ouvrage géotechnique et la performance d'application de la méthode géométrique pour une maîtrise des risques géotechniques.

Phase Étude (S4)

Elle est réalisée au stade du projet de la maîtrise d'ouvrage et s'appuie géométriquement sur des données géotechniques adaptées géométriquement représentatives pour le site.

- Déterminer et définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier), des notes techniques structurées les choix constructifs des ouvrages géotechniques (soutènements, soutènements, poses et lots, fondations, analyses des déformations et vitesses, aménagements de sols, dispositions vis-à-vis des risques et des environnements), des notes de calcul de dimensionnement, un avis sur les valeurs caractéristiques et une approche des quantités.

Phase DGE / AGT

Elle est réalisée pour finaliser le Dossier de Consultation des Entreprises et assister le maître d'ouvrage pour l'établissement des Conditions de Travail avec le ou les entrepreneurs retenus pour les ouvrages géotechniques.

- Choisir ou participer à la sélection des documents techniques nécessaires et suffisants à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (partir de la phase Projet avec plans, notes techniques, calcul des charges particulières, carte de limitations des pics et d'effort, planning préliminaire).
- Assister techniquement le maître d'ouvrage pour la sélection des entreprises, assister les sites techniques, participer à la finalisation des pièces techniques des conditions de travail.

ÉTAPE 3 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DE VALUATION (S3 et S4, études et aménagements) ÉTUDE ET SUITE GÉOTECHNIQUES D'EXECUTION (S3)

Cette mission permet de réaliser les risques géotechniques résiduels par le site en œuvre à l'aide de mesures correctives d'adaptation ou d'ajustements. Elle est confiée à l'entrepreneur ou l'opérateur constructeur confiné, sur la base de la phase G2 DEBENT. Elle comprend deux phases itératives :

Phase Étude

- Déterminer et définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Choisir dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment établir géométriquement une note d'ajustement géotechnique sur la base des données fournies par le maître de l'ouvrage ainsi que des résultats des investigations géotechniques complémentaires, définir et dimensionner (calculs justificatifs) des ouvrages géotechniques, méthodes et conditions d'exploitation (travaux généraux, suivi, aménagements et critères à prévoir, valeurs caractéristiques, dispositions constructives complémentaires constructives).
- Choisir le maître géotechnique d'exploitation des ouvrages géotechniques producteurs et destinés : plans d'exploitation, de stockage et de suivi.

Phase Suivi

- Suivre en continu les caractéristiques et l'évolution des ouvrages géotechniques, appliquer si nécessaire des dispositions correctives prédictives en phase Étude.
- Vérifier les données géotechniques par relevés lors des travaux et par un programme d'investigations géotechniques complémentaires si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats).
- Choisir la gestion géotechnique du site des ouvrages existants (DGE) et fournir les documents nécessaires à l'établissement du dossier d'interactions ultérieures sur l'ouvrage (DUK).

SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXECUTION (S4)

Cette mission permet de vérifier la conformité des investigations géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exploitation. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec le maître d'ouvrage ou l'ingénieur à cette donnée. Elle comprend deux phases itératives :

Phase Supervision de l'étude d'exploitation

- Donner un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exploitation, des dimensionnements et méthodes d'exploitation, des aménagements ou optimisations des ouvrages géotechniques proposés par l'entrepreneur, au plan de conformité, du programme d'ajustement et des valeurs caractéristiques.

Phase Supervision du suivi d'exploitation

- Par interventions ponctuelles sur le chantier, donner un avis sur la pertinence du contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur (S3), les comparativement tel qu'observé par l'entrepreneur de l'ouvrage et des environnements concernés (S3), de l'ajustement ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur (S3).
- donner un avis sur la production géotechnique du DGE et sur les documents fournis par le DUK.

DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE (DG)

Permet le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon sélective ou globale, à l'étude de un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle. Ce diagnostic géotechnique précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.

- Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple : stabilité, causes géotechniques d'un accident) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'état de l'état global de l'ouvrage existant.
- Si ce diagnostic conduit à modifier une partie de projet ou à réaliser des travaux sur l'ouvrage existant, des études géotechniques de conception et/ou d'ouvrages ainsi qu'un suivi et une supervision géotechniques seront réalisés ultérieurement, conformément à l'exécution des missions d'ingénierie géotechnique (étape 2 et/ou 3).

Extrait de la norme NF P 94-588 – novembre 2013 – tableau 1 : classification des missions types d'ingénierie géotechnique

L'encadrement des missions contribue à la réalisation des étapes géotechniques en vue de maîtriser la qualité, le délai d'exécution et le coût réel des ouvrages géotechniques.

Tout ouvrage est en interaction avec son environnement géotechnique. Le maître d'ouvrage doit associer l'ingénierie géotechnique au même titre que les autres ingénieries à la réalisation d'ouvrage et ce, à toutes les étapes successives de conception puis de réalisation de l'ouvrage.

Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit veiller à la synchronisation des missions d'ingénierie géotechnique avec les phases effectives de la réalisation d'ouvrage du projet.

L'encadrement et la définition synthétique des missions d'ingénierie géotechnique sont donnés dans les tableaux 1 et 2. Deux ingénieries géotechniques différentes doivent intervenir : la première pour le compte du maître de l'ouvrage ou de son mandataire lors des étapes 1 à 3 ; la seconde pour le compte de l'entrepreneur lors de l'étape 3.

Toute mission d'ingénierie géotechnique doit s'appuyer sur des données géotechniques pertinentes issues de la réalisation de prestations d'investigations géotechniques spécifiées à l'Article 6.

Encadrement des missions E1 à E4	Phase de la mission d'ouvrage	Missions d'ingénierie géotechnique (EG) et Phase de la mission		Objetifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Missions de management des étapes géotechniques effectuées	Fonctions d'investigations géotechniques à réaliser
Étape 1 : États géotechniques préliminaires (E1)		État géotechnique préliminaire (E1) Phase : État de Site (ES)		Spécificités géotechniques du site	Preuve : Identification des risques géotechniques par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	État préliminaire, enquête, APQ	État géotechnique préliminaire (E1) Phase : Principes Généraux de Construction (PGC)		Première adaptation des tâches ouvrages aux spécificités du site	Preuve : Identification des étapes pour les tâches ouvrages	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
Étape 2 : États géotechniques de conception (E2)	APQ/AMP	État géotechnique de conception (E2) Phase : Avant-projet (AMP)		Définition et comparaison des solutions envisagées pour le projet	Mesures préventives pour la maîtrise des étapes identifiées, mesures correctives pour les risques identifiés avec attention au plus tôt de leur survenance	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRE	État géotechnique de conception (E2) Phase : Projet (PRE)		Conception et justification du projet		Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE/ACT	État géotechnique de conception (E2) Phase : DCE / ACT		Constatation sur le projet de base : Clair et lisible et pris en compte au contrat de travaux		
Étape 3 : États géotechniques de réalisation (E3/E4)		À la charge de l'exploitant	À la charge du maître d'ouvrage			Fonction des missions de construction mises en œuvre
	EXE/VE/A	État et suivi géotechniques d'ouvrage (E3) Phase : État (en interaction avec le phase : État)	Supervision géotechnique d'ouvrage (E4) Phase : Supervision de l'état géotechnique d'ouvrage (en interaction avec le phase : Supervision du site)	État d'ouvrage conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des étapes identifiées, mesures correctives, contrôle du management des risques identifiés (état des actions, vigilance, maintenance, capitalisation des actions d'exploitance)	Fonction des missions de construction et des adaptations proposées et des risques identifiés survenant
	DET/ACR	État et suivi géotechniques d'ouvrage (E3) Phase : État (en interaction avec le phase : État)	Supervision géotechnique d'ouvrage (E4) Phase : Supervision du suivi géotechnique d'ouvrage (en interaction avec le phase : Supervision de l'état)	Évaluation des risques en lien continu avec les aléas du maître d'ouvrage		Fonction de contrôle Géotechnique : assurer et de l'ouvrage et des incidents en cas de travaux
À l'issue d'une mission ou sur un ouvrage existant	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (DG)		Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant	Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés	Fonction de l'état Géotechnique : État

