



HAL
open science

Évaluation et caractérisation des dépôts archéologiques : le croisement des lectures stratigraphique et géotechnique sur le terrain

Amélie Laurent-Dehecq, Mélanie Fondrillon

► To cite this version:

Amélie Laurent-Dehecq, Mélanie Fondrillon. Évaluation et caractérisation des dépôts archéologiques : le croisement des lectures stratigraphique et géotechnique sur le terrain. Lire le sol en archéologie : pratiques de terrain et regards croisés [Reading the soil in archaeology: field practices and comparative perspectives], Kai Fechner; Morgane Liard; Judit Deák; Mélanie Fondrillon; Jean-Baptiste Rigot; Philippe Husi; Carine Carpentier; Olivier Blin, Nov 2023, Tours, France. 26 p., <10.34692/tnsd-2c56>. <hal-05551808>

HAL Id: hal-05551808

<https://inrap.hal.science/hal-05551808v1>

Submitted on 13 Mar 2026

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Évaluation et caractérisation des dépôts archéologiques : le croisement des lectures stratigraphique et géotechnique sur le terrain

Amélie LAURENT-DEHECQ

Service d'Archéologie Préventive du Loiret
UMR 7324 CITERES – LAT
amelie.laurent@loiret.fr

Mélanie FONDRILLON

Service d'Archéologie de Bourges-Plus
UMR 7324 CITERES – LAT
melanie.fondrillon@agglo-bourgesplus.fr

Mots clés

caractérisation des sols, évaluation du potentiel archéologique, stratigraphie, géotechnique, approche de terrain

Keywords

soil characterisation, assessment of archaeological potential, stratigraphy, geotechnics, field approach

Référence électronique

LAURENT-DEHECQ, Amélie & FONDRILLON, Mélanie. (2026). Évaluation et caractérisation des dépôts archéologiques : le croisement des lectures stratigraphique et géotechnique sur le terrain. Dans K. Fechner, M. Liard, J. Deák, M. Fondrillon, J.-B. Rigot, Ph. Husi, C. Carpentier & O. Blin (dir.), *Lire le sol en archéologie : pratiques de terrain et regards croisés* [Reading the soil in archaeology: field practices and comparative perspectives]. Inrap. <<https://doi.org/10.34692/tmsd-2c56>>.

Résumé

Depuis une vingtaine d'année, en région Centre Val-de-Loire, une analyse croisée, associant les observations archéologiques et les mesures sur la compacité des couches, est expérimentée à l'occasion d'opérations préventives. Il s'agit d'évaluer l'épaisseur du dépôt archéologique et de le caractériser finement, notamment lorsque les conditions techniques et financières ne permettent pas d'étudier la totalité du gisement. La méthode complémentaire aux observations de terrain consiste à réaliser des sondages géotechniques au pénétromètre dynamique léger (PANDA®). L'objectif est double : d'une part étalonner les données d'un site à partir de coupes référentes et compléter ainsi le référentiel régional, d'autre part définir un maillage de prospection adapté aux questions archéologiques. En premier lieu, cette approche permet d'estimer l'épaisseur totale de la stratification d'un site et de poser des hypothèses sur l'interprétation fonctionnelle de couches rencontrées. En second lieu, la méthode est un dispositif adapté à l'évaluation des structures profondes, tels que les caves ou les puits. Enfin, il s'agit d'un outil d'aide à la décision pour engager les moyens techniques adaptés à l'étude des vestiges lors d'une opération ou bien en anticipation opérationnelle.

Abstract

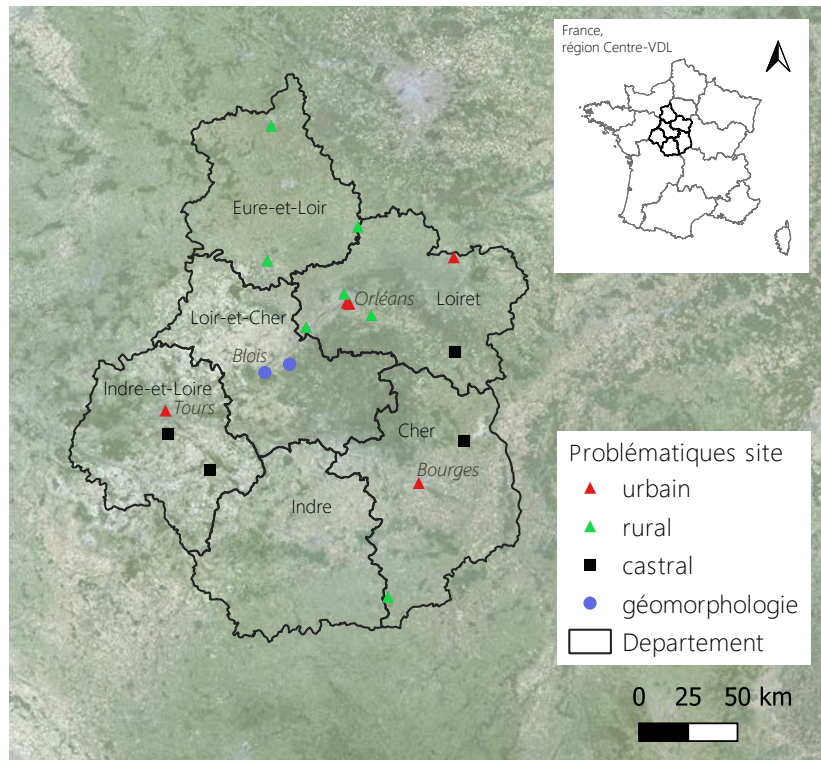
For the last fifteen years or so, in the Centre Val-de-Loire region, a cross-analysis has been carried out during rescue operations between the macroscopic field observations and the measurement of the compactness of layers. The aim is to assess the thickness of the archaeological deposits and to characterise it in detail, particularly when technical and/or financial conditions make it impossible to study the entire deposit. The complementary method to field observations consists of carrying out geotechnical soundings using a light dynamic penetrometer (PANDA®). The aim is twofold: firstly, to calibrate the data for a site based on reference sections and thus complete the regional reference system, and secondly, to define a survey grid adapted to archaeological issues. First, this approach makes possible to estimate the total thickness of the sedimentary sequence of a site to make assumptions about the functional interpretation of stratigraphic layers. Second, the method is also used to study specific constrained contexts such as cellars or shafts/wells. Finally, it is a decision-support tool that can be used to commit the appropriate technical resources to study the remains of an ongoing operation or in anticipation of a future intervention.

1. Introduction

Depuis une vingtaine d'années, en région Centre Val-de-Loire, une analyse croisée est expérimentée à l'occasion d'opérations préventives entre les observations macroscopiques des archéologues et la prise de mesures sur la compacité des couches par une archéologue qui s'est spécialisée pour l'étude géotechnique des sols (Fondrillon, 2007 ; Fondrillon & Laurent, 2018 ; Laurent, 2007 ; Laurent-Dehecq, 2019 ; Laurent & Fondrillon, 2010).

Les contextes de mise en œuvre de cette démarche concernent, d'une part, des sites en milieu urbain, avec une problématique généralement axée sur l'évaluation qualitative et quantitative du dépôt archéologique [fig. 1]. Mais aussi, d'autre part, des sites ruraux ou castraux, où les questions portent

Fig. 1 - Localisation des sites étudiés par prospection géotechnique au PANDA® en région Centre Val-de-Loire. (A. L-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2023)



davantage sur la configuration de structures archéologiques ou géomorphologiques ponctuelles ou linéaires, que les méthodes classiques de fouille ne permettent pas d’appréhender en totalité.

Il s’agit ici de présenter notre collaboration étroite en tant qu’archéologue de terrain (M. Fondrillon) et spécialiste (A. Laurent-Dehecq) en s’appuyant essentiellement sur des expériences menées à Bourges mais aussi sur des exemples régionaux où la question de l’approche de terrain (discussion, adaptation, moyens techniques et choix scientifiques) occupe une place centrale.

2. Objectifs et principes

2.1. Principes du PANDA

L’outil employé pour ces études est un PANDA® (Pénétrromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par Ordinateur). Son principe est de mesurer la résistance de pointe (Qd en Mpa) que reçoit une tige en fonction de son enfoncement au coup de marteau [fig. 2, fig. 3 et fig. 4]. Ainsi, on obtient un pénétrogramme représentant la compacité des couches en fonction de la profondeur.

Cet outil a notamment été utilisé sur des sites urbains, comme Tours, Lyon ou Bourges où un référentiel a été mis en place. Ce type de pénétromètre léger a l’avantage d’être portable, accessible à de petites surfaces, peu coûteux à mettre en œuvre et non-destructif.

Lors des opérations de diagnostic ou de fouille, une partie de l’équipe d’archéologue peut être formée rapidement à l’utilisation du PANDA® car la prise en main du boîtier est plutôt intuitive et le dispositif est facile à mettre en place. Durant un sondage, les mesures et les pénétrogrammes bruts peuvent être visualisés directement sur le boîtier afin de faire des observations globales (profondeur, valeurs de résistance de pointe, allure du signal). Ceci permet également à l’utilisateur de prendre une décision sur la poursuite d’un sondage lorsqu’un refus à l’enfoncement des tiges se manifeste.

À l'issue de ces sondages, l'extraction des données est réalisée grâce au module en ligne Websprint© développé par Sol Solution. Cette étape peut être réalisée durant la phase terrain, de sorte à obtenir des pénétrogrammes « bruts » utiles à la prise de décision rapide si des questions techniques, scientifiques et opérationnelles sont dès lors posées. En revanche, concernant l'analyse développée des signaux pénétrométriques, et en particulier le travail de complétude du référentiel archéo-mécanique (cf. *infra*), l'étape de traitement des données et de synthèse doit intégrer la phase de post-fouille et être réalisée par la spécialiste.

À l'origine, deux types de questions, en interaction, sont posées dès la phase de terrain et seront développées par la suite : les questions d'ordre scientifique et celles d'ordre technique et opérationnel [fig. 5].

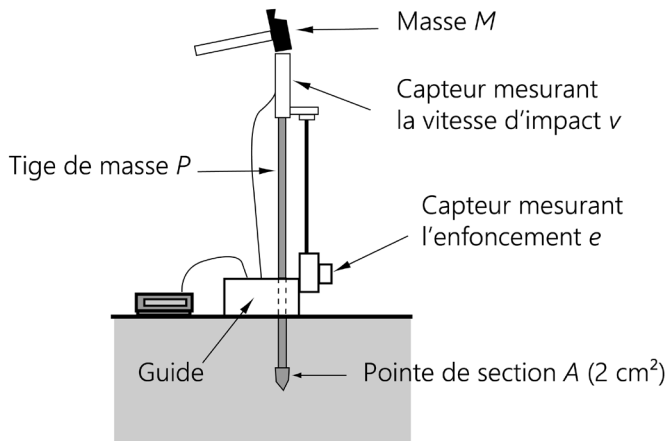


Fig. 2 - Schéma du dispositif PANDA®.
(A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2023)

La résistance de pointe Q_d est calculé suivant la méthode de calcul des Hollandais :

$$Q_d = \frac{1}{A} \frac{\frac{1}{2} M V^2}{e} \frac{M}{M+P}$$

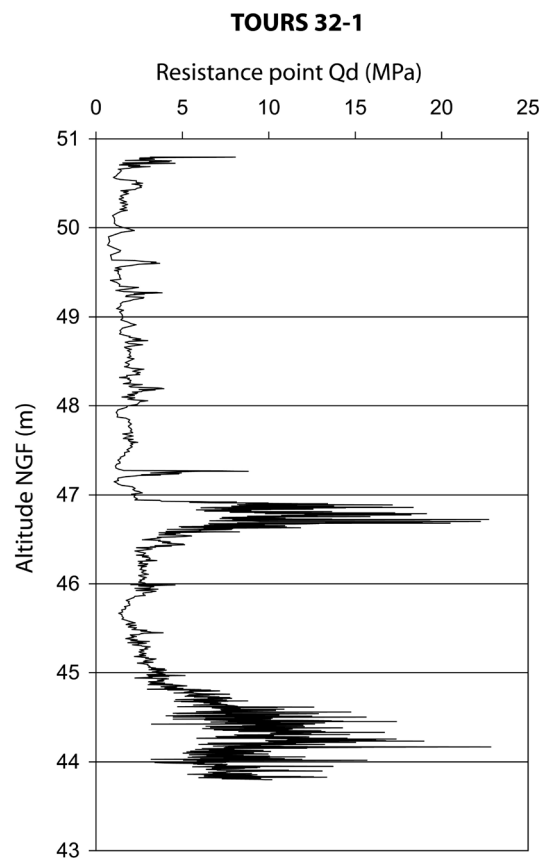


Fig. 4 - Exemple d'un pénétrogramme réalisé à Tours. (A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2007)

Fig. 3 - Mise en œuvre du dispositif PANDA® sur le site du château de Gien. (Département du Loiret, M. Bizri, UMR 6298 Artheis, 2011)

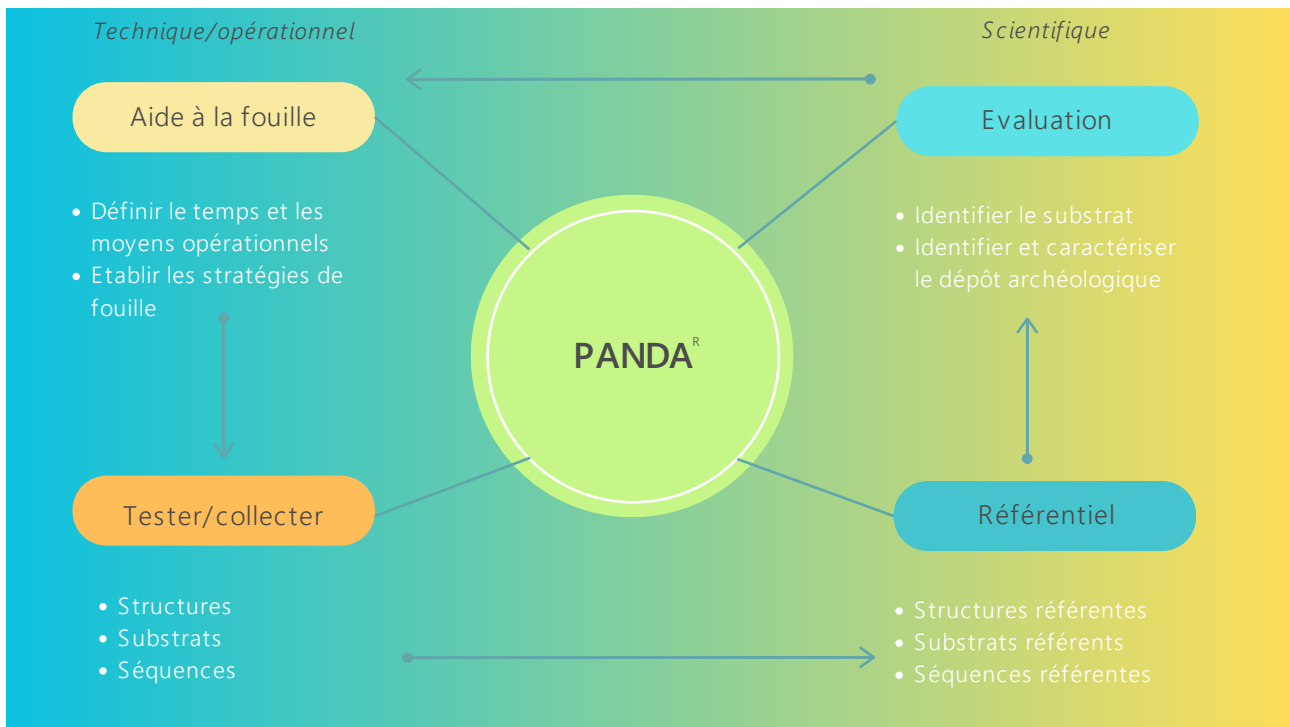


Fig. 5 - Carte mentale des objectifs scientifiques, techniques et opérationnels de l'utilisation du PANDA®. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES – LAT, 2023)

2.2. La caractérisation du sol urbain ou les questions d'ordre scientifique

En premier lieu, l'application du PANDA® s'attache à caractériser le dépôt archéologique dans son épaisseur, en identifiant ses grandes composantes stratigraphiques dans une démarche d'évaluation du potentiel archéologique (Laurent & Fondrillon, 2010). Cette question concerne principalement le sol urbain où la composante verticale est essentielle pour distinguer le substrat sous-jacent, estimer son épaisseur et préciser la nature des strates qui le composent (unités stratigraphiques). Ces strates sont constituées d'une matrice sédimentaire et d'un assemblage de constituants anthropiques dont les propriétés mécaniques permettent de caractériser leur fonction du point de vue archéologique (occupation extérieure, remblai, construction...).