Conditions Générales d'Intervention des prestations d'Ingénierie Géotechniques

SYNTEC-INGENIERIE (avril 2013)

1. Avertissement, préambule

Toute commande et ses avenants éventuels impliquent de la part du co-contractant, et après dénommé « le Client », signataire du contrat et des avenants, acceptation sans réserve des présentes conditions générales. Les présentes conditions générales prévalent sur toutes autres, sauf conditions particulières contenues dans le devis ou dérogation formelle et expresse. Toute modification de la commande ne peut être considérée comme acceptée qu'après accord écrit du Prestataire.

2. Obligations obligatoires à la charge du Client, (DT, DCT, ouvrages existants)

Dans tous les cas, la responsabilité du Prestataire ne saurait être engagée en cas de dommages à des ouvrages publics ou privés (en particulier, ouvrages enterrés et canalisations) dont la présence et l'emplacement précis ne lui auraient pas été signalés par écrit préalablement à sa mission.

Conformément au décret n° 2011-1241 du 5 octobre 2011 relatif à l'exécution de travaux à proximité de certains ouvrages souterrains, aériens ou subséquels de transport ou de distribution, le Client doit fournir, à sa charge et sous sa responsabilité, l'implantation des réseaux privés, la liste et l'adresse des exploitants des réseaux publics à proximité des travaux, les plans, informations et résultats des investigations complémentaires consécutifs à sa Déclaration de projet de Travaux (DT). Ces informations sont indispensables pour permettre les éventuelles DCT (le délai de réponse est de 15 jours) et pour connaître l'environnement du projet. En cas d'incertitude ou de complexité pour la localisation des réseaux sur domaine public, il pourra être nécessaire de faire réaliser, à la charge du Client, des feuilles manuelles pour les repérer. Les conséquences et la responsabilité de toute déformation de ces réseaux par suite d'une mauvaise communication sont à la charge exclusive du Client.

Conformément à l'art L 411-1 du code minier, le Client s'engage à déclarer à la DREAL tout forage réalisé de plus de 10 m de profondeur. De même, conformément à l'article R 214-1 du code de l'environnement, le Client s'engage à déclarer auprès de la DDT du lieu des travaux les sondages et forages destinés à la recherche, à la surveillance ou au prévenement d'eaux souterraines (patrimoine notamment).

3. Cadre de la mission, objet et nature des prestations, problèmes soulevés, limites de la mission

Le terme « prestation » désigne exclusivement les prestations énumérées dans le devis du Prestataire. Toute prestation différente de celles prévues fera l'objet d'un prix nouveau à négocier. Il est entendu que le Prestataire s'engage à procéder selon les moyens actuels de son art, à des recherches consciencieuses et à fournir les indications qu'on peut en attendre. Son obligation est une obligation de moyen et non de résultat au sens de la jurisprudence actuelle des tribunaux. Le Prestataire réalise la mission dans les strictes limites de sa définition donnée dans son offre (validité limitée à trois mois à compter de la date de son établissement), confirmée par le bon de commande ou un contrat signé du Client. La mission et les investigations éventuelles sont strictement géotechniques et n'abordent pas le contexte environnemental. Seule une étude environnementale spécifique comprenant des investigations adaptées permettra de détecter une éventuelle contamination des sols et/ou des eaux souterraines. Le Prestataire n'est solidaire d'aucun autre intervenant sauf si la solidarité est explicitement convenue dans le devis ; dans ce cas, la solidarité ne s'étend que sur la durée de la mission. Par référence à la norme NF P 94-500, il appartient au maître d'ouvrage, au maître d'œuvre ou à toute entreprise de faire réaliser impérativement par des ingénieurs compétents chacune des missions géotechniques (successivement G1, G2, G3 et G4 et les investigations associées) pour suivre toutes les étapes d'élaboration et d'exécution du projet. Si la mission d'investigation est commandée seule, elle est limitée à l'exécution matérielle de sondages et à l'établissement d'un compte rendu technique sans interprétation et elle exclut toute activité d'étude ou de conseil. La mission de diagnostic géotechnique G5 engage le géotechnicien uniquement dans le cadre strict des objectifs posés dans le devis et acceptés. Si le Prestataire déclare être titulaire de la certification ISO 9001, le Client agit de telle sorte que le Prestataire puisse respecter les dispositions de son système qualité dans la réalisation de sa mission.

4. Plans et documents contractuels

Le Prestataire réalise la mission conformément à la réglementation en vigueur lors de son offre, sur la base des données communiquées par le Client. Le Client est seul responsable de l'exactitude de ces données. En cas d'absence de transmission ou d'erreur sur ces données, le Prestataire est exonéré de toute responsabilité.

5. Limites d'engagement sur les délais

Sauf indication contraire précise, les estimations de délais d'intervention et d'exécution données aux termes du devis ne sauraient engager le Prestataire. Sauf stipulation contraire, il ne sera pas appliqué de pénalités de retard et si tel devait être le cas elles seraient plafonnées à 5% de la commande. En toute hypothèse, la responsabilité du Prestataire est déchargée de plein droit en cas d'insuffisance des informations fournies par le Client ou si le Client n'a pas respecté ses obligations, en cas de force majeure ou d'événements imprévisibles (notamment la réaction de sols instables, la survenance de circonstances naturelles exceptionnelles) et de manière générale en cas d'événement extérieur au Prestataire modifiant les conditions d'exécution des prestations objet de la commande ou les rendant impossibles. Le Prestataire n'est pas responsable des délais de fabrication ou d'approvisionnement de fournitures incorporées lors d'un contrat de négoce passé par le Client ou le Prestataire avec un autre Prestataire.