À ce titre, nous rappelons ici quelques notions concernant le sol urbain dont les variations spatiales, temporelles et fonctionnelles en font un objet d'étude dynamique. Cette forte variabilité nécessite le développement d'un référentiel archéo-magnétique qui définit les propriétés mécaniques de séquences et structures archéologiques référentes mais aussi de faciès naturels (substrat calcaire, alluvions sableuses, argiles organiques ...).

Ainsi le sol urbain se délimite géographiquement comme l'espace urbanisé ancien, correspondant à la zone dense des occupations successives (Galinié, 1999, p. 9) ; ces variations spatiales dépendent des rythmes de formation de la ville fluctuant dans le temps (Laurent, 2007). Par ailleurs, il se délimite chronologiquement, entre la première occupation et l'actuelle, et connaît des fluctuations temporelles (ou trajectoires) dépendantes des variations d'intensité des activités humaines (Lepetit & Pumain, 1999, p. 5) qui vont se traduire par des variations d'épaisseur de stratification. Enfin, le sol urbain se délimite fonctionnellement, par la nature diversifiée des activités de la communauté d'habitants, et sa complexité dépend des comportements sociaux. Il connaît des variations importantes dans les fonctions urbaines qui le produisent, du dépôt d'ordures à la construction d'un édifice ou l'usage funéraire.

Dans une approche évaluative, au-delà de la simple accumulation des données à l'échelle des sites, prolifique depuis le développement de l'archéologie préventive, il s'agit de mesurer qualitativement et quantitativement ce potentiel

archéologique, en établissant des modélisations spatiales à l'échelle d'une ville ou d'un quartier, telles que les cartes du toit du substrat ou encore les cartes des épaisseurs de sol urbain.

À terme, les enjeux concernent le développement d'une gestion raisonnée des « archives du sol » en accordant à la fois les priorités d'ordre patrimonial et les questions scientifiques, en conciliant les impératifs de la recherche scientifique et ceux des aménagements urbains (Laurent-Dehecq, 2014, p. 10-11).

2.3. L'acquisition des données sur le terrain ou les questions d'ordre technique et opérationnel

En second lieu, l'application du PANDA se fait à l'échelle même de l'opération archéologique, où elle répond à une série de questions d'ordre opérationnel, dépendantes des contraintes techniques, financières et temporelles mais également du cahier des charges scientifiques annexé à l'arrêté de prescription. C'est également le lieu d'acquisition des données qui alimente le corpus de l'évaluation urbaine, à l'échelle de la ville.

Ces aspects techniques ou opérationnels concernent tout d'abord la mise en place du référentiel archéo-mécanique en étalonnant les mesures de structures particulières ou d'unités stratigraphiques propres à chaque site archéologique.

L'étalonnage se fait en premier lieu en bord de coupe afin de confronter les descriptions des couches archéologiques aux mesures de résistance de pointe. Dans un second temps, des sondages au PANDA® sont positionnés dans des secteurs où il est nécessaire d'obtenir des informations complémentaires aux observations de terrain. Les données sont interprétées à l'aide de l'étalonnage, des hypothèses de départ et d'un référentiel archéo-mécanique régional. Les traits spécifiques à l'interprétation fonctionnelle des couches (granulométrie, constituants...) se traduisent, dans une partie des cas, par une signature spécifique. En milieu urbain, cette approche croisée permet d'estimer l'épaisseur totale de la stratification d'un point à un autre alors que les sondages mécaniques ne peuvent pas atteindre le substrat pour des raisons techniques. Elle permet en outre de poser des hypothèses sur l'interprétation fonctionnelle de couches stratigraphiques. La méthode est également utilisée pour étudier des contextes spécifiques contraints comme des caves ou des puits.

Ainsi, il s'agit d'un outil d'aide à la décision pour engager les moyens techniques adaptés pour étudier les vestiges lors d'une opération.

L'évaluation du potentiel archéologique permet alors de définir les stratégies de fouille, le temps et les moyens adaptés pour réaliser les opérations archéologiques ou d'anticiper les moyens nécessaires au projet d'une fouille.

En somme, il s'agit d'évaluer l'épaisseur du dépôt archéologique, de le caractériser finement et d'identifier les structures d'ampleur qui nécessitent un traitement technique particulier, notamment lorsque les conditions techniques et/ou financières ne permettent pas d'étudier la totalité du gisement.

3. Méthodologie

Au-delà de l'identification fine du dépôt archéologique, voire de sa modélisation, l'application du PANDA® au moment de la fouille fournit des mesures interprétables *in situ*, pendant mais aussi juste après la réalisation du sondage.

3.1. L'étalonnage

Pour établir le référentiel, des sondages au PANDA® sont donc réalisés en bord de coupe décrite par l'archéologue, de façon à visualiser ce que traversent les tiges.

Ainsi, on confronte les pénétrogrammes aux observations archéologiques. Il s'agit d'attribuer les mesures suivant les relevés stratigraphiques de façon à calculer leurs propriétés mécaniques basées sur des valeurs moyennes de résistance de pointe en MPa et l'hétérogénéité interne de ces mesures. Comme le dialogue est dépendant d'un niveau d'observation commun, l'échelle de lecture stratigraphique entre l'archéologue et la spécialiste peut varier de l'ordre centimétrique (US) à décimétrique (séquence) selon la problématique.

Pour étalonner les mesures, trois démarches, souvent associées, ont été employées.

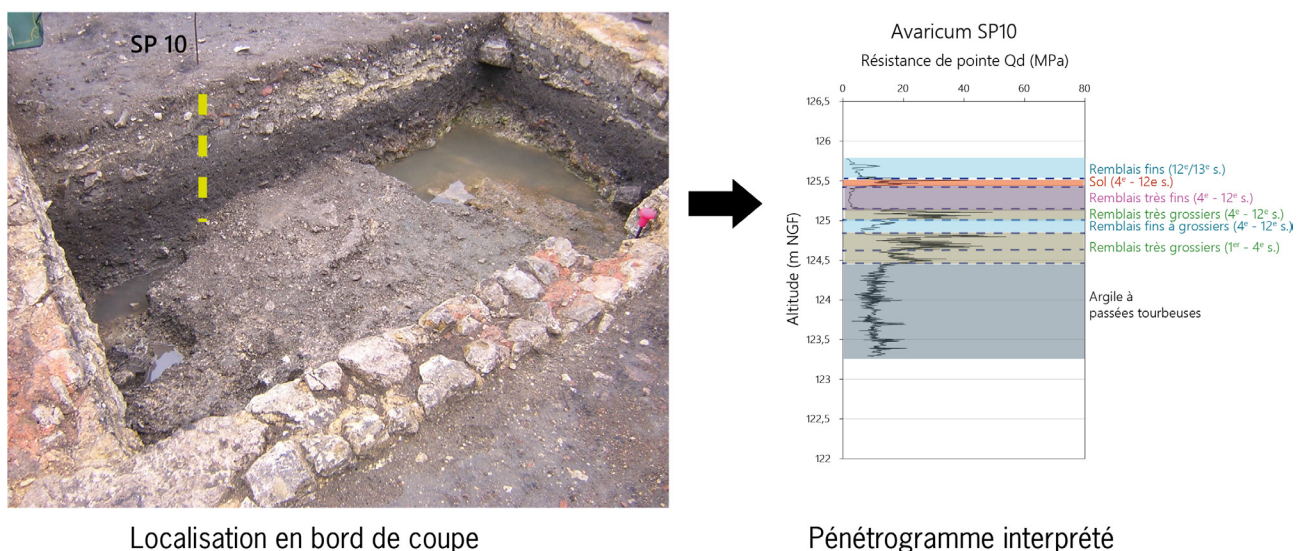
3.1.1. Démarche déductive

La première démarche, déductive, consiste à acquérir des données de façon à étudier les propriétés mécaniques propres à des formations naturelles ou anthropiques spécifiques, de sorte à mettre en lumière leur propre signature. Ces données sont à terme réinjectées dans le référentiel.

Pour discriminer les interprétations fonctionnelles des couches, plusieurs critères sont ainsi étudiés à l'aide de méthodes statistiques (probabilités de Bayes, analyse factorielle) : la résistance moyenne (Qd moyen) et la variabilité interne des mesures (coefficient de variation du Qd), l'épaisseur des couches et leur position stratigraphique (Laurent, 2007 ; Laurent & Fondrillon, 2010, fig. 1 ; Laurent-Dehecq, 2019). Les résultats montrent la possibilité de distinguer le dépôt archéologique des formations naturelles mais révèlent surtout une hétérogénéité des propriétés mécaniques des fonctions archéologiques. Toutefois, il est possible de regrouper des types de dépôts archéologiques par grande catégorie.

Le cas du site de la ZAC *Avaricum*, fouillée en 2009 et 2010 à Bourges et premier terrain de prospection archéo-mécanique sur le territoire berruyer, illustre ce type d'approche. En effet, l'application du PANDA® a été réalisée sur plusieurs coupes de référence réparties en plusieurs points du site, après la fouille des sondages adjacents, leurs relevés stratigraphiques et les observations géoarchéologiques. Ce dispositif a permis de corrélérer les pénétrogrammes avec les interprétations archéologiques et géoarchéologiques [fig. 6]. L'analyse archéo-mécanique montre, par exemple, que les séquences d'occupation extérieure (mise en culture, pâture, jardin) et de terres noires ont des valeurs de résistance faibles à fortes avec une variabilité interne faible, donc homogène. Du point de vue pénétrométrique, ces niveaux se distinguent bien des séquences sous-jacentes antiques qui sont caractérisées par des remblais présentant une fraction sédimentaire plus importante ou des aménagements occasionnant des valeurs de résistance et une variabilité interne plus élevées (hétérogénéité importante), voire des refus à l'enfoncement tels que des vestiges maçonnés.

Fig. 6 - Exemple d'étalonnage d'un sondage au PANDA® lors de la fouille ZAC *Avaricum* à Bourges. (A. L-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT / M. Fondrillon, E. Marot, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES – LAT)



Depuis 2009, le référentiel archéo-mécanique de Bourges a été enrichi de nouvelles données. Ainsi vingt sondages répartis sur neuf sites [fig. 7] ont permis d'étalonner 112 séquences stratigraphiques. On observe une non-unicité des propriétés mécaniques des séquences étudiées [fig. 8]. Les différentes expériences montrent cependant la possibilité de distinguer le substrat calcaire et les maçonneries des autres types de séquences. Les traits spécifiques à l'interprétation fonctionnelle des couches (granulométrie, constituants...) se traduisent, dans une partie des cas, par une signature spécifique du pénétrogramme.

À l'aide des probabilités de Bayes, des hypothèses peuvent être posées pour interpréter les « sols » étudiés par l'archéologue de terrain [fig. 9]. Des classes de valeurs moyenne de résistance (Moyenne Qd) des séquences stratigraphiques ont été discriminées et la fréquence des séquences ont été calculées en fonction de leur type au sein de chaque classe¹. Ainsi, a priori, donc globalement, les séquences étudiées les plus représentées sont les « occupations extérieures », les « remblais fins à grossiers » et les « remblais grossiers à plus grossiers ». Les probabilités permettent d'affiner l'étude. Par exemple, on observe que les séquences d'« occupation extérieure » ont une probabilité plus forte d'être associées à des valeurs moyennes de résistance inférieures à 2,5 MPa et comprises entre 2,5 et 4 MPa. Les « remblais grossiers à très grossiers » ont une probabilité plus forte de donner des valeurs de résistance moyenne entre 10 et 13,5 MPa tandis que le substrat « calcaire » possèdent des valeurs moyennes supérieures à 13,5 MPa.

À l'aide d'analyse factorielle, une classification est proposée [fig. 10 et fig. 11]. Les séquences stratigraphiques sont réparties suivant quatre classes expliquées par des corrélations entre les différentes variables. Par exemple, la classe n°4 qui se discrimine le plus des autres associe des séquences de substrat « calcaire » et de « construction » qui possèdent des valeurs moyennes de résistance très élevées et une variabilité interne des mesures moyennes à élevées. Ces observations sont assez similaires au référentiel qui avait été établi pour la ville de Tours (Laurent, 2007, p. 270-275).

Enfin, pour exploiter ce référentiel, à l'instar de ce qui avait été mis en évidence notamment à Tours, le positionnement altimétrique des séquences et l'étude documentaire permettent de réduire les possibilités voire de trancher entre les différentes interprétations.

3.1.2. Démarche inductive

La seconde démarche, inductive, permet de tester des hypothèses de terrain par rapport aux connaissances topo-historiques du lieu étudié. Elle concerne en particulier l'évaluation de la profondeur d'enfouissement des vestiges et du toit du substrat. Ainsi, des références altimétriques et la présence de coupe de référence permettent d'affiner les interprétations fonctionnelles des pénétrogrammes.

L'exemple du diagnostic avenue Béthune-Charost, à Bourges, est un bon exemple de ce type d'application. En effet, cette opération a associé un grand sondage d'évaluation à une trentaine de sondages au PANDA®, à proximité de deux fouilles réalisées quinze ans auparavant (ruelle de Nevers et 35, rue de Sarrebourg) (Maçon, 2015) [fig. 12]. L'objectif était de tester la présence d'une voie et d'un îlot d'habitations antiques, découverts lors des deux opérations précédentes, pour diagnostiquer dans les zones où il était difficile d'intervenir en sondages classiques. L'étude géotechnique a notamment permis de proposer une cote d'apparition de la voie antique et le toit du substrat calcaire, marqué par une pente vers le nord en direction de la vallée de l'Yèvre [fig. 13].

¹ - Dans notre cas, la formule des probabilités de Bayes est : $P(\text{Type} / \text{classe moyenne Qd}) = P(\text{classe moyenne Qd} / \text{Type}) * P(\text{Type}) / P(\text{classe Moyenne Qd})$.

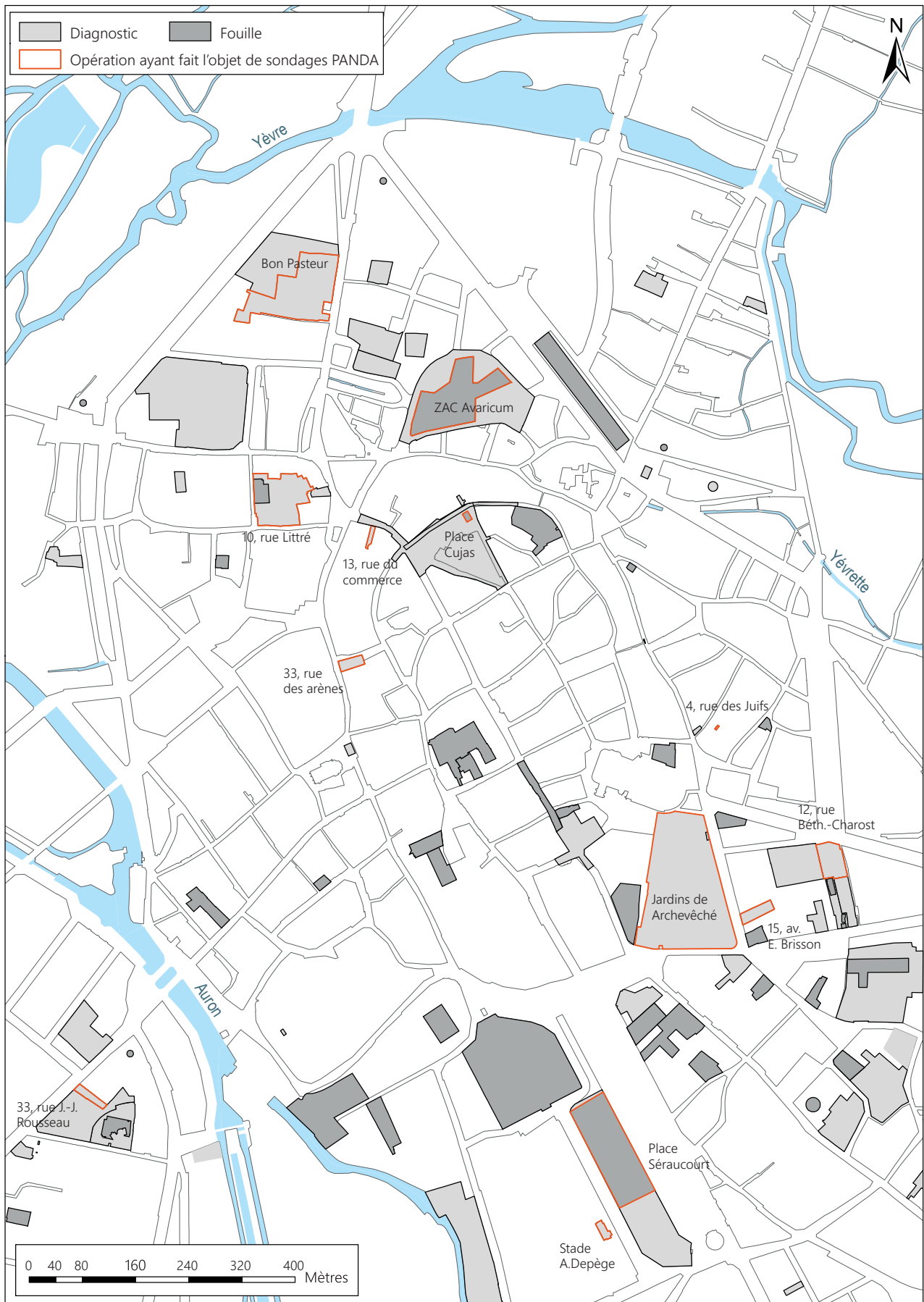


Fig. 7 - Localisation des sites étudiés pour l'élaboration du référentiel archéo-mécanique de Bourges. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES – LAT, 2024)

Fig. 8 - Fourchette des valeurs de résistance de pointe moyenne des séquences fonctionnelles en MPa. (A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2019)

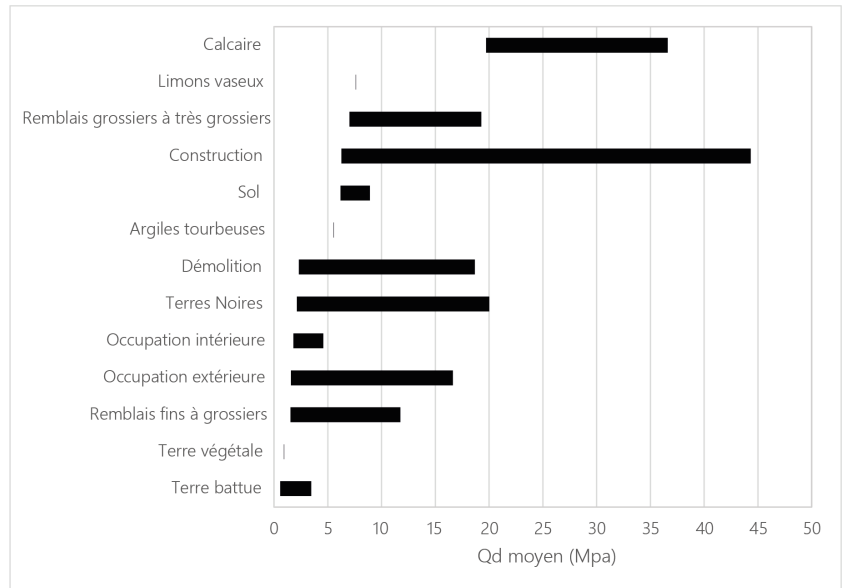


Fig. 9 - Probabilités des classes moyennes de résistance de pointe par fonction. (A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2019)

Fonction "séquences"	Probabilité a posteriori						A priori
	classe Moyenne Qd (Mpa)						Total
	< 2,5	2,5 - 4	4 - 4,9	4,9 - 10	10 - 13,5	> 13,5	
Limons vaseux				4,2%			0,9%
Argiles tourbeuses				4,2%			0,9%
Calcaire						42,9%	5,4%
Construction				4,2%	17,6%	21,4%	6,3%
Démolition	5,6%		5,3%	8,3%	5,9%		5,4%
Occupation extérieure	50,0%	40,0%	36,8%	25,0%		7,1%	27,7%
Occupation intérieure	11,1%		5,3%				2,7%
Remblais fins à grossiers	16,7%	15,0%	36,8%	12,5%	11,8%		16,1%
Remblais grossiers à très grossiers				20,8%	64,7%	14,3%	16,1%
Terre battue	5,6%	15,0%		16,7%			3,6%
Terre végétale	5,6%						0,9%
"Terres Noires"	5,6%	30,0%	15,8%	4,2%		7,1%	10,7%
Total général	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fig. 10 - Classification Ascendante Hiérarchique des séquences fonctionnelles à partir d'une Analyse en Composante Principale. (A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2019)

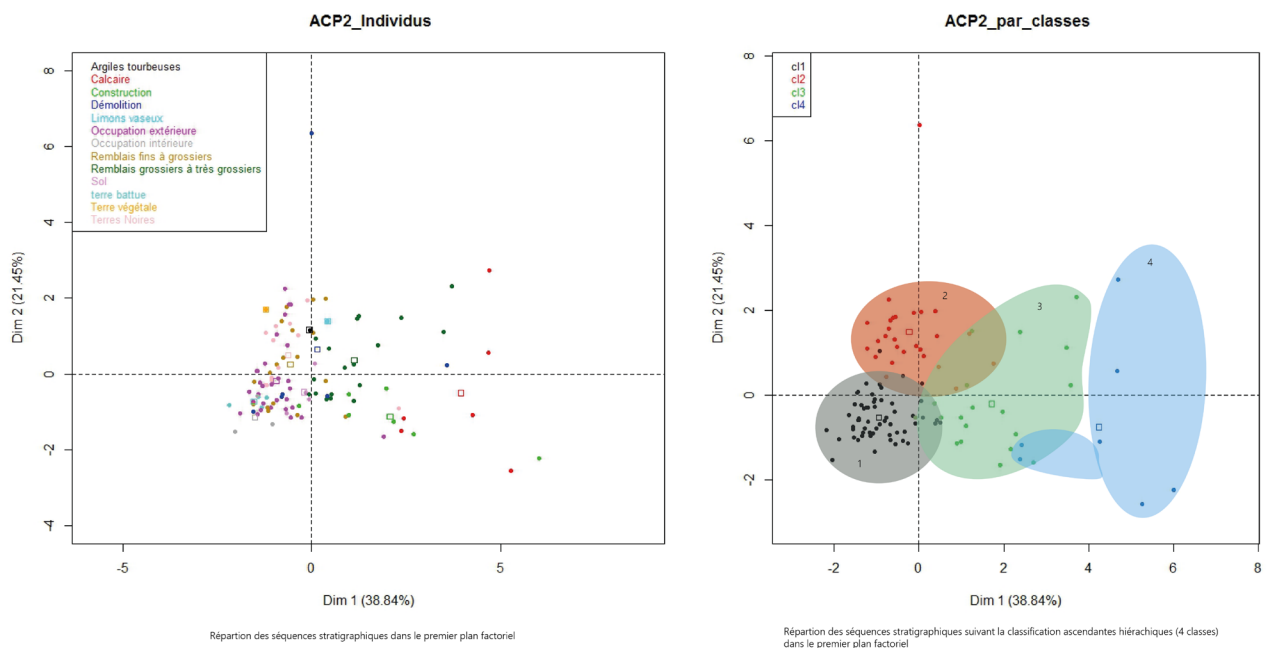
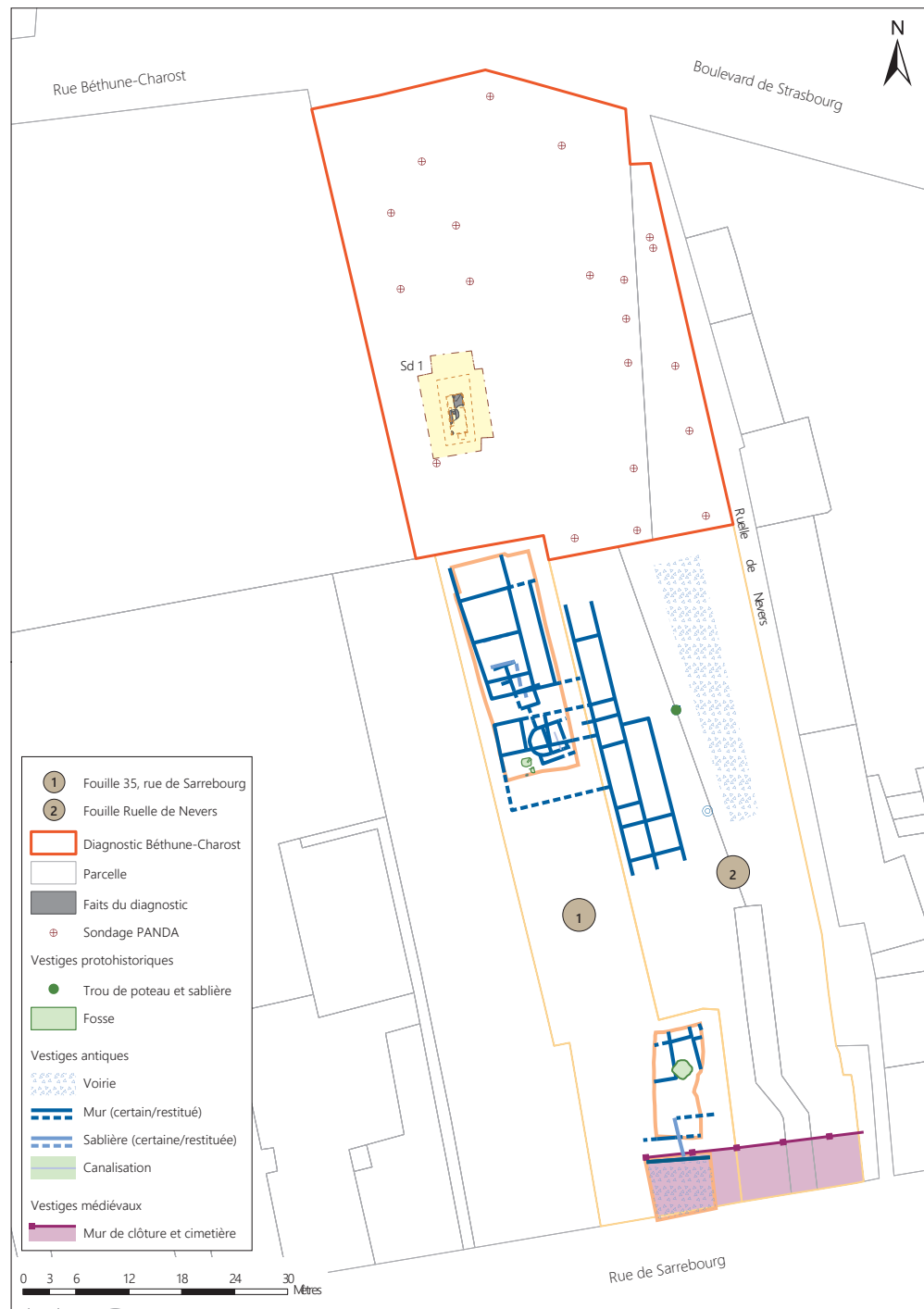


Fig. 11 - Description des classes définies par l'analyse factorielle.
(A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2019)

Fonction	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Limons vaseux		1		
Argiles tourbeuses		1		
Calcaire				6
Construction	1		5	1
Démolition	4	1	1	
Occupation extérieure	25	5	1	
Occupation intérieure	3			
Remblais fins à grossiers	9	7	2	
Remblais grossiers à très grossiers	4	5	9	
Sol	4			
terre battue	4			
Terre végétale		1		
Terres Noires	5	6	1	
Description				
+ : faible	Qd + à ++	Qd + à ++	Qd ++ à +++	Qd +++
++ : moyen	Epaisseur +	Variabilité ++	Variabilité ++ à +++	Variabilité Qd ++
+++ : fort		Epaisseur ++		

Fig. 12 - Localisation des sondages au PANDA® sur le site de Béthune-Charost à Bourges.
(M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES – LAT, 2015)