6. Familiales, autorisations et obligations d'information, accès, dégâts aux ouvrages et cultures

Toutes les démarches et formalités administratives ou autres, en particulier l'obtention de l'autorisation de pénétrer sur les lieux pour effectuer des prestations de la mission sont à la charge du Client. Le Client se charge d'une part d'obtenir et communiquer les autorisations requises pour l'accès du personnel et des matériels nécessaires au Prestataire en toute sécurité dans l'enceinte des propriétés privées ou sur le domaine public, d'autre part de fournir tous les documents relatifs aux dangers et aux risques cachés, notamment ceux liés aux réseaux, aux obstacles enterrés et à la pollution des sols et des nappes. Le Client s'engage à communiquer les règles pratiques que les intervenants doivent respecter en matière de santé, sécurité et respect de l'environnement : il assure en fait que de besoin la formation du personnel, notamment celui du Prestataire, entrant dans ces domaines, préalablement à l'exécution de la mission. Le Client sera le seul responsable de tout dommage corporel, matériel ou immatériel dû à une spécificité de site connue de lui et non clairement indiquée au Prestataire avant toutes interventions. Sauf spécifications particulières, les travaux permettant l'accès aux points de sondages ou d'essais et l'aménagement des plates-formes ou grutage nécessaires aux matériels utilisés sont à la charge du Client. Les investigations peuvent entraîner d'irréversibles dommages sur le site, en particulier sur la végétation, les cultures et les ouvrages existants, sans qu'il y ait négligence ou faute de la part de son exécutant. Les remises en état, réparations ou indemnifications correspondantes sont à la charge du Client.

7. Implantation, et traitement des sondages

Au cas où l'implantation des sondages est imposée par le Client ou son conseil, le Prestataire est exonéré de toute responsabilité dans les événements consécutifs à ladite implantation. La mission ne comprend pas les implantations topographiques permettant de définir l'emprise des ouvrages et zones à étudier ni la mesure des coordonnées précises des points de sondages ou d'essais. Les éventuelles altitudes indiquées pour chaque sondage (qu'il s'agisse de celles de réseaux rattachées à un repère arbitraire ou de celles NGF) ne sont données qu'à titre indicatif. Seules font foi les profondeurs mesurées depuis le sommet des sondages et complètes à partir du niveau du sol au moment de la réalisation des essais. Pour que ces altitudes soient garanties, il convient qu'elles soient relevées par un Géomètre Expert avant remblaiage du terrain. Il en va de même pour l'implantation des sondages sur le terrain.

8. Hydrogéologie

Les niveaux d'eau indiqués dans le rapport correspondent uniquement aux niveaux relevés au droit des sondages exécutés et à un moment précis. En dépit de la qualité de l'étude les aléas suivants subsistent, notamment la variation des niveaux d'eau en relation avec la météo ou une modification de l'environnement des études. Seule une étude hydrogéologique spécifique permet de déterminer les amplitudes de variation de ces niveaux, les côtes de crue et les PHEC (Plus Hautes Eaux Connues).

9. Recommandations, aléas, écart entre prévision de l'étude et réalité en cours de travaux

Si, en l'absence de plans précis des ouvrages projetés, le Prestataire a été amené à faire une ou des hypothèses sur le projet, il appartient au Client de lui communiquer par écrit ses observations éventuelles sans quoi, il ne pourrait en aucun cas et pour quelque raison que ce soit lui être reproché d'avoir établi son étude dans ces conditions. L'étude géotechnique s'appuie sur les renseignements reçus concernant le projet, sur un nombre limité de sondages et d'essais, et sur des profondeurs d'investigation limitées qui ne permettent pas de lever toutes les incertitudes inhérentes à cette science naturelle. En dépit de la qualité de l'étude, des incertitudes subsistent du fait notamment du caractère ponctuel des investigations, de la variation d'épaisseur des remblais et/ou des différentes couches, de la présence de vestiges enterrés. Les conclusions géotechniques ne peuvent donc conduire à traiter à forfait le prix des fondations compte tenu d'une hétérogénéité, notable et de fait de l'ouvrage, toujours possible et des aléas d'exécution pouvant survenir lors de la découverte des terrains. Si un caractère évolutif particulier a été mis en lumière (notamment glissement, érosion, dissolution, remblais évolutifs, tourbe), l'application des recommandations du rapport nécessite une actualisation à chaque étape du projet notamment s'il s'écoule un laps de temps important avant l'étape suivante. L'estimation des quantités des ouvrages géotechniques nécessite, une mission d'étude géotechnique de conception E2 (phase projet). Les éléments géotechniques non décrits par l'étude et mis en évidence lors de l'exécution (pouvant avoir une incidence sur les conclusions du rapport) et les incidents importants survenus au cours des travaux (notamment glissement, dommages aux avatourants ou aux estacades) doivent obligatoirement être portés à la connaissance du Prestataire ou signalés aux géotechniciens chargés des missions de suivi géotechnique d'exécution E3 et de supervision géotechnique d'exécution G4, afin que les conséquences sur la conception géotechnique et les conditions d'exécution soient analysées par un homme de l'art.

10. Rapport de mission, réception des travaux, fin de mission, détails de validation des documents par le client

A défaut de clauses spécifiques contractuelles, la remise du dernier document à fournir dans le cadre de la mission fixe le terme de la mission. La date de la fin de mission est celle de l'approbation par le Client du dernier document à fournir dans le cadre de la mission. L'approbation doit intervenir au plus tard deux semaines après sa remise au Client, et est considérée implicite en cas de silence. La fin de la mission donne lieu au paiement de solde de la mission.

11. Réserve de propriété, confidentialité, propriété des études, brevets

Les coupes de sondages, plans et documents établis par les soins du Prestataire dans le cadre de sa mission ne peuvent être utilisés, publiés ou reproduits par des tiers sans son autorisation. Le Client ne devient propriétaire des prestations réalisées par le Prestataire qu'après règlement intégral des sommes dues. Le Client ne peut pas les utiliser pour d'autres ouvrages sans accord écrit préalable du Prestataire. Le Client s'engage à maintenir confidentielle et à ne pas utiliser pour son propre compte ou celui de tiers toute information se rapportant au savoir-faire du Prestataire, qu'il soit breveté ou non, portée à sa connaissance au cours de la mission et qui n'est pas dans le domaine public, sauf accord préalable écrit du Prestataire. Si dans le cadre de sa mission, le Prestataire mettrait au point une nouvelle technique, celle-ci serait sa propriété. Le Prestataire serait libre de déposer tout brevet s'y rapportant, le Client bénéficiant, dans ce cas, d'une licence non exclusive et non cessible, à titre gratuit et pour le seul ouvrage étudié.

12. Modalités de mise à jour de la mission en cours de réalisation

La nature des prestations et des moyens à mettre en œuvre, les prévisions des engagements et délais, ainsi que les prix sont déterminés en fonction des éléments connus par le client et ceux recueillis lors de l'établissement de l'offre. Des conditions imprévisibles par le Prestataire au moment de l'établissement de son offre touchant à la géologie, aux hypothèses de travail, au projet et à son environnement, à la législation et aux règlements, à des événements imprévus, survenant en cours de mission autorisent le Prestataire à proposer au Client un avenant avec notamment modification des prix et des délais. A défaut d'un accord écrit du Client dans un délai de deux semaines à compter de la réception de la lettre d'adaptation de la mission, le Prestataire est en droit de suspendre immédiatement l'exécution de sa mission, les prestations réalisées à cette date étant rémunérées intégralement, et sans que le Client ne puisse faire état d'un préjudice. Dans l'hypothèse où le Prestataire est dans l'impossibilité de réaliser les prestations prévues pour une cause qui ne lui est pas imputable, le temps d'immobilisation de ses équipes est rémunéré par le client.