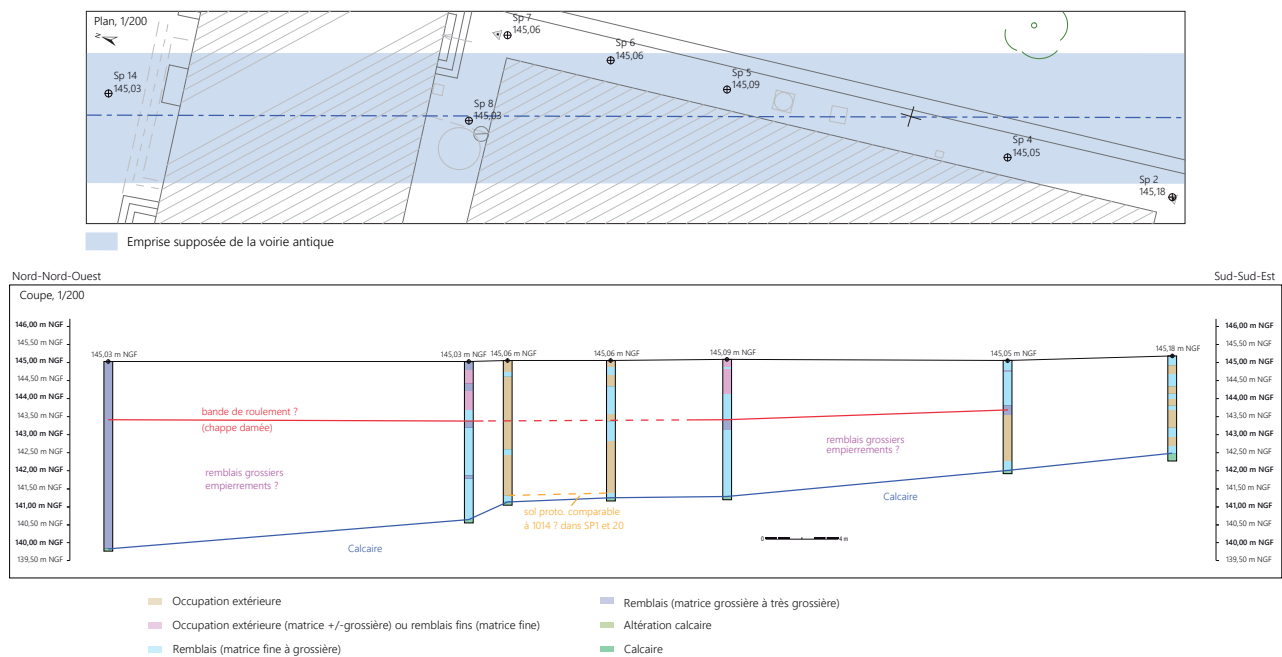


Fig. 13 - Restitution d'un profil stratigraphique à partir de l'interprétation des données pénétrométriques - site de Béthune-Charost à Bourges. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES - LAT / A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES - LAT, 2015)

3.1.3. Démarche collaborative

Cette méthode a été testée dans différents contextes d'interventions dans le cadre du dialogue entre un responsable d'opération et des spécialistes de la géophysique, de la géomorphologie et de la géotechnique. Elle présente un travail important en amont pour discuter sur la stratégie d'intervention afin de répondre à une problématique commune de détection de vestiges anthropiques, comme un fossé défensif d'époque gauloise, dans les jardins de l'Archevêché à Bourges (Fondrillon, 2021a, 2021b ; Thiesson *et al.*, 2021), ou des paléochenaux, comme à Blois (Josset *et al.*, 2017 ; Laurent-Dehecq *et al.*, à paraître) et Chambord (Bryant, 2018).

Les quatre campagnes de prospections non destructives, réalisées dans les jardins de l'Archevêché à Bourges, illustrent bien cette démarche. Elles intègrent le projet « Évaluation du potentiel archéologique de Bourges », initié en 2016, dont l'enjeu est de coupler diverses méthodes d'évaluation et de mettre à jour le jeu de données pour une modélisation du sous-sol archéologique (Fondrillon, 2021a, p.29). L'expérimentation a concerné une zone non construite de plus de 2 ha en centre-ville, dans l'emprise de jardins publics associés à l'ancien Archevêché. L'enjeu était l'identification du tracé et de la configuration du profil du fossé dit du « Haut de la Rue Moyenne » du nom de l'opération menée dans les années 1980 à l'est des jardins, qui avait permis de mettre au jour un imposant fossé d'époque gauloise, comblé au début de l'Antiquité. Entre 2016 et 2019, plusieurs méthodes évaluatives ont été appliquées : des prospections géophysiques (cartographie électrique, électromagnétique et sismique, géoradar), géotechniques (PANDA®), une évaluation documentaire, des sondages carottés et des datations par radiocarbone [fig. 14]. Mais aucun sondage de fouille mécanique ou manuelle n'a été réalisé, l'opération consistant en une évaluation non destructive du sol urbain. Les méthodes géophysiques employées ont permis d'identifier des anomalies conductrices ou résistantes, et de proposer plusieurs *scenarii* de configuration du fossé. Par ailleurs, les sondages carottés couplés aux sondages au PANDA® ont permis de restituer le toit du calcaire, le profil du fond du fossé recherché et d'identifier le séquençage du comblement.

Ces expériences montrent que la prospection géophysique et l'étude documentaire doivent être réalisées dans un premier temps de façon à positionner stratégiquement des transects alternant des sondages carottés avec des sondages au PANDA® suivant un maillage adapté. Quelques sondages au

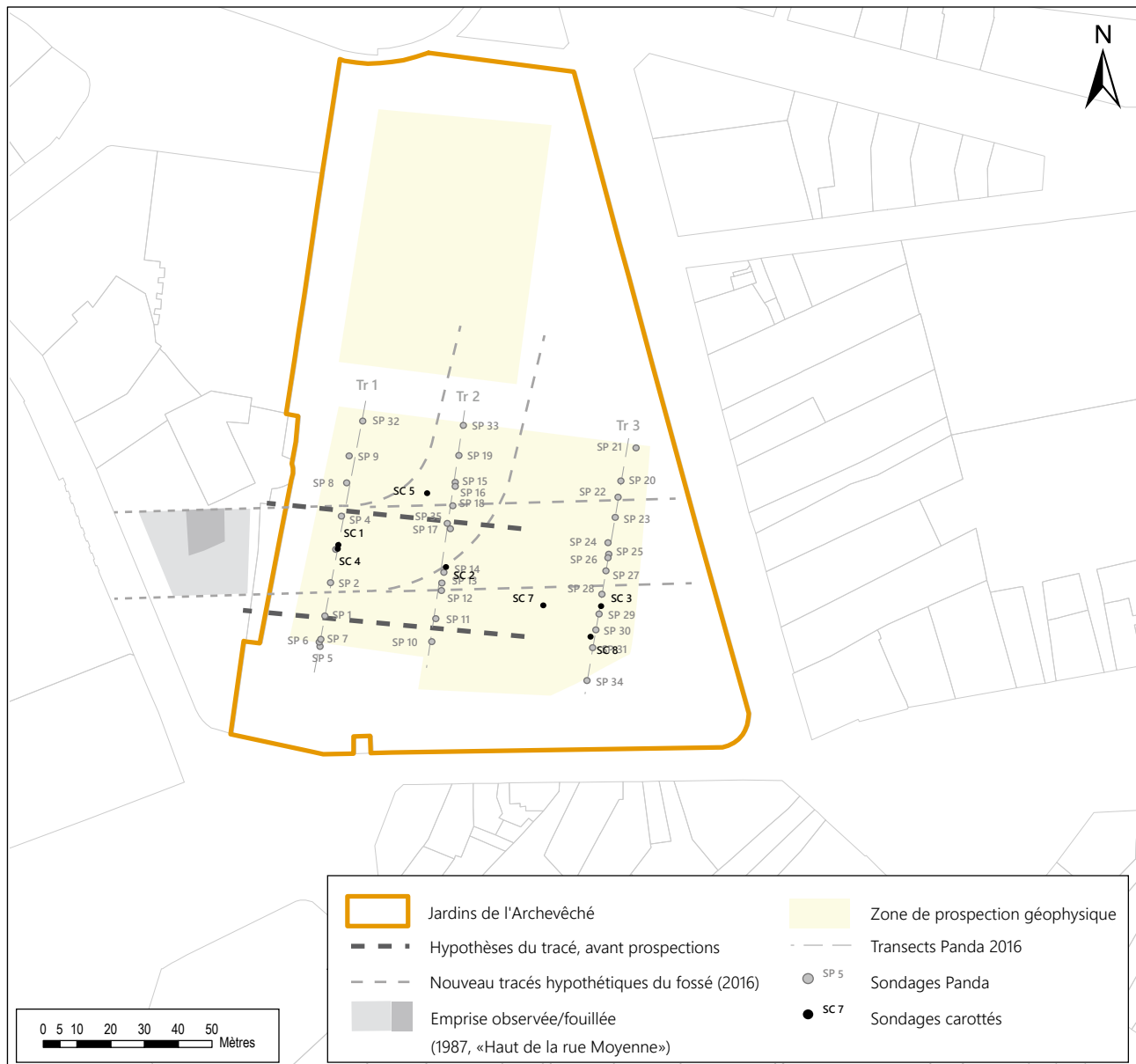


Fig. 14 - Localisation des emprises prospectées par la géophysique et des sondages géotechniques sur le site des Jardins de l'Archevêché à Bourges. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES – LAT, 2024)

PANDA® doivent donc être positionnés à proximité de sondages carottés de façon à étalonner les mesures à l'échelle du site étudié, c'est-à-dire à moins de 40 cm de distance pour limiter les variations latérales inhérentes au sol urbain. Dans le cas des Jardins de l'Archevêché, les sondages au PANDA® ont également permis de contrôler les anomalies détectées spatialement avec les outils géophysiques. Au terme de la démarche, les données étalonnées viennent enrichir le référentiel archéo-mécanique [fig. 15].

3.2. La caractérisation des structures ou séquences problématiques

Dans la plupart des cas, des sondages au PANDA® sont positionnés dans des secteurs où il est nécessaire d'obtenir des informations complémentaires aux observations de terrain. Les données sont interprétées à l'aide de l'étalonnage *in situ*, des hypothèses de départ et du référentiel archéo-mécanique régional.

3.2.1. Exemple d'une intervention contrainte en milieu urbain

Dans le cas d'opérations archéologiques non destructrices, comme une recherche programmée ou un diagnostic préventif sans ouvertures mécaniques, il est possible d'effectuer une série de sondages géotechniques, pour *a minima* acquérir un jeu de données quantitatives sur le dépôt archéologique. Ce fut le cas lors du diagnostic au 15, avenue Eugène Brisson, en 2015 à Bourges.

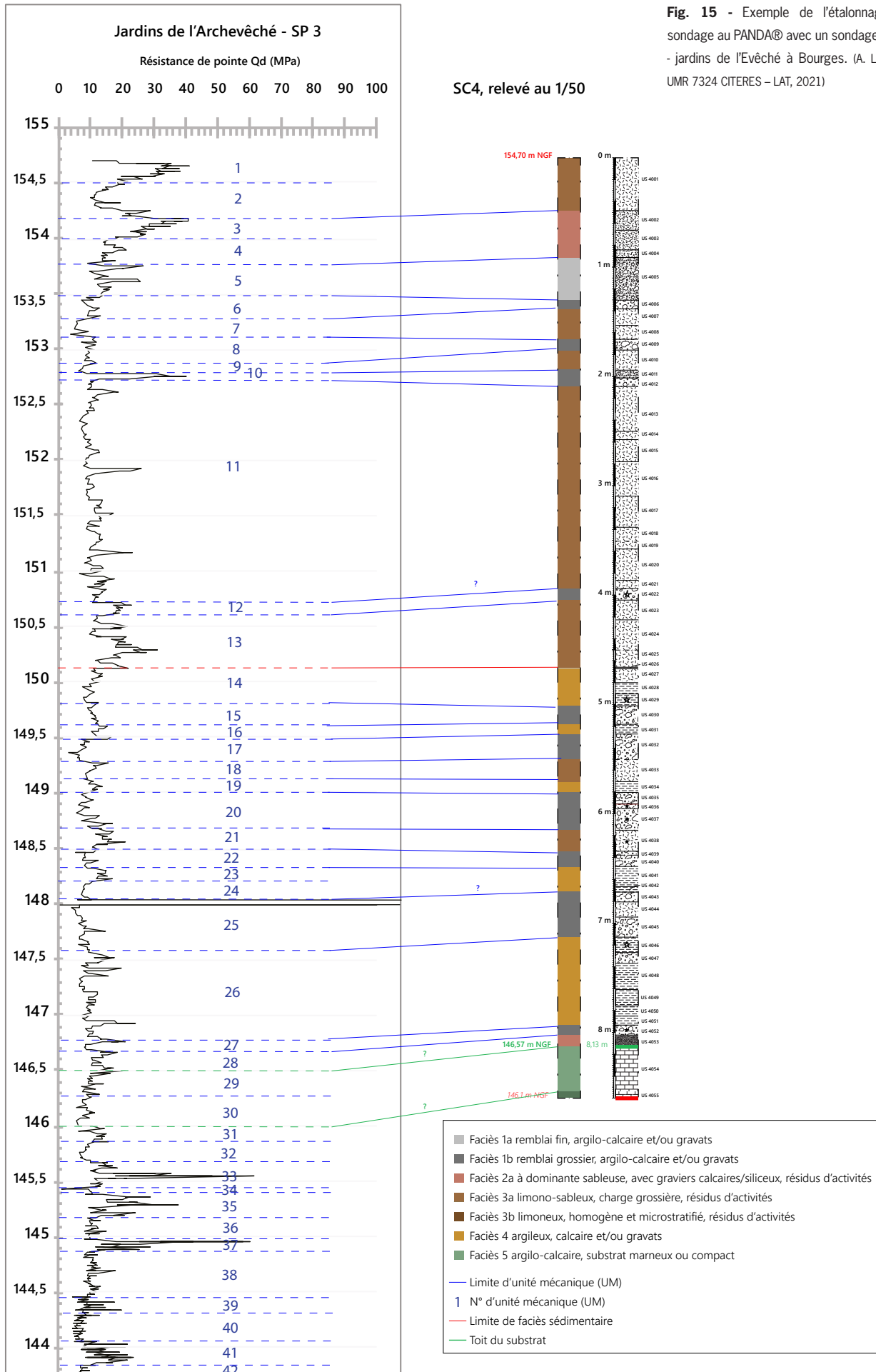


Fig. 15 - Exemple de l'étalonnage d'un sondage au PANDA® avec un sondage carotté - jardins de l'Evêché à Bourges. (A. L-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2021)

L'évaluation a consisté en 18 sondages au PANDA®, sans ouverture de sondage ni mécanique, ni manuel [fig. 16]. Les données de sondages géotechniques antérieurs (pressiomètre, destructif, pénétrométrique), réalisés par le bureau d'études Appuisol, ont été également intégrées. Le couplage des différentes informations a permis de proposer une modélisation du toit calcaire à l'échelle du quartier et d'identifier différentes séquences et structures, dont de probables maçonneries à 4 m de profondeur, ou encore un ancien thalweg à la base de la stratification, sans doute comblé dès l'époque romaine. L'acquisition de nouvelles données géotechniques lors du diagnostic en 2015, couplée à l'intégration des données issues des études géotechniques préalables au projet de construction d'un nouveau bâtiment, a permis de compléter le jeu de données du sous-sol acquises depuis une trentaine d'années dans ce quartier sud-est de la ville, en extrapolant les observations archéologiques environnantes et les informations strictement géotechniques (Fondrillon *et al.*, 2016).

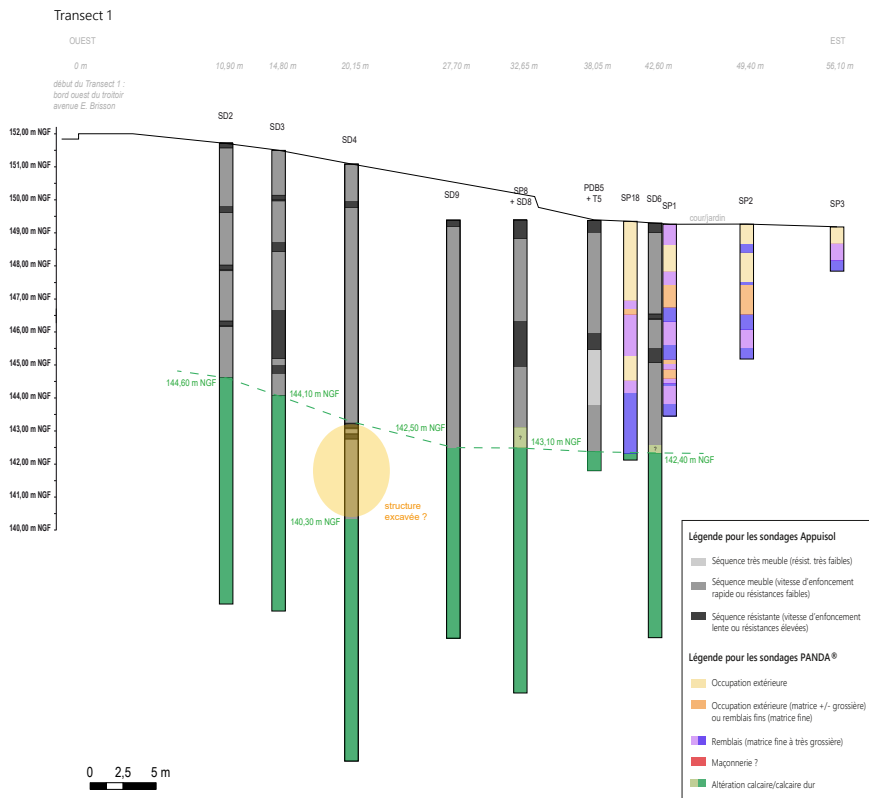
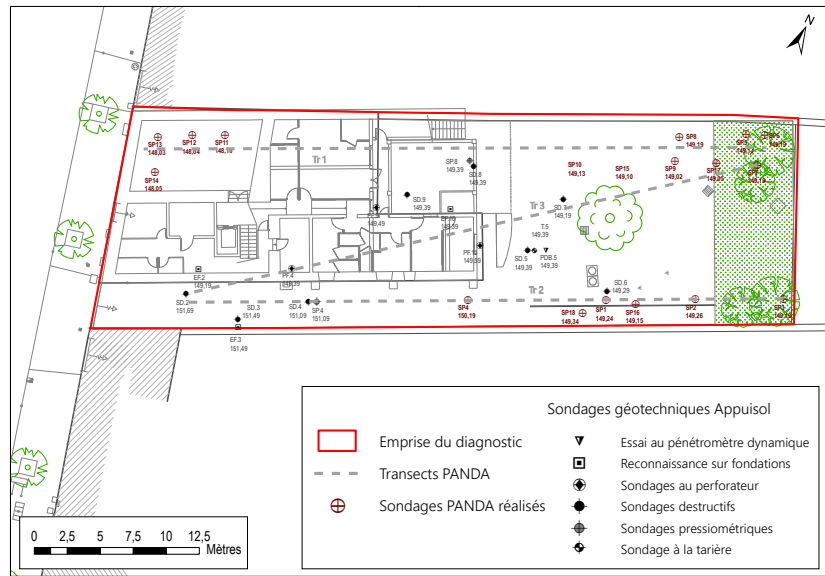


Fig. 16 - Localisation des sondages géotechniques et hypothèses stratigraphiques sur le site du 15 avenue Eugène Brisson à Bourges. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES - LAT / A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2015)

3.2.2. Exemples de structures ou contextes particuliers

L'étude au PANDA® peut être sollicitée comme une véritable aide à la décision lors de la fouille pour définir la méthode de fouille adaptée (manuelle, mécanique, arrêt de la fouille) ou pour l'anticipation opérationnelle dans le but d'estimer les moyens techniques appropriés.

Sur le site des pentes Séraucourt à Bourges, trois structures profondes antiques (puisards ou puits) ont été testées au PANDA® (Fondrillon *et al.*, 2020, p. 495) [fig. 17].

La première structure, ST 2, a été fouillée manuellement jusqu'à 1,9 m de profondeur, en aménageant un palier mais sans atteindre le fond ; trois sondages au PANDA® ont permis d'identifier le fond vers 3,7 m de profondeur totale et d'établir ainsi une stratégie d'intervention pour la suite de sa fouille : un sondage mécanique jusqu'au fond, en effet situé à - 3,7 m, a ensuite été pratiqué et a permis de fouiller les premiers comblements et de relever l'ensemble du remblaiement.

Deux autres structures de même configuration, apparues plus tardivement à la fouille, ont été testées de la même manière en amont de la fouille. En l'absence de budget pour la fouille de plusieurs structures profondes, ces fosses ont été testées au PANDA®. Leurs fonds, situés à -3,6 m depuis le niveau d'aménagement, ont permis de les identifier à des puisards, et non à des puits dans la mesure où la nappe phréatique est située à 25 m de profondeur.

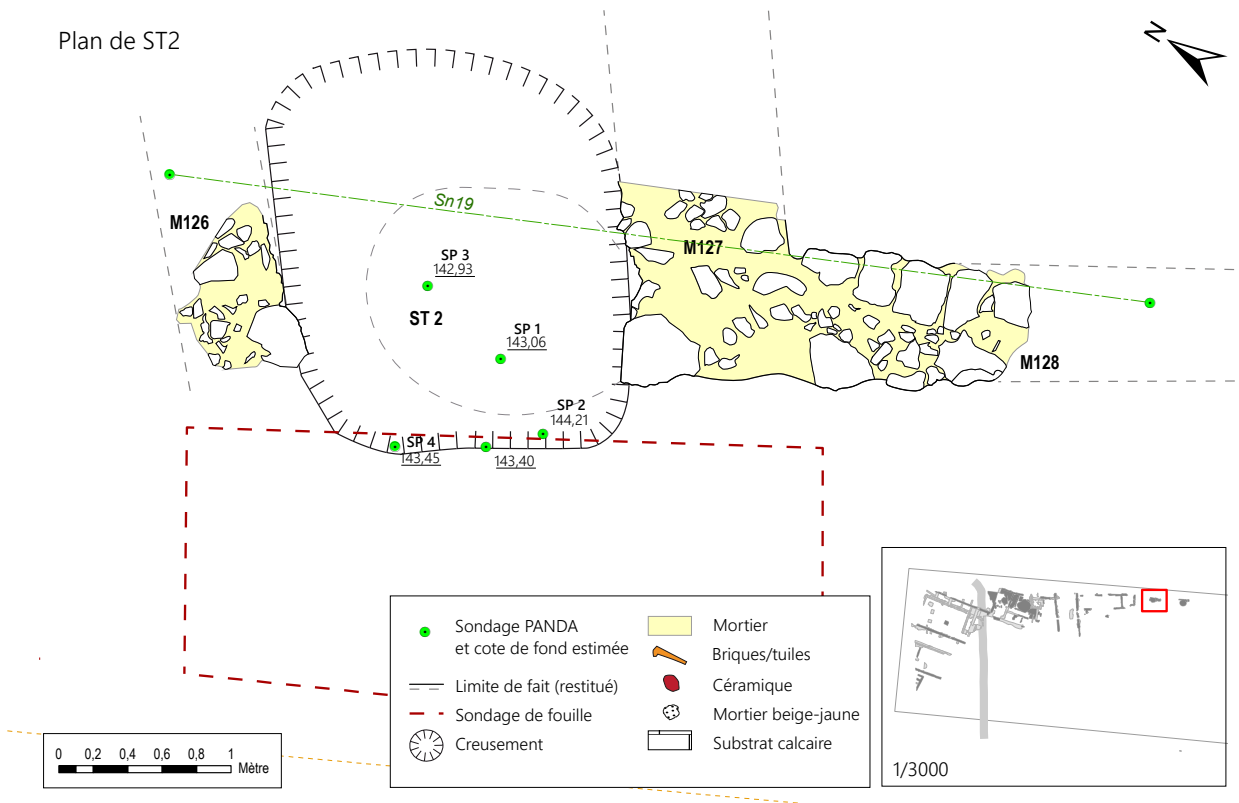
En revanche, dans le cas d'une quatrième structure profonde, localisée au centre d'un petit atrium d'une *domus* du III^e s., le sondage au PANDA® indique un aménagement plus profond que les autres, voire un puits, puisque l'ensemble du train de tiges à disposition a été utilisé (8 m) sans rencontrer le fond calcaire. L'absence de fouille manuelle ou mécanique de ces structures n'a toutefois pas permis de valider nos hypothèses.

Dans le cas de la fouille préventive de la ZAC Portes du Loiret à Saran, un puits a d'abord été étudié avec des sondages mécanisés sur 5 m de profondeur (Laurent-Dehecq & Payet-Gay, à paraître) [fig. 18]. Ensuite, un sondage au PANDA® a été effectué sur 9,70 m et interrompu pour des raisons techniques faute de tiges supplémentaires. Compte-tenu de ces résultats, il a été décidé d'engager la fouille du puits avec la « cellule d'intervention de structures archéologiques profondes » (CISAP) de l'Inrap et de jauger des moyens à allouer. Lors de la fouille, un sondage au PANDA® a été à nouveau effectué. Il restait 4 m à fouiller. Compte-tenu des moyens restants, il a été convenu de poursuivre l'intervention. Ainsi, ce puits a pu être totalement fouillé sur ses 20 m de profondeur.

Dans l'exemple de la fouille programmée au château de Loches, l'objectif était de placer des sondages pour étudier l'angle nord-est et le mur gouttereau de la « grande salle » des logis royaux, en évitant de les rechercher par tâtonnement à la pelle mécanique (Papin, 2019) [fig. 19].

Au total, 17 sondages au PANDA® ont été effectués dans la continuité du mur déjà étudié en amont, suivant un maillage de 5 m et un maillage plus resserré, là où potentiellement l'angle a été repéré. Le postulat de départ était que la présence de maçonnerie occasionnerait un refus (impossibilité de tout enfoncement supplémentaire) vers 40 cm de profondeur, alors qu'en son absence, le sondage au PANDA® aurait un refus au niveau du substrat calcaire, vers 2,20 m.

La méthode a globalement bien fonctionné et a pu être validée par la fouille effectuée dans les deux sondages. Des variations de côte ont été observées là où le PANDA® a pénétré dans la partie superficielle de la partie centrale des murs, moins solide que les pierres de parement.



Coupe nord-est (SN 19) de ST2

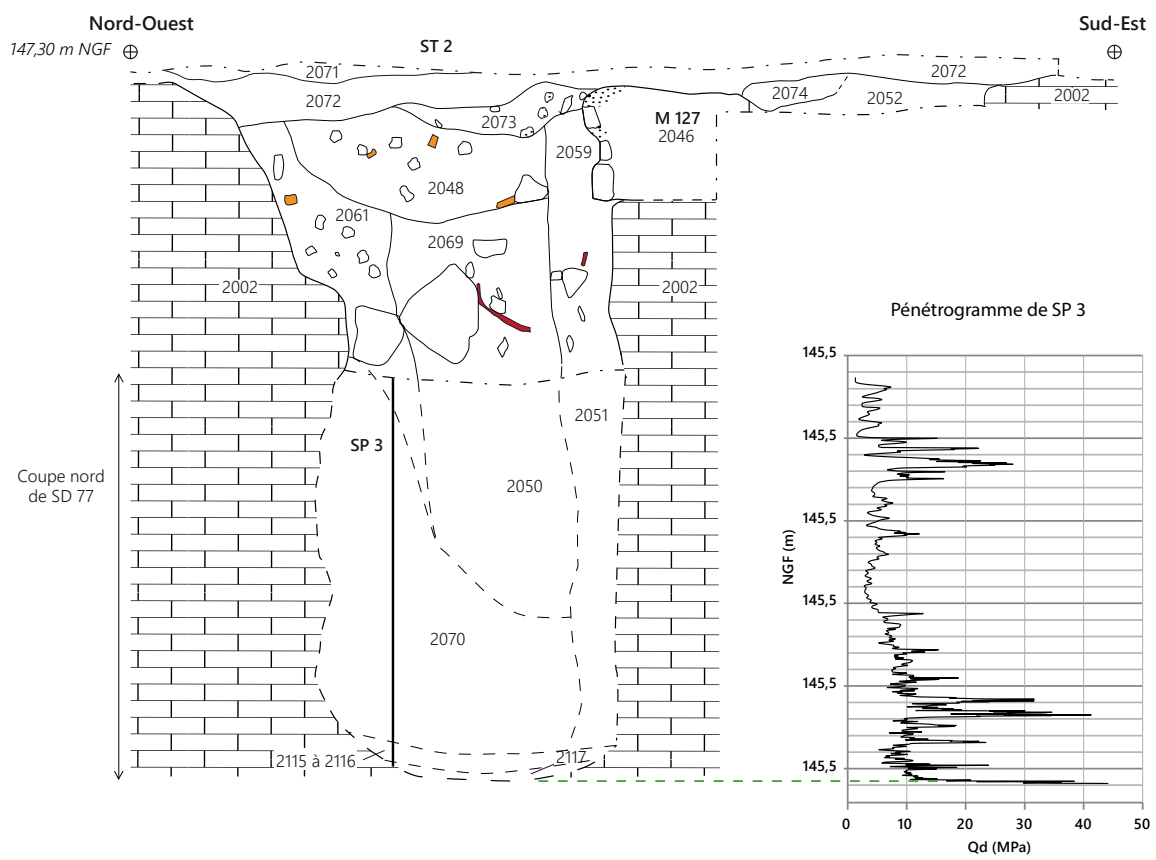


Fig. 17 - Localisation des sondages au PANDA® dans le comblement du puits ST. 2 et interprétation du pénétrogramme SP3 sur le site des Pentes Séraucourt à Bourges. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES - LAT / A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES - LAT, 2024)