13. Modalités de fin de projet après fin de mission, détail de validité du rapport

Le rapport constitue une synthèse de la mission définie par la commande. Le rapport et ses annexes forment un ensemble indissociable. Toute interprétation, reproduction partielle ou utilisation par un autre maître de ouvrage, un autre constructeur ou maître d'œuvre, ou pour un projet différent de celui objet de la mission, ne saurait engager la responsabilité du Prestataire et pourra entraîner des poursuites judiciaires. La responsabilité du Prestataire ne saurait être engagée en dehors du cadre de la mission objet du rapport. Toute modification apportée au projet et à son environnement ou tout élément nouveau mis à jour au cours des travaux et non décrit lors de la mission d'origine, nécessite une adaptation du rapport initial dans le cadre d'une nouvelle mission. Le client doit faire actualiser le dernier rapport de mission en cas d'ouverture du chantier plus de 1 an après sa livraison. Il en est de même notamment en cas de travaux de terrassements, de démolition ou de réhabilitation de site (à la suite d'une contamination des terrains et/ou de la nappe) modifiant entre autres les qualités mécaniques, les dispositions constructives et/ou la répartition de tout ou partie des sols sur les emprises concernées par l'étude géotechnique.

14. Conditions d'établissement des prix, variation dans les prix, modalités de paiement, acomptes et provision, relevés de garantie

Les prix unitaires s'entendent hors taxes. Ils sont majorés de la T.V.A. au taux en vigueur le jour de la facturation. Ils sont établis aux conditions économiques en vigueur à la date d'établissement de l'offre. Ils sont fermes et définis pour une durée de trois mois. Au-delà, ils sont actualisés par application de l'indice « Sondages et Forages TP 04 » pour les investigations in situ et en laboratoire, et par application de l'indice « SYNTEC » pour les prestations d'études, l'indice de base étant celui du mois de l'établissement de l'offre. Aucune retenue de garantie n'est appliquée sur le coût de la mission.

Dans le cas où le marché nécessite une intervention d'une durée supérieure à un mois, des factures mensuelles intermédiaires sont établies. Lors de la passation de la commande ou de la signature du contrat, le Prestataire peut éditer un acompte dont le montant est défini dans les conditions particulières et correspond à un pourcentage de total estimé des honoraires et frais correspondants à l'exécution du contrat. Le montant de cet acompte est déduit de la facture ou du décompte final. En cas de sous-traitance dans le cadre d'un ouvrage public, les factures du Prestataire sont régies directement et intégralement par le maître d'ouvrage, conformément à la loi n°75-1334 du 31/12/1975.

Les paiements interviennent à réception de la facture et sans acompte. En l'absence de paiement au plus tard le jour suivant la date de règlement figurant sur la facture, il sera appliqué à compter du dit jour et de plein droit, un intérêt de retard égal au taux d'intérêt appliqué par la Banque Centrale Européenne à son opération de refinancement la plus récente majorée de 10 points de pourcentage. Cette pénalité de retard sera exigible sans qu'un rappel soit nécessaire à compter du jour suivant la date de règlement figurant sur la facture. En cas de ces pénalités de retard, le Client sera redevable de plein droit des frais de recouvrement exposés ou d'une indemnité forfaitaire de 40 €. Un désaccord quelconque ne saurait constituer un motif de non paiement des prestations de la mission réalisées antérieurement. La compensation est formellement exclue : le Client s'interdit de déduire le montant des préjudices qu'il allègue des honoraires dus.

15. Réalisation anticipée

Toute procédure de réalisation est obligatoirement précédée d'une tentative de conciliation. En cas de force majeure, cas fortuit ou de circonstances indépendantes du Prestataire, celui-ci a la faculté de résilier son contrat sous réserve d'en informer son Client par lettre recommandée avec accusé de réception. En toute hypothèse, en cas d'inexécution par l'une ou l'autre des parties de ses obligations, et 8 jours après la mise en demeure visant la présence d'une résiliation demeurée sans effet, le contrat peut être résilié de plein droit. La résiliation du contrat implique le paiement de l'ensemble des prestations régulièrement exécutées par le Prestataire au jour de la résiliation et en cas, d'une indemnité égale à 20 % des honoraires qui resteraient à percevoir si la mission avait été menée jusqu'à son terme.

16. Répartition des risques, responsabilité et assurances

Le Prestataire n'est pas tenu d'avertir son Client sur les risques encourus déjà connus ou ne pouvant être ignorés du Client compte tenu de sa compétence. Ainsi par exemple, l'attention du Client est attirée sur le fait que le bétail arrivé est irrémédiablement touché, les revêtements appliqués sur ce matériel devant avoir une compatibilité suffisante pour s'adapter sans dommage aux variations d'ouverture des fissures. Le devoir de conseil du Prestataire vis-à-vis du Client ne s'étend que dans les domaines de compétence requis pour l'exécution de la mission spécifiquement confiée. Tout élément nouveau connu du Client après la fin de la mission doit être communiqué au Prestataire qui pourra, le cas échéant, proposer la réalisation d'une mission complémentaire. A défaut de communication des éléments nouveaux ou d'acceptation de la mission complémentaire, le Client en assumera toutes les conséquences. En aucun cas, le Prestataire ne sera tenu pour responsable des conséquences d'un non-respect de ses préconisations ou d'une modification de celles-ci par le Client pour quelque raison que ce soit. L'attention du Client est attirée sur le fait que toute estimation de quantités faite à partir de données obtenues par prélèvements ou essais ponctuels sur le site objet des prestations est entachée d'une incertitude fonction de la représentativité de ces données ponctuelles extrapolées à l'ensemble du site. Toutes les pénalités et indemnités qui sont prévues au contrat ou dans l'offre remise par le Prestataire ont la nature de dommages et intérêts forfaitaires, libératoires et exclusifs de toute autre sanction ou indemnification.

Assurance décennale obligatoire

Le Prestataire bénéficie d'un contrat d'assurance au titre de la responsabilité décennale afférente aux ouvrages soumis à obligation d'assurance, conformément à l'article L241-1 du Code des assurances. Conformément aux usages et aux pratiques du marché de l'assurance et de la réassurance, le contrat impose une obligation de déclaration préalable et d'adaptation de la garantie pour les ouvrages dont la valeur HT (travaux et honoraires compris) excède au jour de la déclaration d'ouverture de chantier un montant de 15 M€. Il est expressément convenu que le client a l'obligation d'informer le Prestataire d'un éventuel dépassement de ce seuil, et accepte, de fournir tous éléments d'information nécessaires à l'adaptation de la garantie. Le client prend également l'engagement, de souscrire à ses frais un Contrat Collectif de Responsabilité Décennale (CCRD), contrat dans lequel le Prestataire sera expressément mentionné parmi les bénéficiaires.

Par ailleurs, les ouvrages de caractère exceptionnel, voir insolites sont exclus du présent contrat et doivent faire l'objet d'une cotation particulière. Le prix fixé dans l'offre ayant été déterminé en fonction de conditions normales d'assurabilité de la mission, il sera réajusté, et le client s'engage à l'accepter, en cas d'éventuelle surcotisation qui serait demandée au Prestataire par rapport aux conditions de base de son contrat d'assurance. A défaut de respecter ces engagements, le client en supportera les conséquences financières (notamment en cas de défaut de garantie du Prestataire, qui n'aurait pu s'assurer dans de bonnes conditions, faute d'informations suffisantes). Le maître d'ouvrage est tenu d'informer le Prestataire de la DDC (déclaration d'ouverture de chantier).