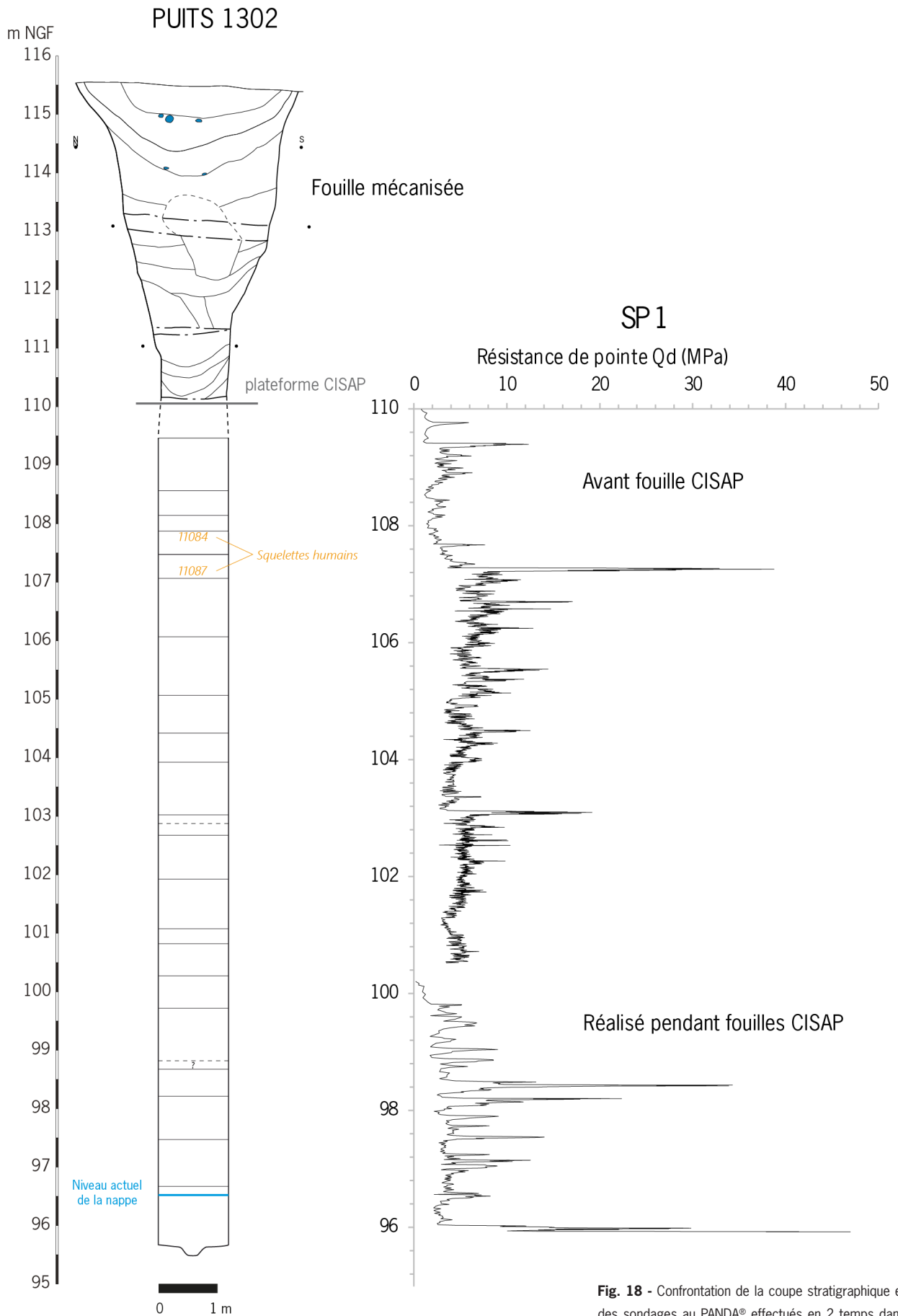


Fig. 18 - Confrontation de la coupe stratigraphique et des sondages au PANDA® effectués en 2 temps dans le puits 1302 sur le site de la ZAC Portes du Loiret à Saran. (A. L. Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2023)

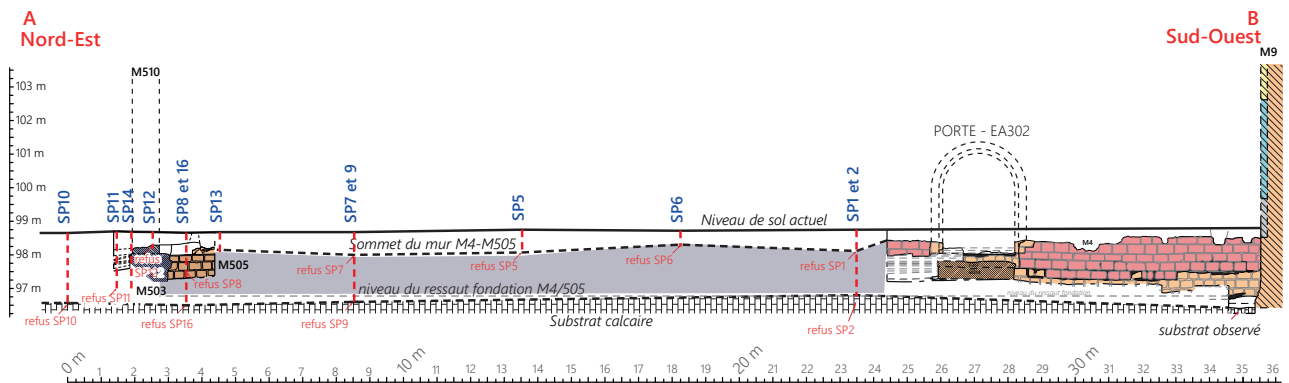
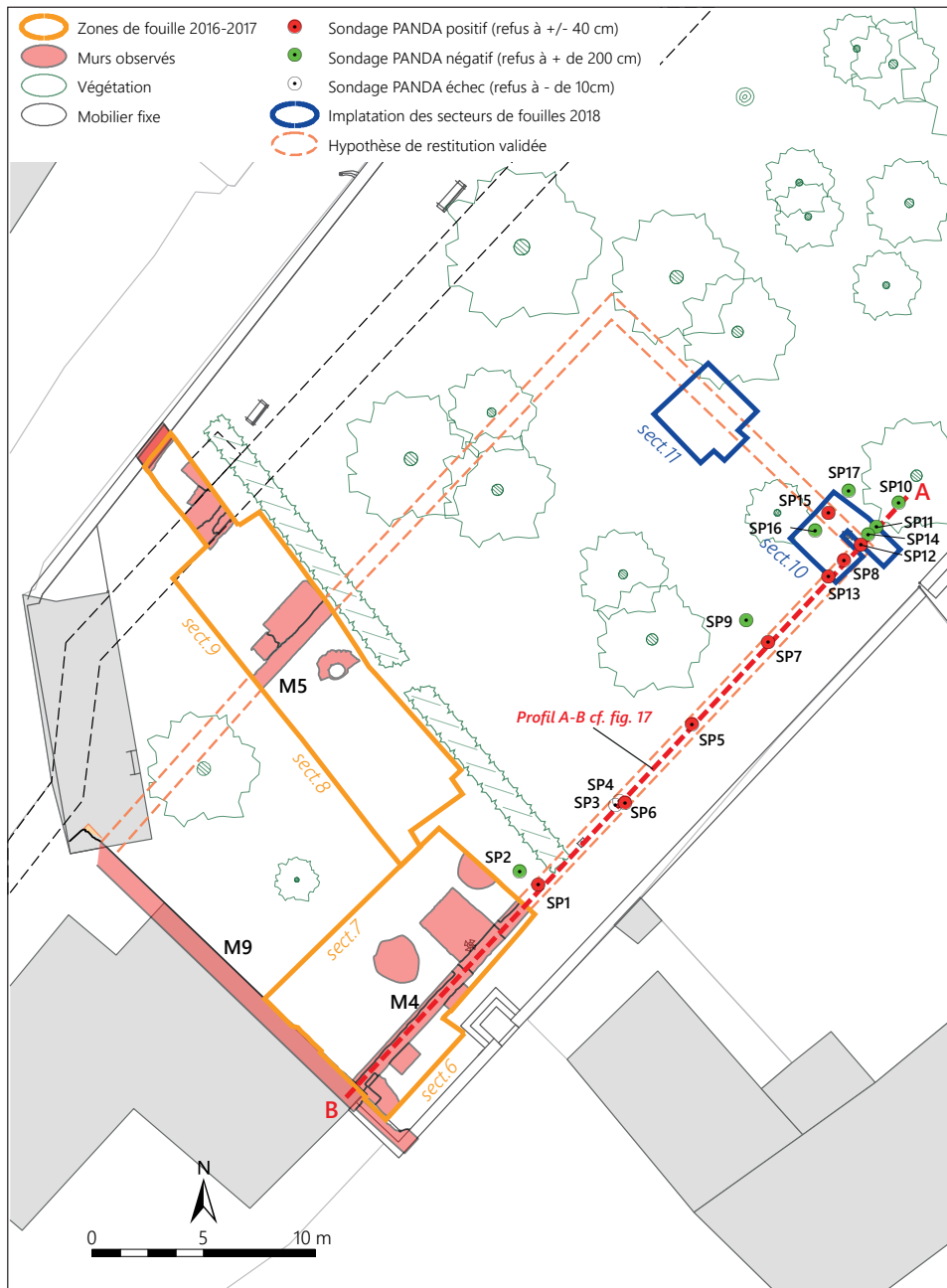


Fig. 19 - Localisation des sondages au PANDA® et sondages archéologiques sur le site des jardins des logis royaux de Loches. (D'après Papin, 2019, fig.16 et 17 ; A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2024)



Fig. 20 - Estimation de la cote du toit calcaire pour la profondeur d'aménagement d'un réservoir d'eau enterré sur le site de la Place Cujas à Bourges. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES - LAT, 2023)

Un autre cas d'application de l'outil géotechnique pour l'anticipation opérationnelle concerne le diagnostic de la Place Cujas à Bourges, réalisé en juillet 2022 en amont de la construction d'un réservoir enterré des eaux pluviales. L'évaluation a concerné quatre secteurs archéologiques dans lesquels nous avons pratiqué une dizaine de sondages au PANDA® en plus des sondages mécaniques et manuels réalisés jusqu'à 2,6 m de profondeur, cote de fond de forme de l'aménagement projeté dans un premier temps (Fondrillon, 2023) [fig. 20].

Le but était d'estimer la cote du toit calcaire, avec un enjeu axé sur l'identification du toit du substrat et l'évaluation de l'épaisseur du dépôt archéologique conservée au-delà des 2,6 m observés à la fouille.

Nous avons identifié le calcaire entre 4 et 4,5 m de profondeur, et la présence d'une double pente. D'autres sondages au PANDA® ont permis de tester le fond de caves situées en bordure de rue, avec une cote du substrat estimée à 5,5 m à l'emplacement des cavités.

Ces données ont été une véritable aide à la décision pour la suite de la fouille réalisée en 2024, où le nouvel aménagement projeté était plus restreint en surface mais plus profond, avec un nouveau fond de forme aménagé jusqu'au calcaire. Le projet scientifique d'intervention a pris en compte ces observations et les besoins techniques ont été estimés en conséquence. La fouille menée à la suite du diagnostic, en 2024, a confirmé la cote du toit calcaire à environ 4,5 m de profondeur et l'ensemble des côtes estimées pour les différentes séquences sédimentaires observées en coupes lors du diagnostic (post-fouille en cours).

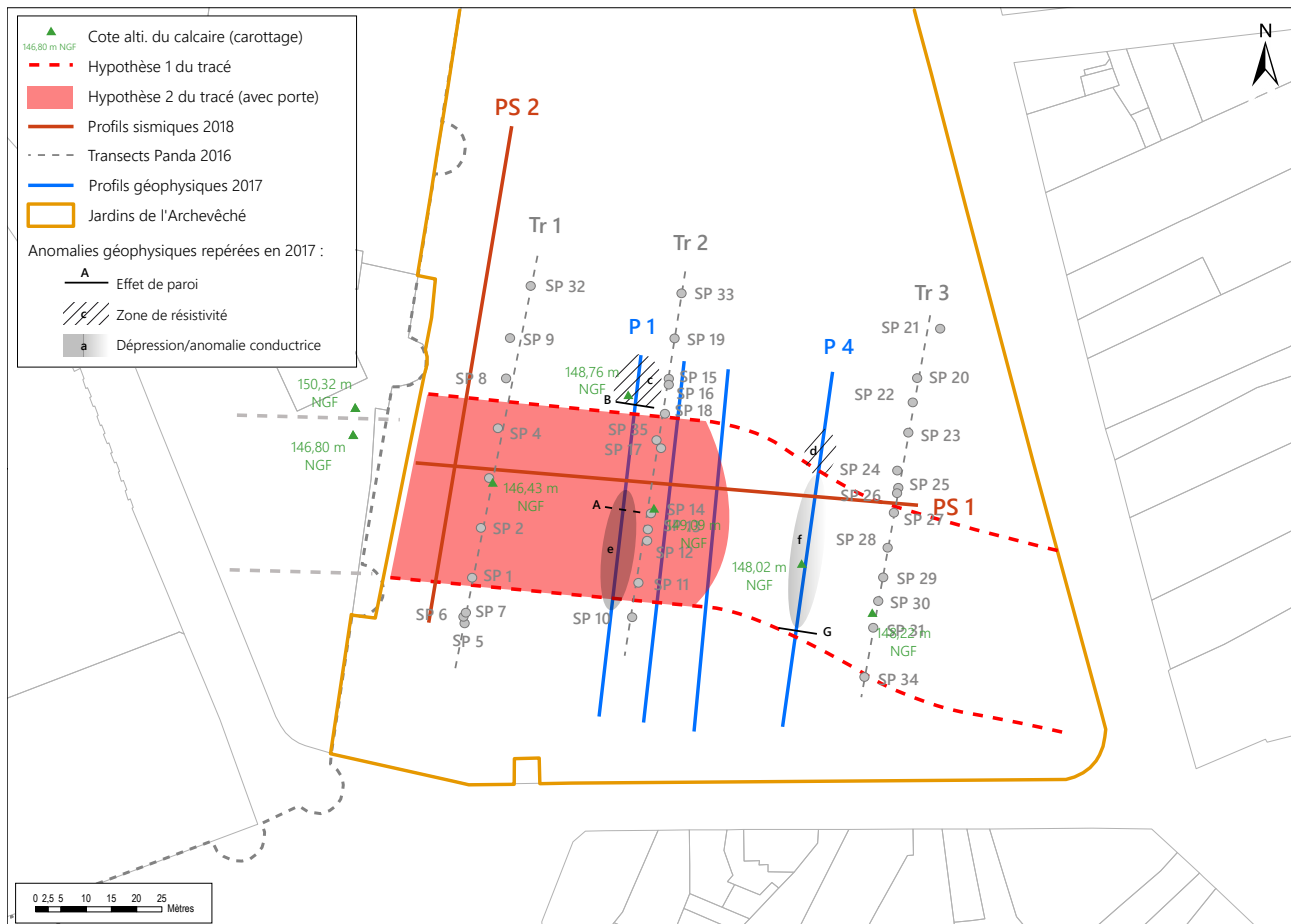


Fig. 21 - Hypothèses des profils et des tracés du grand fossé protohistorique, sur le site des Jardins de l'Archevêché à Bourges. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES – LAT, 2021)

4. Volet analytique

Pour aller plus loin, ce dialogue constant et le couplage avec d'autres méthodes permettent de proposer des modélisations du sous-sol comme outils d'aide à la décision dans le cadre d'une politique patrimoniale menée à l'échelle de la ville, en général.