Ouvrages non soumis à l'obligation d'assurance

Les ouvrages dont la valeur HT (travaux et honoraires compris) excède un montant de 15 M€ HT doivent faire l'objet d'une déclaration auprès du Prestataire qui en réfère à son assureur pour détermination des conditions d'assurance. Les limitations relatives au montant des chantiers auxquels le Prestataire participe ne sont pas applicables aux missions portant sur des ouvrages d'infrastructure linéaire, c'est-à-dire routes, voies ferrées, tramway, etc. En revanche, elles demeureront applicables lorsque sur le tracé linéaire, toutes missions de l'assuré portées sur des ouvrages précis tels que ponts, viaducs, échangeurs, tunnels, tranchées couvertes... En tout état de cause, il appartiendra au client de prendre en charge toute éventuelle surcotisation qui serait demandée au prestataire par rapport aux conditions de base de son contrat d'assurance. Toutes les conséquences financières d'une déclaration insuffisante quant au coût de l'ouvrage seront supportées par le client et le maître d'ouvrage.

Le Prestataire assume les responsabilités qu'il engage par l'exécution de sa mission telle que décrite au présent contrat. A ce titre, il est responsable de ses prestations dont la déficiabilité lui est imputable. Le Prestataire sera garanti en totalité par le Client contre les conséquences de toute recherche en responsabilité dont il serait l'objet du fait de ses prestations, de la part de tiers au présent contrat, le client ne garantissant cependant le Prestataire qu'en cas de défaut de paiement de responsabilité visé ci-dessus pour le cas des prestations défectueuses. La responsabilité globale et cumulée du Prestataire au titre ou à l'occasion de l'exécution du contrat sera limitée à trois fois le montant de ses honoraires sans pour autant excéder les garanties détenues par son assureur, et ce pour les dommages de quelque nature que ce soit et quel qu'en soit le fondement juridique. Il est expressément convenu que le Prestataire ne sera pas responsable des dommages matériels consécutifs ou non à un dommage matériel tels que, notamment, la perte d'exploitation, la perte de production, le manque à gagner, la perte de profit, la perte de contrat, la perte d'usage, l'immobilisation de personnel ou d'équipements.

17. Cassation du contrat

Le Client reste redevable du paiement de la facture sans pouvoir opposer à quelque titre que ce soit la cassation du contrat, la réalisation pour le compte d'autrui, l'existence d'une promesse de porte-fort ou encore l'existence d'une stipulation pour autrui.

18. Litiges

En cas de litige pouvant survenir dans l'application du contrat, seul le droit français est applicable. Seules les juridictions du ressort du siège social du Prestataire sont compétentes, même en cas de demande incidente ou d'appel en garantie ou de pluralité de défendeurs.

ORLÉANS (45)

Rue de la Pateme

Diagnostic de caves

Client : **VILLE D'ORLÉANS**

Annexe 2 :

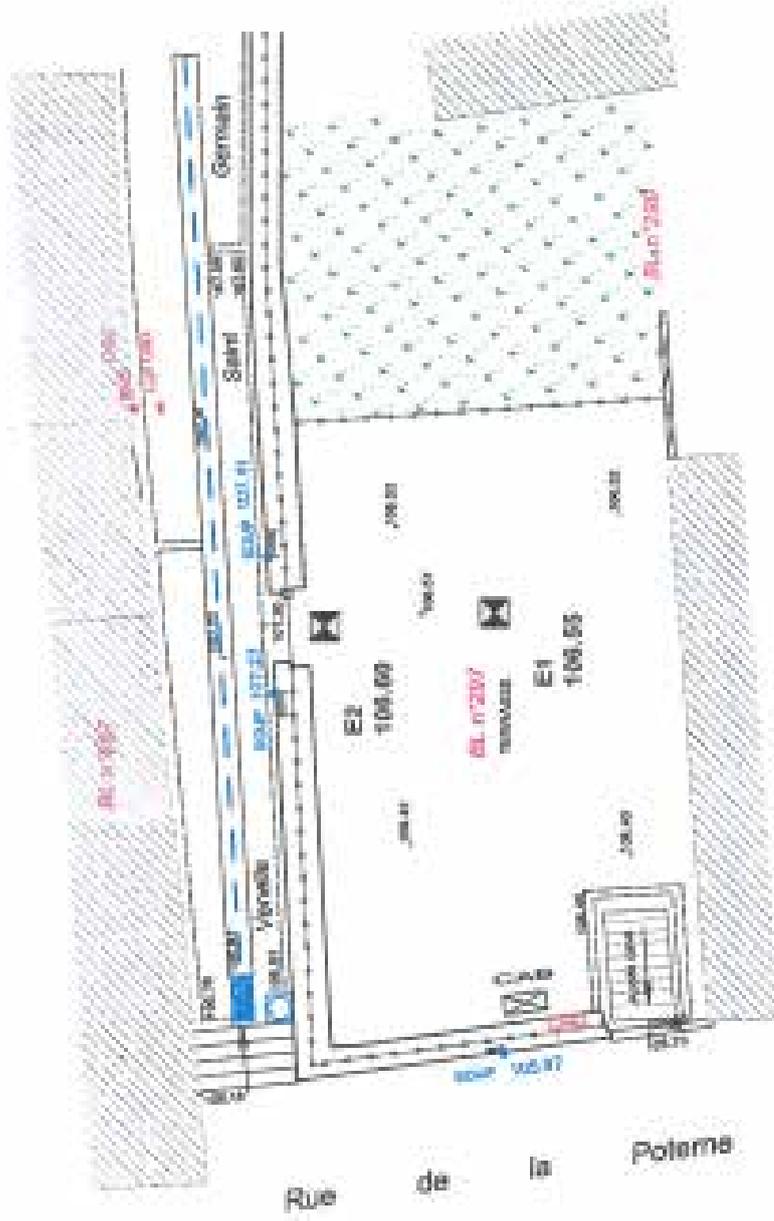
Plans d'implantation des sondages (2)

Plans topographiques (3)

Sondages et essais (5)

PLAN TOPOGRAPHIQUE

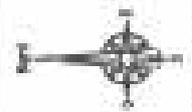
Révision : Système Lambert II
 Altimétrie : Système NGF IGN69



ÉCHELLE	1/100
DATE	2017
PROJET	SICAVOR
CLIENT	AMM

AXIS CONSEILS
 Ingénierie et conseil en patrimoine

ALOU
 Architecture

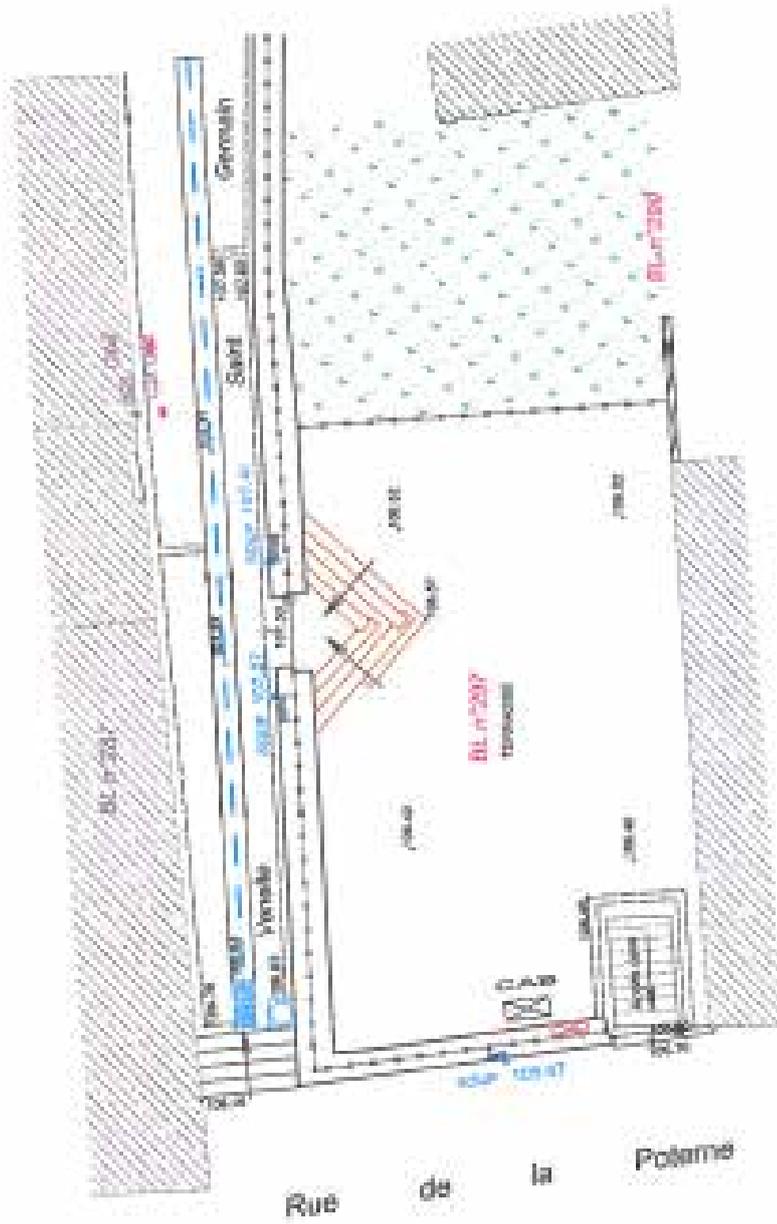
<p>APPUI SOL Ingénierie et conseil en patrimoine</p> <p>Appui Sol : 10 rue de la Poterne, 45000 Orléans Tél : 02 38 53 12 12 Fax : 02 38 53 12 13 Email : appui.sol@orange.fr Site : www.appui-sol.com</p>	 <p>Échelle de base : 1/100 (A3) N°2017</p>	<p>Commentaires</p> <p>E1 106.55</p> <p>Existence du sondage Cote de TA à la cote des sondages (en mètre)</p>	<p>Plan d'imposition des sondages</p> <p>E Excavation de reconnaissance manuelle (E) S Saisie des paramètres Symphonie (S) (PTL) S Sondage à la sonde manuelle (SM)</p>	<p>ORLÉANS (44) Rue de la Poterne</p> <p>Terrasse client : Mairie d'Orléans Adresse : 106-117</p>
--	---	--	--	--

RUE DE LA POTERNE
Rue de la Poterne
Venelle Saint Germain

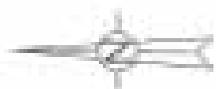
Parcelle cadastrée I n°297

PLAN TOPOGRAPHIQUE

Planimétrie : Système Lambert II
Altimétrie : Système IGN69



PROJET	SAO
TRACÉ	SAO
DATE	2017
ÉCHELLE	1/500




AXIS CONSEILS
 Ingénierie et conseil en urbanisme
 10 rue de la République
 45000 Orléans
 www.axis-conseils.com
 02 38 38 38 38


Géoconseil
 Ingénierie et conseil en géomatique
 10 rue de la République
 45000 Orléans
 www.geoconseil.com
 02 38 38 38 38