4.1. L'exemple d'un programme d'évaluation urbaine : la modélisation du toit calcaire et du tracé du fossé gaulois de Bourges-Avaricum

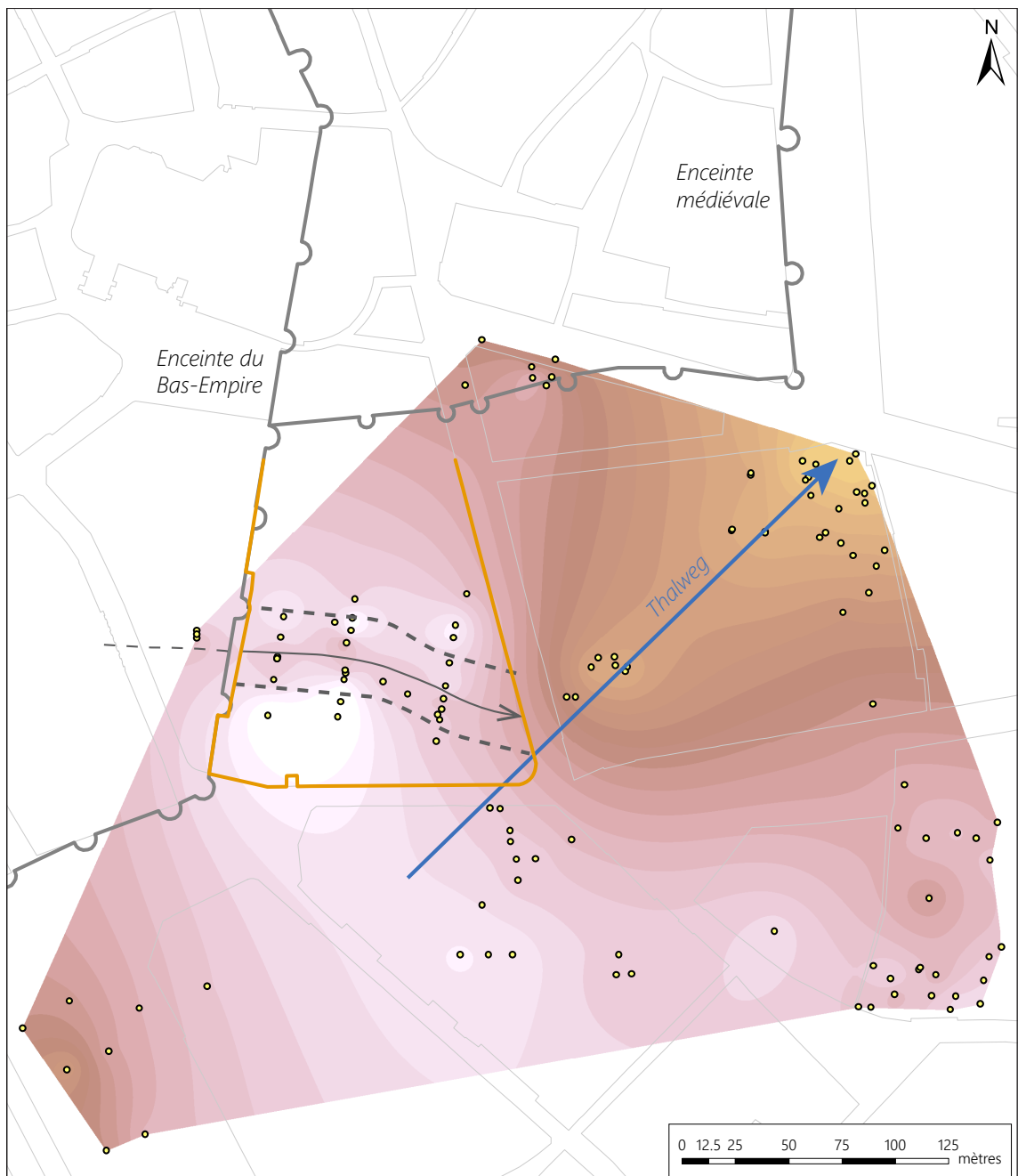
Ce travail collaboratif peut aboutir à l'élaboration de profils stratigraphiques et de localisation de vestiges à partir de données ponctuelles. C'est le cas à Bourges dans les jardins de l'Archevêché où des sondages carottés et pénétrométriques ont été positionnés suivant des transects et couplés avec les données géophysiques [fig. 21].

Au terme des quatre campagnes de prospection, une nouvelle carte de modélisation du toit calcaire a été réalisée en tenant compte des révisions récentes et des nouvelles données acquises depuis 2016. Ce travail a été limité spatialement à la zone de prospection et ses abords, c'est-à-dire des secteurs situés à proximité des jardins comportant un nombre suffisant d'observations afin de ne pas interpoler sur des zones de vide documentaire. Le corpus de points comprend 138 items, composé d'observations archéologiques ponctuelles (13 logs), de sondages géotechniques (69), d'observations issues de la prospection archéologique au PANDA® (49), de sondages carottés (6) et d'une observation issue de la Banque du Sous-Sol du BRGM. Par ailleurs, il faut mentionner un travail important mené en 2018 de nouvelle calibration des sondages au PANDA® au regard des sondages carottés, permettant d'affiner le référentiel local (Fondrillon, 2021a, p. 51-53, fig. 2-23).

L'interpolation proposée repose sur un outil développé par ArcGIS, « Topo vers raster » qui permet de prendre en compte des contraintes d'écoulement et le relief, générant des MNT « hydrologiquement corrects » (Esri, 2016). Rappelons que sans anomalie fossoyée, le toit du substrat calcaire est atteint en moyenne sous 4 à 5 m de dépôt archéologique très compact, c'est-à-dire vers 150 m NGF.

La modélisation confirme la connexion du fossé au thalweg oriental, localisé dans le quartier Brisson [fig. 22], et mis en lumière lors d'une première modélisation du toit calcaire en 2016 (cf. *supra* ; Fondrillon *et al.*, 2016) : l'anomalie fossoyée repérée dans les jardins, dans le prolongement oriental du fossé découvert dans les années 1980, entaille le substrat jusqu'à 3,6 m de profondeur et utilise la topographie d'origine à l'est, en direction du thalweg, comme zone d'écoulement et de défense naturelle. L'approche apporte également de nouvelles données concernant la configuration du fossé : en effet, les cotes calcaires observées et l'interpolation n'indiquent pas de remontée du substrat dans cette zone, ce qui écarte l'hypothèse de la présence d'une porte au centre du tracé restitué.

Fig. 22 - Confrontation de la modélisation du toit du calcaire avec les hypothèses de terrain, Jardins de l'Archevêché à Bourges. (X. Rolland, M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES – LAT, 2021)



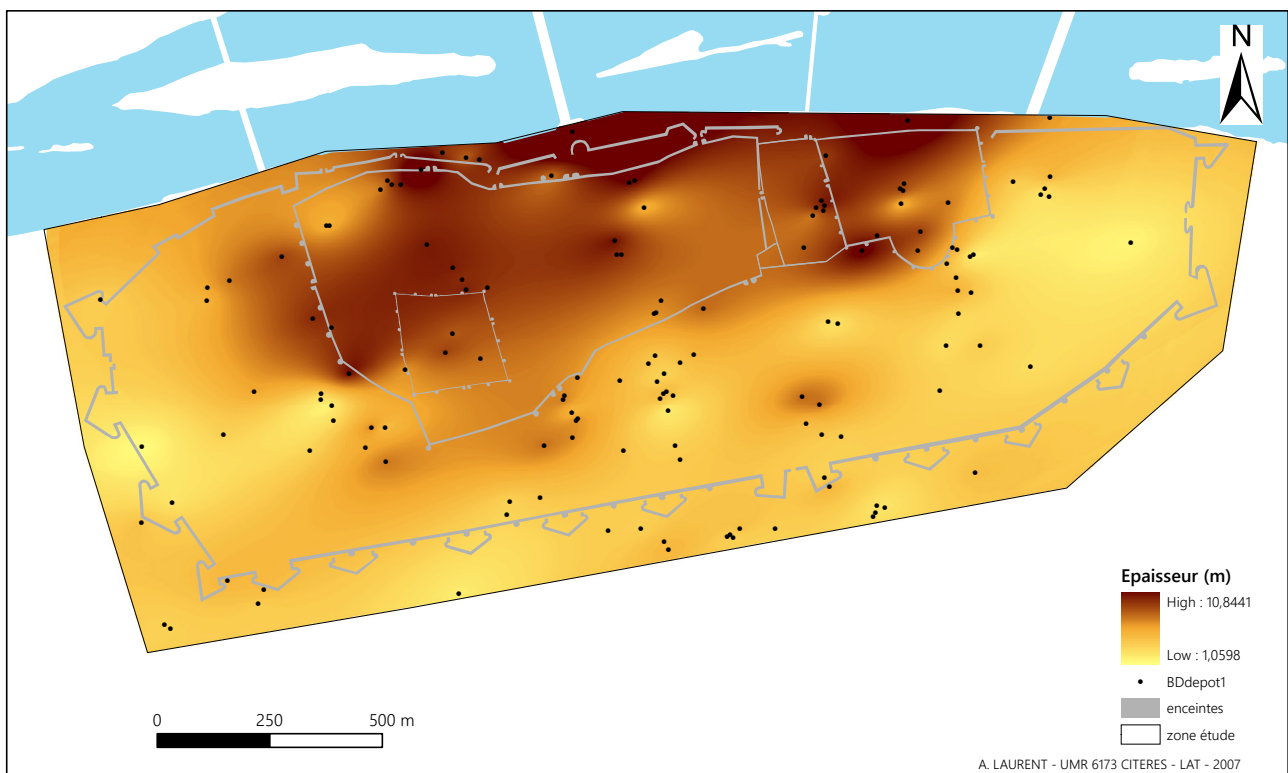
4.2. Un outil de modélisation à l'échelle de la ville

Plusieurs travaux, réalisés à l'échelle de la ville, ont permis de modéliser le sol urbain en interpolant des observations ponctuelles sur l'épaisseur du dépôt archéologique et sur la cote d'apparition du substrat. Les observations archéologiques ou géotechniques prennent la forme de logs enregistrés dans des bases de données adaptées. À l'aide de système d'information géographique, des modèles sont générés pour restituer le toit des substrats, comme à Bourges à l'échelle de la ville.

Les travaux menés à Tours proposent des modélisations de l'épaisseur du dépôt archéologique à l'échelle de l'espace urbanisé ancien (Laurent, 2007) [fig. 23] ou à l'échelle de la plaine alluviale (Morin *et al.*, 2013). D'autres modèles présentent également la configuration du toit des différents substrats (alluvions anciennes et calcaire). La modélisation a été effectuée par une interpolation spatiale à l'aide des géostatistiques (krigeage ordinaire) qui ont la particularité de mesurer la distance de corrélation entre les logs et d'estimer la représentativité du modèle par validation croisée entre les mesures et les estimations à l'emplacement même des points (Laurent-Dehecq & Rodier, 2025). À l'échelle de l'espace urbanisé ancien, le modèle s'appuie sur un corpus de point composés de sondages géotechniques « classiques » (82), des sondages au PANDA® (7) et des observations archéologiques (56). Les résultats montrent que le dépôt archéologique est plus épais au sein de l'espace urbanisé ancien et notamment dans les espaces occupés quasiment en continu depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours. Il peut atteindre jusqu'à 12 mètres d'épaisseur dans les secteurs fortement remblayés sur les rives de La Loire.

Par ailleurs, les modèles concernant les alluvions anciennes permettent de mieux cerner le positionnement de montilles (buttes insubmersibles dans le lit majeur de la Loire) où notamment les installations humaines se sont implantées comme dans le secteur de l'amphithéâtre antique (Morin *et al.*, 2013, fig. 6). *A contrario*, des incisions apparaissent et mettent en évidence la présence de paléochenaux perçus ponctuellement à l'occasion des opérations archéologiques. En outre, ces modèles permettent le renouvellement des connaissances à l'échelle de la ville.

Fig. 23 - Modélisation de l'épaisseur du dépôt archéologique, à l'échelle de l'espace urbanisé ancien, à Tours. (A. L.-Dehecq, UMR 7324 CITERES – LAT, 2007)



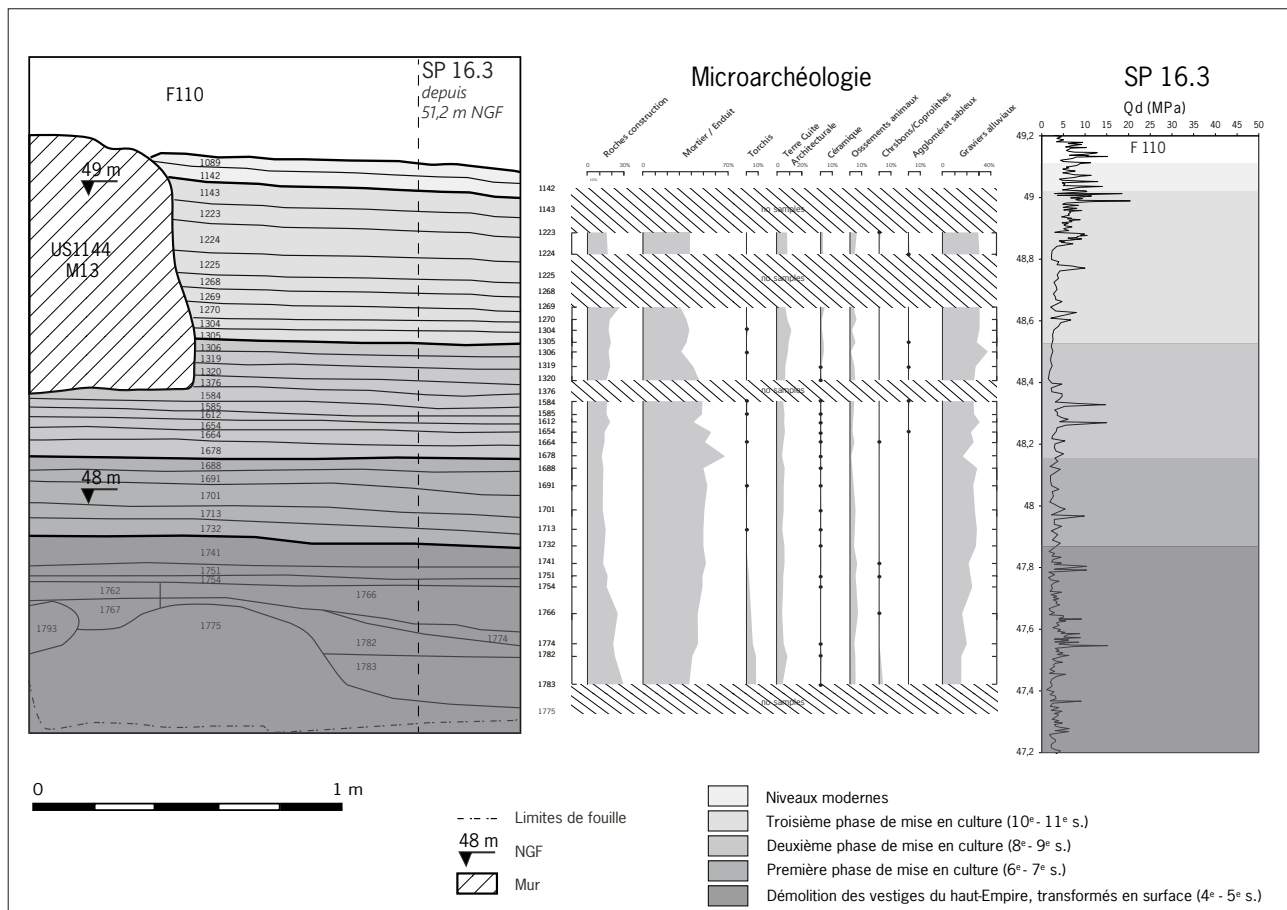


Fig. 24 - Croisement des lectures stratigraphique, microarchéologique et géotechnique, Abbaye de Saint-Julien, Tours. (M. Fondrillon, Bourges-Plus, UMR 7324 CITERES – LAT, 2023)

Ainsi, ces modèles peuvent être pris en compte pour les prescriptions archéologiques et évaluer les besoins pour réaliser ces opérations.