DEPARTEMENT DU LOIRET
 VILLE D'ORLEANS
 Rue de la Poterne
 Venelle Saint Germain

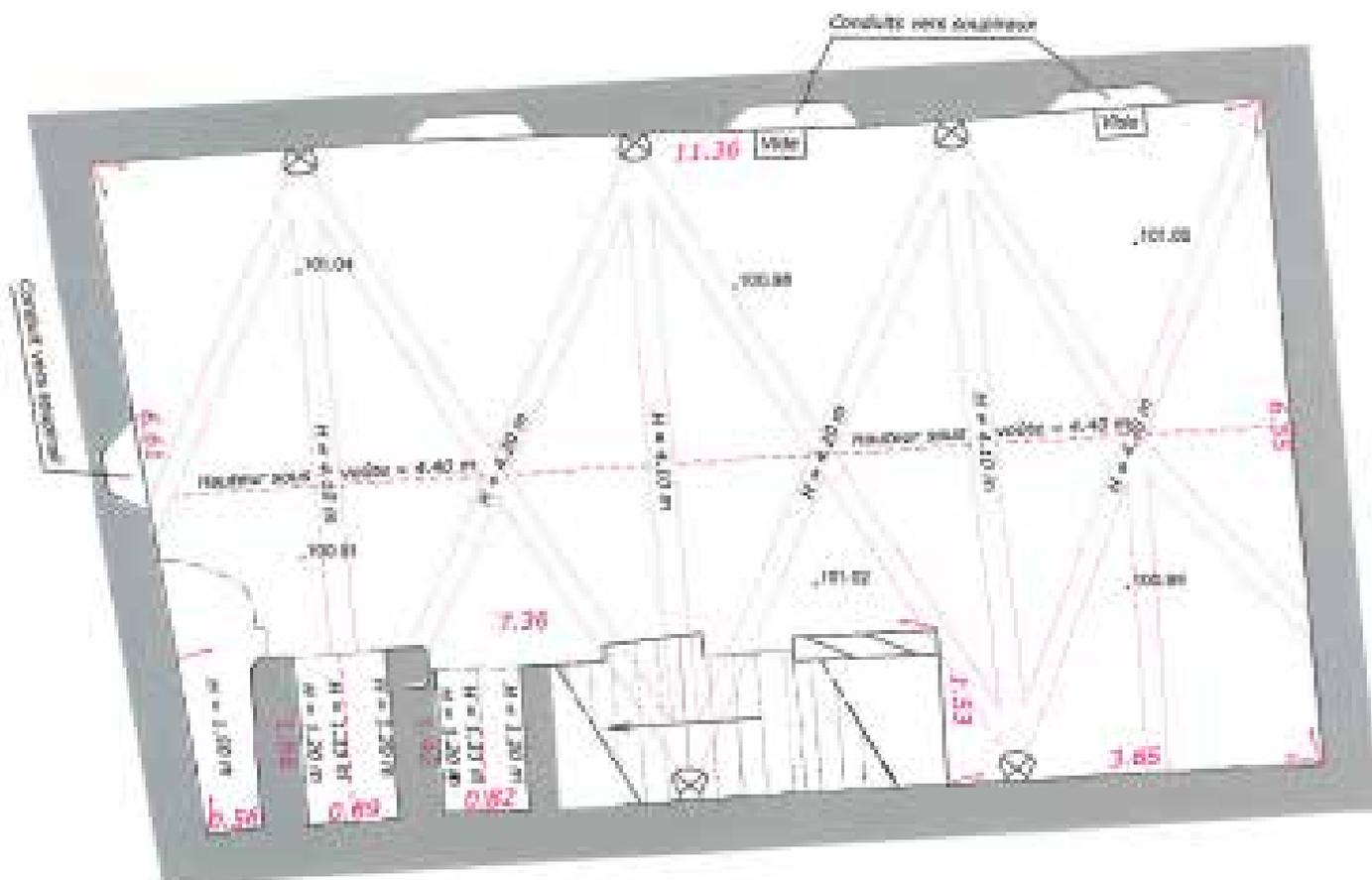


Parcelle cadastrée I n°297

PLAN DE CAVE - Niveau 1

Planimétrie : Système Lambert II

Altimétrie : Système NGF IGN69



11 rue Beaudouin
 45000 ORLÉANS Cedex 1
 Tel : 02 39 31 14 14
 Fax : 02 39 31 14 15
 www.axis-conseils.com

AXIS CONSEILS
 Ingénierie et conseil



ÉCHELLE	1/50
DATE	10/05/17
PROJET	Orléans A
DESIGNÉ	Laurent DUBOIS

 <p>APPUISOL Ingénierie géotechnique</p> <p>Siège social 8 rue Jean Macé CS 190 VALLON EN SULLY Tél : 04 70 06 21 32 contact.03@appuiisol.fr contact.65@appuiisol.fr contact.58@appuiisol.fr</p>	<p>ORLEANS Terrasse Rue de la Poterne</p>		Contrat 1916-01-17
	Date : 03/04/2017	Cote NGF : 106.55	Profondeur : 0,00 - 1,02 m

1/20

Excavation manuelle sur fondation : E1

EXGTE 3.20/GTE

Cote (m)	Profondeur (m)	Lithologie	Niveau d'eau (m)
106,39 m	0	Pavés en bois	
106,33 m		Sables avec étanchéité bitumineuse à la base	
106,19 m		Béton maigre avec polyane à la base	
106		Blocs de pierre et/ou maçonnerie de pierre	
105,53 m	1		

Excavation manuelle de 0 à 0.4 m
Perforateur de 0.4 à 1.02 m

 APPUISOL Ingénierie Géotechnique	APPUISOL Ingénierie géotechnique Siège social 6 rue Jean Macé 03100 VALLON EN SULLY Tél : 04 70 96 21 32 contact.03@appuiisol.fr contact.45@appuiisol.fr contact.55@appuiisol.fr	ORLEANS Terrasse Rue de la Poterne	Contrat 1916-01-17
	Date : 03/04/2017	Cote NGF : 106.60	Profondeur : 0,00 - 1,20 m

1/20

Excavation manuelle sur fondation : E2

EXGTE 3.20/GTE

Cote (m)	Profondeur (m)	Lithologie	Niveau d'eau (m)	
106,44 m	0	0,16 m		
106,38 m		Sables avec étanchéité bitumineuse à la base		
106,28 m		0,22 m		
106,18 m		Béton maigre avec polyane à la base		
		0,32 m		
106		Blocs de pierre à matrice marnreuse et cimentation		
		0,42 m		
105,83 m		Sables grisâtres avec blocs de pierre		
		0,77 m		
		1	Sables noirâtres	
105,50 m		1,10 m		
105,40 m		Maçonnerie de pierre		
		1,20 m		

Excavation manuelle de 0 à 1.2 m

 APPUISOL Ingénierie Géotechnique	APPUISOL Ingénierie géotechnique Siège social 6 rue Jean Macé 03190 VALLON EN SULLY Tél : 04 70 06 21 32 contact.03@appuiisol.fr contact.45@appuiisol.fr contact.58@appuiisol.fr	ORLEANS Terrasse Rue de la Poterne		Contrat 1916-01-17
	Date : 03/04/2017	Cote NGF : 97.1	Profondeur : 0,00 - 1,80 m	

1/25

Excavation manuelle sur fondation : Tm3

EXGTE 3.20VGTE

Cote (m)	Profondeur (m)	Lithologie	Niveau d'eau (m)
97	0	Affaissement	
96,80 m		0,30 m	
96,40 m		Remblais marno-calcaires à débris carbonneux	
		0,70 m	
96	1	Remblais marno-calcaires	
95,70 m		1,40 m	
95,40 m		Remblais marno-calcaires et argiles sableuses noirâtres	
95,30 m		1,70 m	
		Marno-calcaires en blocs	
		1,80 m	



APPUISOL
Ingénierie Géotechnique

Siège social
5, rue Jean Métais - 45190 VALLON EN BULLY
04 70 06 21 92 - contact.45@appuiisol.fr
contact.45@appuiisol.fr - contact.45@appuiisol.fr