4.3. Une approche systémique : le couplage de méthodes

Enfin, d'autres expériences comparatives ont été testées en croisant sondages au PANDA® et des observations micromorphologiques et microarchéologiques, en s'attachant davantage à l'échelle du site, voire de zones d'activités spécifiques (Courtois, 2025 ; Galinié & Lorans, 2003).

L'étude interdisciplinaire menée sur le site de Saint-Julien à Tours illustre bien cette démarche, dans laquelle la caractérisation des séquences de terres noires était un enjeu central. Des fouilles ont été menées entre 2000 et 2003 à proximité de l'abbatiale Saint-Julien, près de la limite actuelle de la rive sud de la Loire. Elles ont révélé sept mètres de stratification, allant des niveaux romains au niveau actuel de circulation. À l'intérieur de ces dépôts, les terres noires du Bas-Empire et du haut Moyen Âge représentent un à deux mètres d'épaisseur. Les fouilles ont été principalement entreprises dans le but de caractériser ces dépôts, selon une approche systémique associant des études stratigraphiques et mobilières traditionnelles et des études géoarchéologiques.

C'est sur ce site que notre dialogue a été amorcé en 2000, avec notamment la confrontation des lectures stratigraphiques, microarchéologiques et géotechniques des séquences de terres noires. Sur cet exemple de coupe [fig. 24], les terres noires correspondent à une séquence de sols bruns très homogènes. Au moment de la fouille, seules quelques différences très ténues, difficiles à suivre et à caractériser, ont été observées. L'homogénéité des dépôts a conduit à une fouille par passes arbitraires. L'étude microarchéologique, engagée sur une colonne stratigraphique, a révélé une variabilité stratigraphique des assemblages de constituants grossiers, principalement composés de gravats

de bâtiments antiques, ainsi qu'une accumulation régulière des dépôts et non un remblaiement massif (Fondrillon, 2007, p. 447-457 ; Fondrillon, 2010, p. 148-150, fig. 6). La microarchéologie a ainsi permis d'expliquer la présence de pics de résistance observés sur les pénétrogrammes. En effet, la variété de la valeur moyenne de résistance des terres noires ou dépôts assimilés est expliquée par la présence plus ou moins importante de matériaux grossiers et la diversité des assemblages de constituants. Le caractère homogène de ces niveaux, mis en évidence par les observations microarchéologiques et micromorphologiques, se traduit bien en termes de propriétés mécaniques. Ces premiers résultats encourageants montrent la possibilité d'utiliser cet outil en couplage avec l'analyse des constituants du sol et leurs assemblages pour caractériser ces séquences de terres noires et procéder à leur détection en d'autres lieux de la ville, dans le cadre d'un programme de prospections au PANDA®. Notre collaboration a par ailleurs permis d'établir une grille d'analyse commune, relative à l'interprétation fonctionnelle des sols archéologiques, posant les bases de chacun de nos référentiels (Laurent & Fondrillon, 2010).

5. Conclusion

Les expériences acquises à la fois dans un cadre préventif et programmé ont été l'opportunité de nourrir notre dialogue depuis plus de vingt ans sur la question de l'évaluation du potentiel archéologique. Nous avons mené des expériences permettant d'aborder différents contextes d'interventions qui résument bien ce qui peut être mis en place à partir de l'utilisation de la prospection géotechnique en contexte archéologique. Ce dialogue est permanent à chaque étape du processus, depuis le questionnement scientifique ou technique de terrain, jusqu'à la prise de décision de stratégies de fouilles, grâce à la mise en place d'un référentiel et la création d'outils d'aide à la décision à quatre mains.

Différentes démarches ont ainsi été mises en œuvre pour étalonner les mesures pénétrométriques à l'échelle des sites et de la ville. La démarche déductive vise à étudier les propriétés mécaniques des formations naturelles ou anthropiques discriminées par l'archéologue et ciblées par le spécialiste. La démarche inductive exploite le référentiel archéo-mécanique et les connaissances sur la topographie historique pour poser des hypothèses sur la présence de vestiges en particulier ou du substrat rocheux. La démarche collaborative permet d'enrichir le dialogue entre l'archéologue et les spécialistes de la géophysique, de la géomorphologie et de la géotechnique. Elle consiste à établir une stratégie d'intervention pour détecter et caractériser des vestiges notamment lorsque des sondages mécaniques ne peuvent être mis en œuvre. Le maillage des prospections et la résolution des mesures sont au cœur de la discussion.

L'application du PANDA® sur les sites archéologiques, notamment en milieu urbain, est considérée comme un outil d'aide à la décision pour caractériser des structures ou des séquences spécifiques. À Bourges, toutes les configurations opérationnelles ont été testées avec, dans de nombreux cas, un retour d'expériences validant les estimations. Le dispositif a été expérimenté dans des contextes d'opérations archéologiques non-destructrices (sans ouvertures mécaniques) ou contraintes pour des raisons techniques (profondeur importante) mais également pour prendre des décisions sur la stratégie de fouilles durant les opérations ou en amont.

Enfin, les expériences menées à Bourges ou à Tours ont contribué à alimenter des bases de données sédimentaires pour modéliser le toit des substrats ou l'épaisseur du dépôt archéologique. Ainsi, ils peuvent être exploités en amont des opérations que cela soit à l'étape de la prescription ou de l'élaboration des projets scientifiques d'interventions. Par ailleurs, le croisement des observations issues de l'étude géotechnique et des études micromorphologiques

et microarchéologiques, présente des résultats encourageants pour poursuivre la démarche à l'occasion de futurs travaux de recherches.

Bibliographie

- BRYANT, Simon (dir.) (2018). *Chambord (Loir-et-Cher), Le Château : restauration des jardins à la française sur les parterres nord et est* (Rapport de fouille, 2 vol.). Inrap Centre Île-de-France. <<https://dolia.inrap.fr/flora/ark:/64298/0151573>> (consulté le 18 septembre 2025).
- COURTOIS, Julien (dir.) (2025). *Orléans, rue des Bons États* (Rapport de fouille, 4 vol.). Pôle Archéologique de la ville d'Orléans (SRA Centre-Val de Loire).
- ESRI (2016). *ArcGIS Pro : Fonctionnement de l'outil Topo vers Raster*. <<https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm>> (consulté le 16 janvier 2025).
- FONDRILLON, Mélanie. (2017). *La formation du sol urbain : étude archéologique des terres noires à Tours (4^e-12^e siècle)* (Thèse de doctorat d'histoire, 3 vol., Université François Rabelais, Tours). <<https://theses.hal.science/tel-00256362>> (consulté le 18 septembre 2025).
- FONDRILLON, Mélanie (dir.), LAURENT-DEHECQ, Amélie, THIESSON, Julien, ROLLAND, Xavier & AUGIER, Laurence. (2016). *Bourges : Jardins de l'Archevêché* (Rapport de prospection et inventaire, campagne 2016, 1 vol.). Communauté d'agglomération Bourges Plus, Service d'archéologie préventive (SRA Centre-Val de Loire).
- FONDRILLON, Mélanie (dir.), THIESSON, Julien, LAURENT-DEHECQ, Amélie, ROLLAND, Xavier, AUGIER, Laurence & Marot, Émeline. (2017). *Bourges : Jardins de l'Archevêché* (Rapport de prospection thématique, campagne 2017, 1 vol.). Communauté d'agglomération Bourges Plus, Service d'archéologie préventive (SRA Centre-Val de Loire).
- FONDRILLON, Mélanie. (2023). *Bourges : Place Cujas : réservoir de stockage (tranche 2)* (Rapport de diagnostic, 1 vol.). Communauté d'agglomération Bourges Plus, Service d'archéologie préventive (SRA Centre-Val de Loire).
- FONDRILLON, Mélanie (dir.), BOUCHET, Marion, MAROT, Emmanuel, AUGIER, Laurence, DURAND, Raphaël, SALIN, Marilyne, ROUX, Émilie, MOULIÈRES, Simon, GROETEMBRIL, Sabine, GIROND, Simon, ROBERT, Gaëlle & ROLLAND, Xavier. (2020). *Bourges : Place Séraucourt et rue Jean Bouin. Vol. 1, analyse du gisement* (Rapport de fouille, 6 vol.). Communauté d'agglomération Bourges Plus, Service d'archéologie préventive (SRA Centre-Val de Loire).
- FONDRILLON, Mélanie. (2021a). *Bourges : Jardins de l'Archevêché* (Rapport de prospection thématique, campagne 2019, 1 vol.). Communauté d'agglomération Bourges Plus, Service d'archéologie préventive (SRA Centre-Val de Loire).
- FONDRILLON, Mélanie. (2021b). *Bourges – Jardins de l'Archevêché* [notice archéologique]. ADLFI. *Archéologie de la France - Informations*. <<http://journals.openedition.org/adlfi/44214>> (consulté le 7 janvier 2025).
- FONDRILLON, Mélanie, LAURENT-DEHECQ, Amélie, MORIN, Eyméric (coll.) & ROLLAND, Xavier (coll.). (2018). Methods of assessment and characterization for urban stratification at Tours and Bourges (France) and the question of early medieval dark earth deposits. *European journal of post-classical archaeologies*, 8, 43-72. <https://www.postclassical.it/PCA_Vol.8_files/PCA%208_Fondrillon-et-al.pdf> (consulté le 21 janvier 2026).
- GALINIÉ, Henri. (1999). L'appréhension archéologique du sol urbain. Dans S. Barles, D. Breyse, A. Guillaume & C. Leyval (dir.), *Le sol urbain* (p. 7-21). Anthropos.
- GALINIÉ, Henri & LORANS, Elisabeth. (dir.). (2003). *Tours, site de Saint-Julien, 4^e campagne de fouilles programmées* (Rapport de fouille programmée, 1 vol.). UMR 6575, Laboratoire Archéologie et Territoires, Université de Tours.

- JOSSET, Didier, AUBOURG, Viviane, MORIN, Eyméric, HULIN, Guillaume, LAURENT-DEHECQ, Amélie & MIÉJAC, Emmanuelle. (2017). Étude de la ville et du val de Blois : premiers résultats. Dans A. Dumont & R. Arthuis (dir.), *La Loire et ses Terroirs. Numéro spécial - Géoarchéologie fluviale, de l'Ardèche à la Loire-Atlantique, les résultats des recherches en cours (ports, digues, moulins, pêcheries...)* (p. 36 - 41).
- LAURENT, Amélie. (2007). *Évaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain* (Thèse de doctorat en histoire spécialité archéologie, Université de Tours, 4 vol.). <<https://theses.hal.science/tel-00214256/>> (consultée le 21 janvier 2026).
- LAURENT-DEHECQ, Amélie. (2014). L'évaluation du potentiel archéologique des villes. Une nécessité pour concilier recherche scientifique et aménagement. *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 136, 10-14. <<https://doi.org/10.4000/nda.2478>>.
- LAURENT-DEHECQ, Amélie. (2019). Utilisation du pénétromètre dynamique léger PANDA® pour la détection et la caractérisation des sols anthropiques en Région Centre-Val-de-Loire [Poster]. XXI^e colloque d'archéométrie du GMPCA, mai 2019, Montréal, Canada. <<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/CITERES-LAT/hal-04284960>> (consulté le 18 septembre 2025).
- LAURENT-DEHECQ, Amélie & PAYET-GAY, Karine. (dir.). (à paraître). *Saran, ZAC Portes du Loiret, zones E, « la Hutte »* (Rapport de fouille). Département du Loiret, SRA Centre- Val de Loire.
- LAURENT-DEHECQ, Amélie & RODIER, Xavier. (2025). Modélisation du sous-sol. Dans S. Leroy, L. Nuninger, A. Degioanni, Ph. Lanos, F-X. Le Bourdonnec, S. Cohen, X. Rodier & W. Banks (dir.), *Sciences archéologiques et statistiques. Questions, données, méthodes*, Éditions des archives contemporaines. <<https://doi.org/10.17184/eac.9782813004178>> (consulté le 21 janvier 2026).
- LAURENT-DEHECQ, Amélie, GARDÈRE, Philippe, MORIN, Eyméric, HULIN, Guillaume, AUBOURG, Viviane, JOSSET, Didier, BRYANT, Simon. (2023). Détecter et caractériser des paléochenaux à partir de sondages carottés, mécaniques et géotechniques. L'apport des recherches à Blois et à Chambord (Loiret-Cher, France). [Poster]. *Lire le sol en archéologie : pratiques de terrain et regards croisés* [Reading the soil in archaeology: field practice and interdisciplinary perspectives], 29 nov. - 1^{er} déc. 2023, Tours. <<https://dx.doi.org/10.34692/xe6e-9510>>.
- LAURENT-DEHECQ, Amélie & FONDRILLON, Mélanie. (2010). Mesurer la ville par l'évaluation et la caractérisation du sol urbain : l'exemple de Tours. *Revue archéologique du Centre de la France*, 49. <<https://doi.org/10.4000/jfrl>>.
- LEPETIT, Bernard & PUMAIN, Denise (dir.). (1999). *Temporalités urbaines*. Anthropos.
- MAÇON, Philippe. (2015). *Bourges : 12, rue Béthune-Charost* (Rapport de diagnostic, 1 vol.). Communauté d'agglomération Bourges Plus, Service d'archéologie préventive (SRA Centre-Val de Loire).
- MORIN, Eyméric, RODIER, Xavier, LAURENT-DEHECQ, Amélie & MACAIRE, Jean-Jacques. (2013). Evolution morphologique de la plaine alluviale de Tours (Indre-et-Loire) au Quaternaire récent. *Revue archéologique du Centre de la France*, 52, 367-400. <<https://doi.org/10.4000/jfse>>.
- PAPIN, Pierre. (2019). *Loches : le Château, 6^e campagne de fouilles programmées – la grande salle des comtes d'Anjou* (Rapport de fouilles, vol. 1). Service d'Archéologique du Département d'Indre-et-Loire (SRA Centre – Val de Loire).
- THIESSON, Julien, FONDRILLON, Mélanie, BODET, Ludovic, BURZAWA, Audrey, LANÉELLE, Camille & LAURENT-DEHECQ, Amélie. (2021). Les Jardins de l'Archevêché in Bourges: How Geophysics Can Help to Evaluate the Archaeological Potential of Urban Land, *ArcheoSciences*, 45(1), 135-135. <<https://doi.org/10.4000/archeosciences.9074>>.