Dossier n° : 1916-01-17

Commune : ORLEANS-45

Adresse : Rue de la Poterne

Opération : Terrasse

sondage au pénétromètre dynamique Léger
DATC

Pénétromètre type B : PDL3

Cote : 97,10 NGF

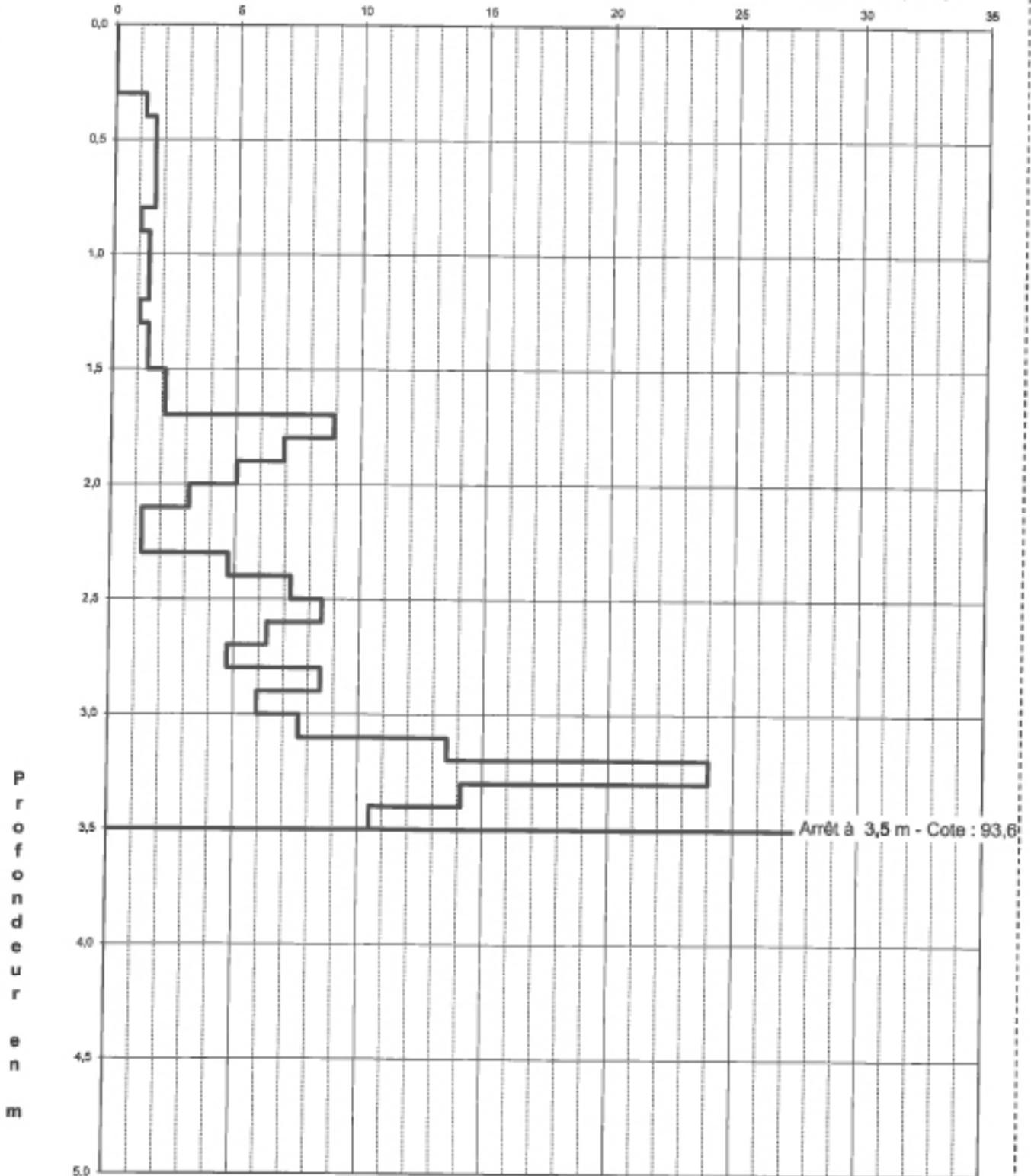
Date : 03/04/17

niveau d'eau supposé :

Caractéristiques du pénétromètre : Mmouton=9,9kg / H=0,54m / Mmclume=4,3 kg / Mtige=2,9kg / Mpointe=0,22kg / section=9,6cm²

Echelle : 1/25 ème

Résistance dynamique de pointe Rd (MPa)





APPUISOL
Ingénierie Géotechnique

Siège social
6, rue Jean Macé - 03100 VALLON EN BALLY
04 70 00 21 32 - contact@appuiisol.fr
appuiisol@orange.fr - portail.sicavor.net

Dossier n° : 1916-01-17

Commune : ORLEANS-45

Adresse : Rue de la Poterne

Opération : Terrasse

sondage au pénétromètre dynamique Léger
DATC

Pénétromètre type B : PDL4

Cote : 97,10 NGF

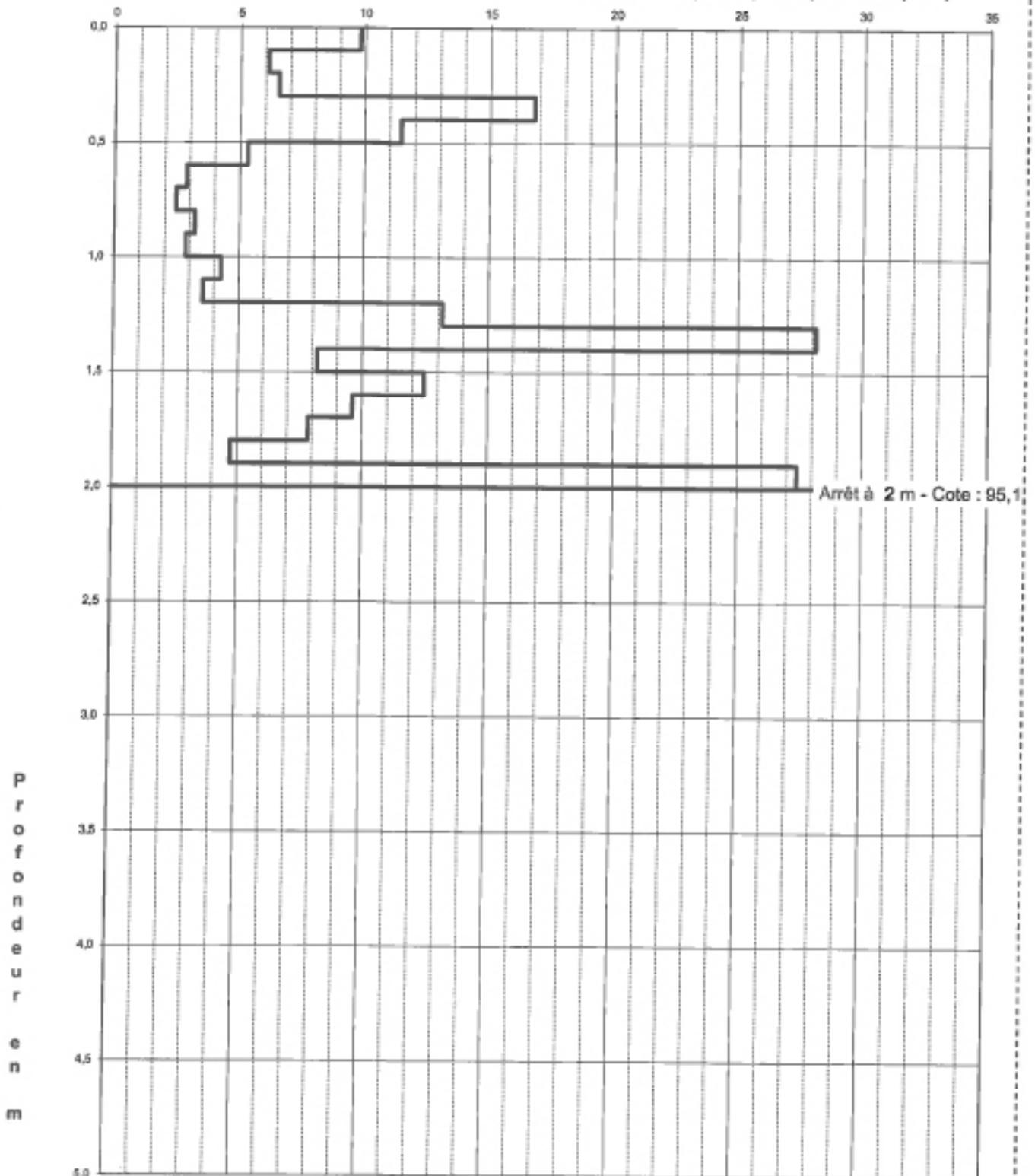
Date : 03/04/17

niveau d'eau supposé : 0,85 m

Caractéristiques du pénétromètre : Mmouton=9,9kg / H=0,54m / Menclume=4,3kg / Mtige=2,8kg / Mpointe=0,22kg / section=9,6cm²

Echelle : 1/25 ème

Résistance dynamique de pointe Rd (MPa)



Rapport de prospection thématique pluriannuelle

SICAVOR : Système d'Information Contextuel sur les Caves d'Orléans (2015-2017)